УДК 681.88

К. Г. КЕБКАЛ, А. Г. КЕБКАЛ, В. К. КЕБКАЛ

ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ СРЕДСТВА СИНХРОНИЗАЦИИ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ СВЯЗИ В ЗАДАЧАХ УПРАВЛЕНИЯ ПОДВОДНЫМИ СЕНСОРАМИ, РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ АНТЕННАМИ, АВТОНОМНЫМИ АППАРАТАМИ

Продемонстрированы встроенные инструментальные средства точного измерения степени расхождения часов взаимодействующих гидроакустических модемов непосредственно в ходе обмена данными для решения задач синхронизации и синхронного управления распределенными сенсорами, длиннобазового позиционирования и управления подводными аппаратами

Введение

Часто использование атомных часов в составе подводных сенсорных систем невозможно или нежелательно. Например, из-за сравнительно высокого потребления мощности, в особенности в системах большой автономности из-за экспортных ограничений или высокой стоимости и сравнительно больших габаритов.

В то же время синхронизация узлов подводной сенсорной сети часто является необходимым условием для совместной обработки результатов измерений. Например, когерентная работа распределенных в пространстве гидроакустических (ГА) инструментов может осуществляться только в случае высокоточного согласования по времени процессов излучения и обработки принимаемых сигналов. Разностно-дальномерное позиционирование подводных объектов невозможно без точной синхронизации узлов длиннобазовой антенны. Долговременный согласованный сбор данных о физико-химических характеристиках обширного морского района не может быть реализован без синхронизации часов на узлах установленной в этом районе сенсорной сети, особенно в режиме длительной автономности. Поэтому решение задачи синхронизации распределенных под водой обычных компьютерных часов (малогабаритных, малопотребляющих, но нестабильных) с помощью сигналов ГА-связи является весьма актуальным.

Известно, что различие показаний часов, разнесенных в пространстве, обусловливается несинхронным включением, а их расхождение – неидентичностью частот кварцевых генераторов. Тогда синхронизация может достигаться путем оценки и корректировки временно́го смещения и степени расхождения внутренних часов узлов цифровой ГА-сети по отношению к источнику «единого» времени.

Кебкал Константин Георгиевич. Доктор технических наук, старший научный сотрудник, технический директор компании Evologics GmbH (Берлин, Германия).

Кебкал Алексей Георгиевич. Руководитель группы разработчиков программного обеспечения компании Evologics GmbH.

Кебкал Вероника Константиновна. Инженер-программист компании Evologics GmbH.

Применительно к наземным сетям существует ряд развитых протоколов, позволяющих синхронизировать внутренние часы взаимодействующих устройств. Например, это протокол общего назначения NTP (Network Time Protocol) [1], получивший широкое распространение для синхронизации компьютерных сетей, но для применения в ГА-среде характеризуется существенными недостатками, такими как сравнительно низкая точность синхронизации (миллисекунды), а также необходимость обмена большим количеством служебных данных. Кроме NTP в наземных сетях получили распространение также специфические протоколы, например PTP (Precision Time Protocol), RBS (Reference Broadcast Synchronization), TPSN (Timing-sync Protocol for Sensor Networks) и FTSP (Flooding Time Synchronization Protocol) [2–6]. Они обеспечивают более высокую точность синхронизации и не требуют передачи большого количества служебной информации, но в применении к ГА-каналу также характеризуются критическими недостатками. Они не учитывают задержки распространения сигнала в среде и не учитывают факта расхождения часов во время выполнения процедуры синхронизации (время распространения сигнала и длительность процедуры синхронизации считаются пренебрежимо малыми).

Однако из-за намного меньшей скорости распространения (на пять порядков) на сравнимых по протяженности участках задержка распространения ГА-сигнала всегда сильно превышает задержку распространения радиосигнала. Например, при передаче на расстояния в несколько километров время распространения ГА-сигнала – секунды, а время распространения радиосигнала – лишь несколько микросекунд.

Такое различие приводит к необходимости разработки специальных протоколов для использования в ГА-средах. В работе [7] представлен протокол, известный под аббревиатурой TSHL (Time Synchronization for High Latency Acoustic Networks), где описаны результаты математического моделирования и обоснована возможность сравнительно высокой точности синхронизации узлов ГА-сети. При использовании внутренних часов, основанных на кварцевых генераторах общего назначения и характеризуемых расхождением в десятки микросекунд в секунду, была показана возможность их синхронизации с точностью до 50 мкс при расстояниях между взаимодействующими модемами до 500 м. Однако такая точность обеспечивалась лишь при частом повторении процедуры синхронизации (не реже 5 с), что обусловливало большие затраты времени и энергии и, соответственно, низкую пропускную способность сети. К недостаткам реализации TSHL относится также неадекватный учет реверберации. За основу принималось гауссово рассеивание времени регистрации принимаемого сигнала на интервале времени реверберации, что является недостаточно правдоподобным при работе в ГА-каналах наибольшего практического интереса [9], в частности в каналах с горизонтальным или наклонным размещением приемопередающих устройств. В таких каналах рассеивание акустической энергии на границах среды обусловливает формирование принимаемого сигнала, содержащего множество лучевых компонентов со случайно изменяющимися энергиями и случайными, но дискретными избыточными задержками распространения.

В работе [10] представлен усовершенствованный протокол, аналогичный TSHL, способный учитывать эффект многолучевого распространения сигнала при регистрации времени его поступления в приемник. Протокол предполагает обмен последовательностями линейно частотно-модулированных (ЛЧМ) сигналов и благодаря этому обеспечивает возможность оценки профиля интенсивно-

сти многолучевого распространения в среде. Включение в цикл обмена сравнительно длинной последовательности (не менее 25) ЛЧМ-сигналов позволяло оценивать статистические характеристики каждого из лучевых компонентов принимаемого сигнала и выбирать для синхронизации приемника лучевой компонент с наиболее устойчивыми параметрами (с наименьшим рассеиванием значений амплитуды и задержки распространения при регистрации в приемнике). Однако экспериментальные оценки степени расхождения часов, полученные в результате использования этого протокола, оказались неточными. Неточности обусловливались накапливающимися погрешностями синхронизации, что приводило также к необходимости частого выполнения процедуры синхронизации и, как следствие, к большим затратам времени и энергии узлов сети, а также к снижению ее пропускной способности.

В статье представлены инструментальные средства, реализованные в качестве специализированных функций ГА-модемов серии S2C (sweep-spread carrier) [11] версии 1.7 [12], обеспечивающие измерение задержек распространения ГА-сигнала с точностью до микросекунд, в частности при работе в изменчивых ГА-каналах с высоким уровнем реверберации. Отличительной особенностью этих средств является возможность выполнения синхронизации или досинхронизации часов (уточнение смещения и степени их расхождения) прямо во время обмена полезными данными между узлами сети.

Эксперименты выполнены для неподвижных узлов ГА-сети. При соблюдении ряда условий, например следования подводных аппаратов параллельными курсами, результаты этих экспериментов могут быть значимыми также для развития способов синхронизации работы подвижных объектов. В разделе 1 описаны инструментальные средства синхронизации ГА-устройств связи, в разделе 2 – результаты экспериментов с ними.

1. Измерение задержек распространения гидроакустического сигнала

Инструментальные средства основаны на использовании расширенного набора (специализированных) функций ГА-модемов серии S2C. Особенностью этих средств является предоставление пользователю набора команд, аналогичных AT-командам Hayes [13] (в которых каждая команда всегда начинается буквами AT от английского ATtention), для создания собственных алгоритмов синхронизации часов при обмене данными между модемами в ГА-канале.

Точность измерения времени распространения ГА-сигнала

Известно [14], что в цифровой связи одна из наиболее значимых погрешностей синхронизации потоков данных, которыми обмениваются источник и получатель, обусловливается неопределенностью времени прохождения пакетов от уровня приложения (если есть, то также и от транспортного и/или сетевого уровня) к уровню управления доступом к среде. При этом часто предполагается, что физический уровень и уровень управления доступом к среде реализованы на одном контроллере и используют один и тот же источник квантования времени. В случае же когда они реализованы на разных контроллерах, неопределенность времени прохождения пакетов возрастает на величину случайной задержки обмена данными между ними.

Одно из решений, позволяющее избавиться от этой неопределенности, состоит в создании дополнительных межуровневых интерфейсов, обеспечиваю-

щих учет смещения часов соседних уровней в моменты фактического обмена пакетами между ними. Однако техническое исполнение такого решения представляет собой сложную задачу и в ряде случаев может оказаться нереализуемым.

Альтернативное решение состоит в создании специальных режимов работы, в которых часть задач нижнего уровня системы связи делегируются ее верхним уровням. С точки зрения задачи синхронизации потоков данных в канале такой подход обеспечивает доступ верхнего уровня системы связи к показаниям часов ее нижнего уровня и в результате исключает неопределенность времени прохождения пакетов данных между ними.

Такой подход реализован в ГА-системах цифровой связи серии S2C [11, 12]. Он разграничивает функциональные возможности системы связи при работе в стандартном и в специализированном режимах. Часть функций, присущих стандартному режиму, не могут быть выполнены во время работы специализированного режима, и наоборот. Однако это обстоятельство не следует рассматривать в качестве недостатка, так как и тот и другой наборы функций выполняются на одной аппаратной платформе и на основе одного и того же уровня управления доступом к среде (дуального уровня, имеющего называние DMAC [15]). Такая реализация обеспечивает возможность гибкого управления режимами работы системы связи с помощью простых протоколов/скриптов верхнего уровня (последовательностей АТ-команд), а также гибкого комбинирования стандартного и специализированного режимов работы ГА-модема.

На рис. 1 проиллюстрированы стандартный и синхронный режимы работы ГА-модема серии S2C. В стандартном режиме (рис. 1, *а*) при передаче пакетных данных или простых «срочных сообщений» верхние уровни системы связи не обеспечиваются информацией о показаниях часов нижнего уровня.

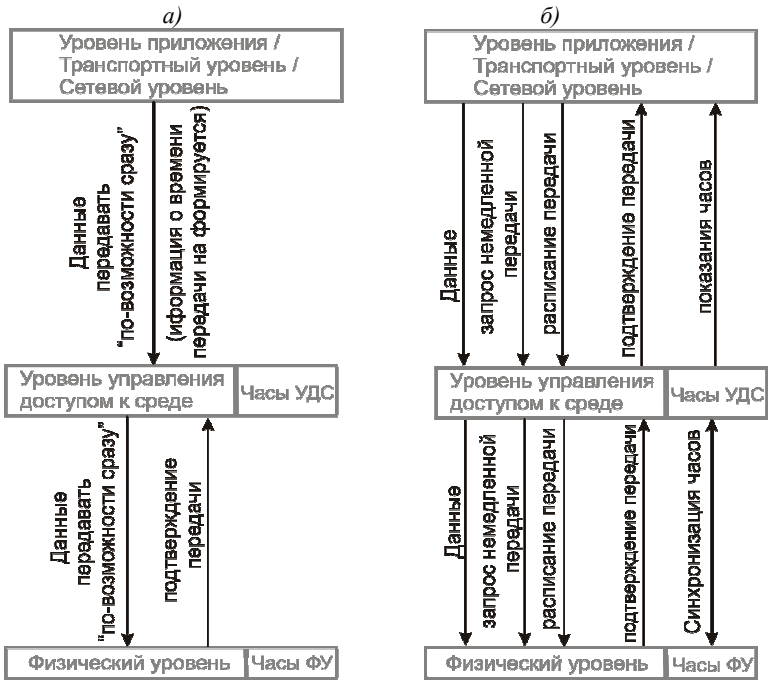

Рис. 1. Взаимодействие уровней при стандартной (*а*) и синхронной (*б*) передаче данных

В отличие от этого в синхронном режиме (рис. 1, *б*) расписание отправки данных может задаваться верхним уровнем, например приложением, но обеспечиваться физическим уровнем с использованием собственных часов. В этом режиме верхний уровень системы связи задает физическому уровню точные интервалы между пакетами, которые должны быть выдержаны при передаче пакетов в среду распространения. В ходе передачи физический уровень информирует верхний уровень о фактическом времени отправки каждого пакета, сообщая значение своих часов и подтверждение об отправке.

Кроме отправки «по расписанию» в специализированном (синхронном) режиме передача отдельных пакетов данных может также инициироваться верхним уровнем, основываясь на принципе «как можно быстрее». Однако в отличие от стандартного режима верхний уровень передающего устройства связи всегда получает уведомление о показаниях часов физического уровня, зарегистрированные в момент передачи пакета в ГА-среду. Дополнительно в синхронном режиме верхний уровень системы указывает физическому уровню время, через которое должна состояться отправка синхронного срочного сообщения в канал распространения. При этом если это время не может быть выдержано, физический уровень информирует верхний уровень о невозможности исполнения этого действия и, таким образом, предоставляет ему возможность выбора другого времени для повторной попытки передачи. На другой стороне, после поступления сигнала на прием, верхний уровень приемного устройства также получает уведомление с показаниями часов своего физического уровня, зарегистрированные на момент приема сигнала из ГА-среды.

Как указано выше, в этом специализированном режиме часть функций стандартного модема серии S2C недоступны. В частности, невозможно произвольное комбинирование пакетных данных и срочных сообщений. С другой стороны, благодаря этому режиму протоколы верхнего уровня обеспечиваются инструментом для учета точного времени отправки пакетов данных в канал распространения, а также для приема из него пакетов данных на стороне получателя (лабораторная точность учета времени передачи/приема составляет 1 мкс). Благодаря этому в ходе двустороннего обмена сообщениями протоколы верхнего уровня имеют возможность точного учета времени распространения сигналов в среде, что обусловливает создание пользователем собственных алгоритмов синхронизации взаимодействующих ГА-модемов (ГА-сетей). Особенность синхронного режима состоит в том, что точный учет задержек распространения сигнала между узлами сети может осуществляться без прерывания процесса обмена полезными данными, с точной оценкой степени расхождения часов взаимодействующих устройств (описано ниже).

Особенности технологии S2C по учету эффектов многолучевого распространения ГА-сигнала

Особенности технологии S2C [16] позволяют определять профиль интенсивности многолучевого распространения сигнала, характеристики каждого из лучей этого профиля и отслеживать их изменения в процессе обмена данными, а также выбирать наиболее устойчивый по своим характеристикам лучевой компонент для синхронизации приемника цифровых сигналов. Техническая реализация этих особенностей в ГА-модемах обеспечивает высокую точность оценки времени распространения сигнала в ГА-каналах, включая каналы с высоким уровнем и большой продолжительностью реверберации.

Оценка профиля интенсивности многолучевого распространения.

Каждый из передаваемых пакетов данных содержит пару синхронизирующих импульсов, предназначенных для оценки характеристик ГА-канала, в частности текущего профиля интенсивности многолучевого распространения [11, 16]. В самом простом исполнении синхроимпульсы представляют собой манипулированные по фазе ЛЧМ-сигналы продолжительностью от 2 до 4 мс (в зависимости от модели ГА-модема), занимающие весь рабочий диапазон частот (десятки килогерц) [12, 17].

При работе в канале с высоким уровнем реверберации использование широкополосных сигналов обеспечивает возможность разделения лучевых компонентов и их выборочного, частичного или полного подавления [11]. Это вызвано тем, что вследствие монотонной развертки несущей мгновенные частоты задержанных лучевых компонентов принимаемого сигнала смещены по отношению к мгновенным частотам уже поступивших лучей [11, 16]. Если один из лучей совместить по времени с опорным сигналом и затем выполнить перемножение принимаемого и опорного сигналов, то мощность разностной составляющей в области нулевой частоты будет прямо пропорциональна мощности синхронного луча. В то же время несинхронные лучи, смещенные по времени по отношению к опорному сигналу, будут находиться в стороне от нулевой частоты и могут быть отфильтрованы. Причем чем больше отличие по частоте, тем большее ослабление несинхронных компонентов может быть достигнуто. Количественно этот эффект продемонстрирован в работе [11]: если один из лучей синхронизировать в приемнике с опорным сигналом и затем выполнить оптимальную фильтрацию, то влияние каждого несинхронного луча на достоверность оценки параметров синхронного будет убывать как с возрастанием избыточных задержек распространения несинхронных лучей, так и с увеличением степени расширения спектра сигнала. Такое убывание характеризуется зависимостью, подобной sinx/x.

Двунаправленный обмен с текущим оцениванием профиля интенсивности многолучевого распространения

Дуальный уровень управления доступом к каналу [15], реализованный в ГА-модемах серии S2C, для ряда режимов работы предполагает двусторонний обмен сообщениями. Это обстоятельство обусловливает, с одной стороны, возможность оценивания профиля интенсивности многолучевого распространения на обеих сторонах ГА-канала, а с другой – возможность отслеживания изменений в характеристиках такого профиля в ходе обмена данными.

Действительно, во время обмена данными в ходе повторной синхронизации приемника с поступающим сигналом происходит накопление информации о характеристиках каждого из компонентов профиля интенсивности многолучевого распространения. Из этих характеристик для каждого лучевого компонента формируется «метрика устойчивости», основанная на значении среднеквадратического разброса мощности и задержки поступления на прием. Среди всех лучевых компонентов, имеющих мощность не менее -6 дБ по отношению к доминирующему лучу, выбирается наиболее устойчивый, который и используется приемником для целей синхронизации. Возможность выбора синхронного луча среди нескольких доминирующих означает, что наиболее энерговесомый луч не

всегда выбирается в качестве синхронного: для ряда режимов работы модема для синхронизации выбирается не самый устойчивый луч, а луч, поступивший на прием первым, и мощность которого не менее -6 дБ по отношению к мощности доминирующего.

Высокая разрешающая способность при разделении лучевых компонентов

Количественная и качественная оценка погрешности регистрации времени приема сигнала (синхронизации приемника) в условиях реверберации представлена в работе [17]. Аналитические результаты и результаты численного моделирования показали, что для типичных для ГА-связи частот погрешность регистрации времени приема сигнала в каналах с реверберацией – единицы микросекунд. Показано, что возможности выбора приемником лучевого компонента, разделения в частотных координатах и ослабления влияния несинхронных лучей на достоверность оценки параметров синхронного луча обусловливает малое значение погрешности при регистрации времени приема сигнала (точнее, его первого или наиболее устойчивого лучевого компонента). В условиях реверберации появляется возможность высокоточного измерения времени распространения сигнала между взаимодействующими узлами ГА-сети.

Измерение времени распространения сигнала
в ходе обмена данными между узлами ГА-сети

Для большей конкретности на рис. 2 представлен пример работы ГА-модемов в режиме обмена синхронными срочными сообщениями для решения задачи синхронизации часов во время обмена полезными данными.

Пусть уровень приложения (компьютер-источник/получатель данных) подключен непосредственно к ГА-модему, при этом приложение слева подключено к модему с адресом 1, а приложение справа подключено к модему с адресом 2. Команды и уведомления на рисунке демонстрируют работу межуровневых связей, в частности диалоги между уровнем приложения и уровнем управления доступом к среде при передаче сообщений в ГА-канал и при приеме из него.

Приложение слева инициирует обмен синхронными срочными сообщениями (диалог слева вверху). Первая строка описывает команду для передачи срочного сообщения (SENDIMS) длиной 4 байта ГА-модему с адресом 2, при этом поле из четырех байт заполняется текстом test. Отсутствие какого-либо значения между двумя последними запятыми означает «передать как можно быстрей». После получения этой команды уровень управления доступом к среде извещает об исполнении команды (вторая строка) со статусом готовности OK. Третья строка описывает уведомление уровня управления доступом к среде о начале передачи (SENDSTART) модему с адресом 2 синхронного срочного сообщения (ims) продолжительностью 150000 мкс без задержки исполнения команды (последнее поле равно нулю). В четвертой строке уровень управления доступом к среде извещает о завершении передачи (SENDEND) ГА-модему с адресом 2 синхронного срочного сообщения (ims). Показание часов физического уровня, при котором началась передача сигнала в ГА-канал, составляло 3000000000 мкс. На основании данных уведомлений может быть вычислен момент завершения передачи сигнала физическим уровнем (прибавлением длины переданного сообщения к T_1).

Этот диалог иллюстрирует механизм уведомления верхнего уровня информацией, содержащей показание часов физического уровня, т.е. информацией о точном времени передачи сигнала в воду.

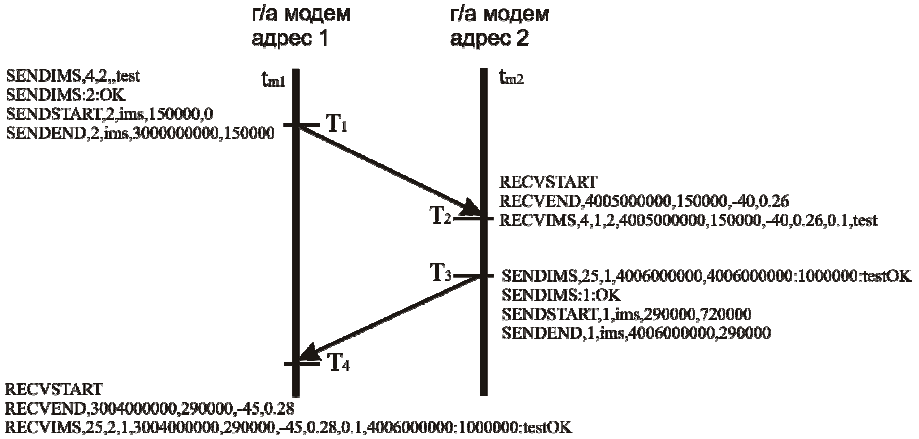

Рис. 2. Обмен синхронными срочными сообщениями
для решения задачи синхронизации часов по ГА-каналу

На противоположной стороне при приеме сообщения из ГА-канала модем с адресом 2 (уровень управления доступом к среде) начинает диалог с уровнем приложения. Первая строка извещает об обнаружении ГА-сигнала (RECVSTART). Вторая (RECVEND) уведомляет о том, что в начале приема сообщения часы физического уровня показывали T_2=4005000000 мкс, длительность принятого сообщения составляла 150000 мкс, уровень принятого ГА-сигнала -40 дБ, «показатель целостности» принимаемого сигнала 0.26 (см. разд. 2).

В последней строке – уведомление о завершении приема сообщения (RECVIMS) длиной 4 байта, поступившее от модема с адресом 1 на модем с адресом 2. Показание часов физического уровня, при котором начался прием сигнала из ГА-канала, равнялось 4005000000 мкс. Момент завершения приема сигнала физическим уровнем вычисляется также прибавлением к этому показанию длины принятого сообщения. В этом уведомлении дублируется значение уровня принятого ГА-сигнала (-40 дБ), показатель целостности принимаемого сигнала (0.26), а также сообщается оценка взаимной радиальной скорости перемещения модемов, составляющая 0.1 м/с. Содержанием принятого сообщения (поле из четырех байт) является текст test.

После формирования собственного сообщения приложение, подключенное к модему с адресом 2, инициирует передачу синхронного срочного сообщения в обратную сторону. Текст справа внизу иллюстрирует диалог между уровнем приложения и уровнем управления доступом к среде. Первая строка описывает команду для передачи срочного сообщения (SENDIMS) длиной 25 байт ГА-модему с адресом 1 в момент времени T_3=4006000000 мкс (по часам физического уровня), причем поле из 25 байт заполнено текстом 4006000000:1000000: testOK. Таким образом, предназначенные к передаче данные состоят из трех фрагментов: времени отправки сообщения модемом с адресом 2 (4006000000 мкс), задержки 1000000 мкс, минувшей с момента приема предыдущего сообщения от модема с адресом 1 (T_3-T_2=1000000 мкс), а также текста testOK. После получения команды на отправку сообщения уровень управления доступом к среде извещает об исполнении команды (вторая строка), в частности об отправ-

ке на адрес 1 со статус готовности OK. Третья строка описывает уведомление о начале передачи (SENDSTART) модему с адресом 1 синхронного срочного сообщения (ims) продолжительностью 290000 мкс; при этом измеренная модемом задержка исполнения команды (разница во времени между подачей команды SENDIMS и ее исполнения физическим уровнем – SENDSTART) составила 720000 мкс. Четвертая строка извещает о завершении передачи (SENDEND) модему с адресом 1 синхронного срочного сообщения (ims); показания часов физического уровня, при котором началась передача сигнала в ГА-канал, имели значение T_3=4006000000 мкс.

В завершение цикла обмена ГА-модем с адресом 1 принимает из ГА-канала сообщение от модема с адресом 2. Уровень управления доступом к среде этого модема исполняет диалог с уровнем приложения (слева внизу). Первая строка извещает об обнаружении ГА-сигнала (RECVSTART). Вторая (RECVEND) уведомляет о том, что в начале приема сообщения часы физического уровня показывали T_4=3004000000 мкс, длительность принятого сообщения 290000 мкс, уровень принятого ГА-сигнала – 45 дБ, показатель целостности принимаемого сигнала составлял 0.28. В последней строке – уведомление о завершении приема сообщения (RECVIMS) длиной 25 байт, поступившее от модема с адресом 2 на модем с адресом 1. Показание часов физического уровня, при котором начался прием сигнала из ГА-канала, равнялось 3004000000 мкс. Уровень принятого ГА-сигнала составил – 45 дБ, показатель целостности принимаемого сигнала составлял 0.28, взаимная радиальная скорость перемещения модемов также 0.1 м/с. Содержанием принятого сообщения (поле из 25 байт) является текст 4006000000:1000000:testOK, включающий в себя значение T_3 и разницу времен T_3-T_2.

По завершении цикла обмена приложение, подключенное к модему с адресом 1, располагает всей необходимой информацией для синхронизации своих часов с часами модема с адресом 2. В частности, оно способно вычислить время распространения сигнала в канале как $T_р = (T_4\text{-}T_1\text{-}T_3\text{-}T_2)/2 = 1500000$ мкс, а также, зная показание часов физического уровня модема с адресом 2, вычислить смещение часов физического уровня модема с адресом 1: t_{m1}-t_{m2} в виде $dT = T_4\text{-}T_3\text{-}T_р = -1003500000$ мкс.

Очевидно, что при многократном обмене синхронными срочными сообщениями, кроме смещения, может быть также выполнена оценка степени расхождения часов.

Следует отметить, что данные, передаваемые в составе синхронного срочного сообщения, не обязательно должны быть текстом. Это могут любые бинарные данные. Данные от различных источников могут комбинироваться, при этом их количество в одном сообщении не должно превышать 512 бит. Таким образом, сообщения (см. рис. 2), заданные для наглядности текстом, в действительности будут занимать намного меньше места (например, для бинарного представления временной метки достаточно иметь одно четырехбайтное слово, что намного меньше 10 однобайтных слов).

Таким образом, благодаря способности ГА-модема технологии S2C изолировать в частотных координатах один из лучевых компонентов и ослаблять влияние других обеспечивается возможность точного измерения задержек распространения ГА-сигнала в среде распространения. Также благодаря специализированному режиму модемы обеспечивают возможность использования протоколами верхних уровней показаний часов физического уровня для управления передачей ГА-сигналов в среду распространения, а также регистрации времени

приема сигнала из среды. Неопределенность времени приема/передачи сигнала, связанная с прохождением пакета между различными уровнями системы связи, устраняется, а неопределенность времени приема ГА-сигнала, связанная с эффектом многолучевого распространения, существенно уменьшается.

2. Экспериментальные исследования

Эксперименты по обмену синхронными срочными сообщениями выполнялись в ходе морской экспедиции CommsNet13 с 9 по 20 сентября 2013 в Средиземном море на внешнем рейде порта La Spezia с использованием экспериментальной ГА-сети LOON (Littoral Ocean Observatory Network) – постоянно действующий гидроакустический полигон, созданный центром CMRE для мультидисциплинарных гидроакустических исследований. Расположение узлов этого полигона (узлов сети) представлено на рис. 3.

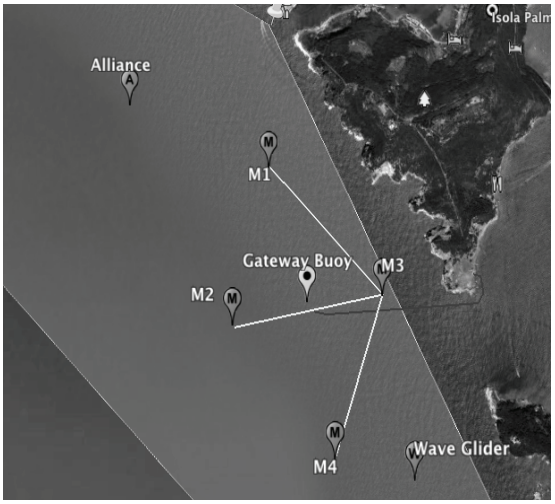

Рис. 3. Расположение узлов ГА-сети LOON

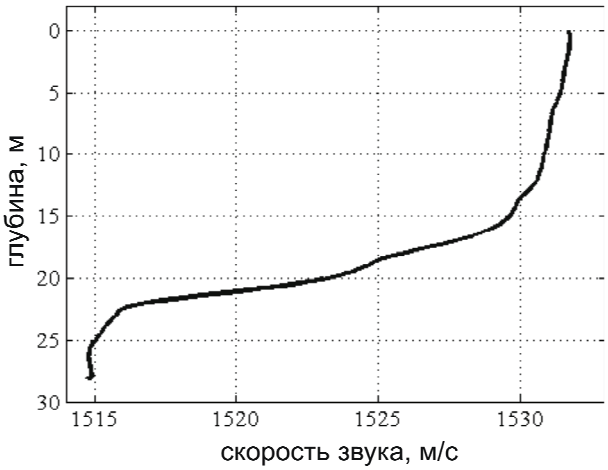

Рис. 4. Вертикальный разрез скорости звука

В эксперименте обмен синхронными срочными сообщениями осуществлялся между узлами М1 (44 02.4047` N, 09°49.8733`E, глубина 27.5 м), М2 (44 01.9273`N, 09°49.6949`E, глубина 28.5 м), М3 (44 02.0151`N, 09°50.3955`E, глубина 27.5 м) и М4 (44 01.5458`N, 09°50.1683`E, глубина 28.0 м). Расстояния между узлами соответствующих пар составляли М1 – М2: 912 м, М1 – М3: 1001 м, М1 – М4: 1634 м. Измеренный в период выполнения экспериментов вертикальный разрез профиля скорости звука представлен на рис. 4.

Полигон оснащался ГА-модемами S2CR18/34 производства Evologics, Германия. ГА-приемоизлучатели модема характеризовались гладкой АЧХ в диапазоне частот 18 – 34 кГц с убыванием чувствительности на 6 дБ на краях данного диапазона. Слабовыраженный резонанс наблюдался в районе 26 кГц. В горизонтальной плоскости приемоизлучатель был ненаправленным. В вертикальной плоскости приемоизлучатель характеризовался слабовыраженной направленностью с углом открытия 120°. Уровень излучаемого сигнала устанавливался на наименьшее значение и составлял 169 dB по отношению к 1 мкПа.

Ниже рассмотрены три примера, в которых узел М1 с периодичностью 1000000 мкс передавал синхронные срочные сообщения, а узлы М2, М3 и М4 принимали эти сообщения, оценивали степень расхождения своих часов (часов физического уровня) по отношению к аналогичным часам узла-отправителя М1. Кроме того, М2, М3 и М4 оценивали точность синхронизации приемника ГА-модема с поступающим на прием ГА-сигналом.

Оценка степени расхождения часов происходила следующим образом. После синхронизации приемника (физического уровня) с текущим ГА-сигналом оценивалось время, прошедшее с момента приема предыдущего сигнала (момента синхронизации с ним). В идеальном случае при нулевом расхождении расхождения часов и в отсутствие помех ГА-канала разница в моментах синхронизации двух соседних сигналов должна была точно совпадать с разницей моментов излучения этих сигналов. Однако в реальности эта разница была ненулевой. Из-за разницы частот кварцевых генераторов приемного и передающего устройств показания их часов расходились. Соответственно, всегда существовала некоторая разница между интервалами излучения (контролируемого по часам передатчика) и интервалами приема сигналов (регистрируемого по часам приемного устройства). Кроме того, разница между этими интервалами обусловливалась помехами, возникающими при приеме сигналов из ГА-среды.

Степень расхождения часов в первом приближении выражается линейной функцией, определяемой разницей квантования времени соответствующих кварцевых генераторов, а воздействие ГА-канала выражается случайным разбросом моментов времени регистрации принимаемого сигнала (синхронизации приемника с поступающим сигналом).

На рис. 5 продемонстрированы условия приема ГА-сигнала для участка распространения между узлами М1 и М3 (для остальных пар также выполнялся анализ условий приема сигнала). В частности, результаты суточного мониторинга – ряд параметров ГА-канала перед и после проведения тестов.

На рис. 5, *а* – профиль интенсивности многолучевого распространения, измеренный физическим уровнем ГА-модема узла М3. На суточном мониторинге профиля видно наличие от 2 до 4 лучевых компонентов (один – с избыточной задержкой распространения 120 мкс, второй – 280 мкс, третий – 390 мкс). Следует отметить, что ГА-модем учитывает в своей таблице только наиболее энерговесомые лучи, имеющие уровень не ниже -6 дБ по отношению к доминирующему лучу. В связи с этим менее энерговесомые лучи на профилях отсутствуют.

Уровень сигнала (как сумма энергий всех лучей) превышал уровень шума окружающей среды на 8-17 дБ (рис. 5, *б*); показатель целостности сигнала (рис. 5, *в*) – в пределах от 0.2 до 0.6 (показатель целостности измерялся как коэффициент корреляции синхронного луча с опорным сигналом). Доплеровское рассеивание – в пределах ±2 Гц (рис. 5, *г*).

Степень расхождения часов, полученная экспериментально по данным обмена синхронными срочными сообщениями между узлами М1 и М3, представлена на рис. 6, *а*. Часы физического уровня модема М3 «отстают» от часов физического уровня модема М1. При этом на интервале измерений продолжительностью 392 с отставание часов составило 1589 мкс. Из экспериментальных данных следует, что расхождение часов в первом приближении может быть представлено линейной зависимостью. Разброс времени регистрации принимаемого ГА-сигнала на рис. 6, *б*. Он характеризуется некоторым ненулевым средним и случайным рассеиванием вокруг него. Среднее значение, равное -4.05 мкс, соответствует разнице в частотах квантования часов физического уровня модемов М1 и М3 и определяет скорость расхождения их часов. Среднеквадратическое отклонение (СКО) от среднего, равное 2.87 мкс, определяет случайный разброс времени регистрации сигнала, обусловленный помехами ГА-канала. По сути, этот разброс выражает степень воздействия ГА-канала на точность регистрации принимаемого ГА-сигнала (синхронизации приемника с этим сигналом). Следует отметить, что рассеивание отличается от гауссового, поэтому оценка СКО может лишь в первом приближении использоваться для оценки точности синхронизации приемника при работе в сложных многолучевых ГА-каналах. В данном случае при СКО 2.87 мкс максимальный разброс значений синхронизации приемника составлял -14 … +13 мкс вокруг измеренного среднего.

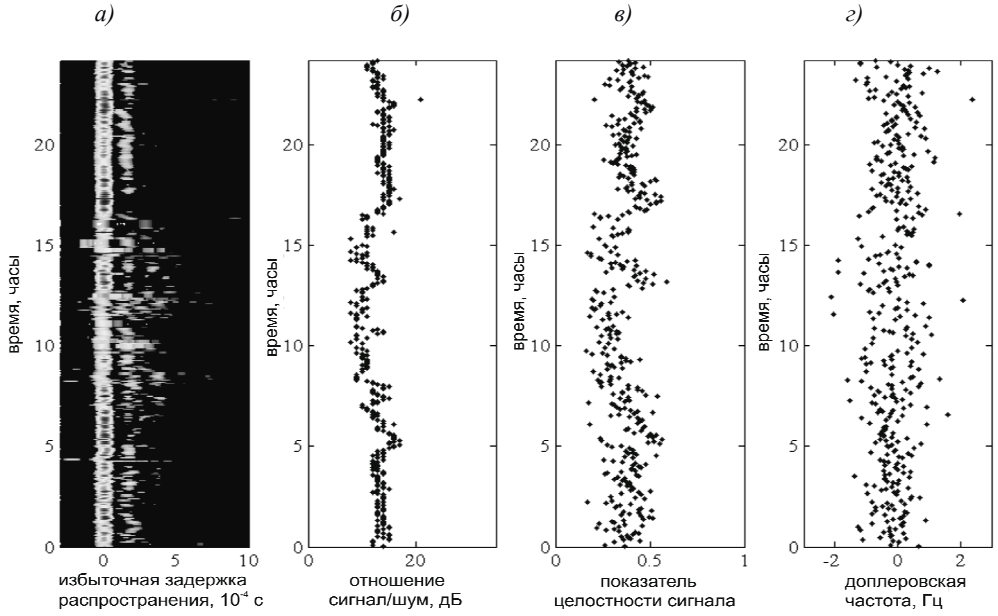

Рис. 5. Условия приема ГА-сигнала (участок между узлами М1 и М3)

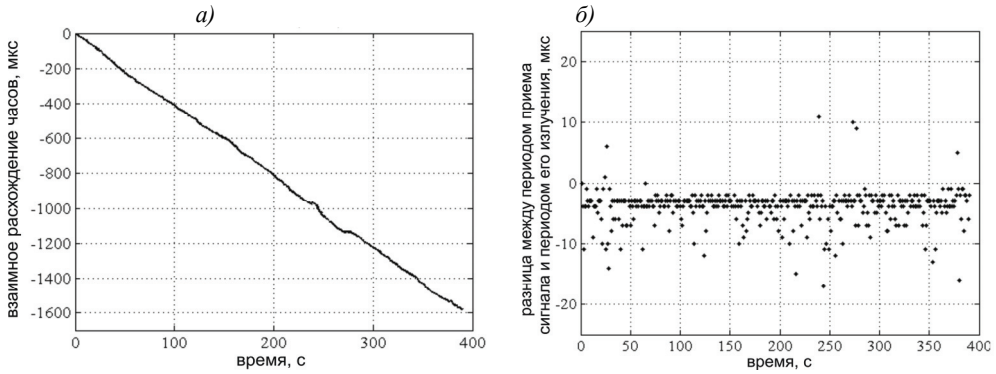

Рис. 6. Степень расхождения часов между узлами М1 и М3 (*а*)
и разброс времени регистрации сигнала на М3, обусловленный помехами (*б*)

На другой паре узлов – на участке распространения сигнала между узлами М1 и М2 – профиль интенсивности многолучевого распространения, измеренный физическим уровнем ГА-модема узла М2, содержал 2 – 3 лучевых компонента (один – с избыточной задержкой распространения около 100 мкс, второй – около 3500 мкс). Уровень сигнала (как сумма энергий всех лучей) превышал уровень шума окружающей среды на 10 – 25 дБ. Показатель целостности сигнала лежал в пределах от 0.25 до 0.65; доплеровское рассеивание сигнала – в пределах ±1 Гц. Оценка степени расхождения часов, полученная экспериментально по данным обмена синхронными срочными сообщениями между узлами М1 и М2, показало, что часы физического уровня модема М2 «отстают» от часов физического уровня модема М1. Отставание часов на интервале измерений продолжительностью 206 с составило 1078 мкс. Расхождение часов в первом приближении также представимо линейной зависимостью. Разброс времени регистрации принимаемого ГА-сигнала характеризуется ненулевым средним и случайным рассеиванием. Среднее значение (-5.23 мкс) соответствует разнице в частотах квантования часов физического уровня модемов М1 и М2 и определяет скорость расхождения часов. Среднеквадратическое отклонение (СКО) от среднего, равное 2.62 мкс, определяет случайный разброс времени регистрации сигнала, обусловленный помехами ГА-канала, и выражает степень воздействия канала на точность регистрации принимаемого сигнала (или синхронизации приемника с моментом его поступления). В данном случае при СКО, равном 2.62 мкс, максимальный разброс значений синхронизации приемника составлял -3 … +11 мкс.

На третьей паре узлов – на участке распространения сигнала между узлами М1 и М4 – профиль интенсивности многолучевого распространения, измеренный физическим уровнем ГА-модема узла М4, содержал 1 – 2 лучевых компонента (избыточная задержка распространения второго луча составляла 95 мкс). Уровень сигнала как сумма энергий всех лучей превышал уровень шума окружающей среды на 5 – 11 дБ. Показатель целостности сигнала лежал в пределах от 0.2 до 0.45. Доплеровское рассеивание сигнала находилось в пределах ±4 Гц. Оценка степени расхождения часов, полученная экспериментально по данным обмена синхронными срочными сообщениями между узлами М1 и М4 показала,

что часы физического уровня модема М4 «отстают» от часов физического уровня модема М1: на интервале измерений продолжительностью 979 с это отставание часов составило 618 мкс. Разброс времени синхронизации также характеризуется ненулевым средним и случайным рассеиванием. Среднее значение (-1.58 мкс), определяет скорость расхождения часов физического уровня модемов М1 и М4. Среднеквадратическое отклонение (0.84 мкс) определяет степень воздействия ГА-канала на точность регистрации принимаемого сигнала. В данном случае при СКО, равном 0.84 мкс, максимальный разброс значений синхронизации приемника составлял -2 … +4 мкс.

Как следует из сравнения показателей разброса времени регистрации принимаемого ГА-сигнала, значимым фактором является сложность профиля интенсивности многолучевого распространения. По сравнению с участками распространения М1 – М2 и М1 – М3 на участке М1 – М4 принимаемый сигнал представлен меньшим числом лучевых компонентов и, несмотря на сравнительно малое значение отношения сигнал/шум и сравнительно большое рассеивание по Доплеру, разброс времени регистрации принимаемого ГА-сигнала является наименьшим.

Более подробно изучение влияния ГА-канала, в частности определение количественной связи между обобщенными показателями сложности ГА-канала и точностью синхронизации приемника с поступающим ГА-сигналом, может быть представлено в следующей статье.

Выводы

Для устранения недостатков предыдущих способов синхронизации часов ГА-модемов в данной работе выполнена доработка модемов серии S2C с созданием специализированных режимов работы, обеспечивающих решение задачи точной синхронизации часов таких модемов по ГА-каналу, причем непосредственно в ходе обмена полезными данными.

Для упрощения разработки собственных алгоритмов синхронизации ГА-сетей для пользователя был создан набор АТ-команд, позволяющих запрашивать время поступления ГА-сигнала на прием и, в зависимости от режима, получать значение, содержащее момент синхронизации приемника с наиболее устойчивым (или первым значимым) лучевым компонентом принимаемого сигнала.

Использование синхронных срочных сообщений не требует выполнения трудоемкой процедуры начальной синхронизации, а также повторной синхронизации часов. При использовании синхронных срочных сообщений, точность начальной синхронизации при однократном обмене может быть уже достаточно высокой (например, как показано в разделе 2), несколько микросекунд. При появлении полезных данных последующее использование синхронных срочных сообщений может предполагать включение в состав передаваемых сообщений информации о детерминированной задержке ответа, а также о текущем показании часов модема-ответчика. На основании этих данных принимающий модем обеспечивается всеми необходимыми сведениями для досинхронизации собственных часов с часами ответчика, а также для обновления (уточнения) оценки степени расхождения часов непосредственно в ходе обмена полезными данными.

За счет создания специализированных режимов работы модема устраняются потери времени и энергии на выполнение отдельной процедуры синхронизации часов, повышается пропускная способность ГА-сети, устраняется необходимость разработки пользователем сложных программ синхронизации часов (в особенности, для работы в многолучевых ГА-каналах), обеспечивается удобная возможность досинхронизации часов взаимодействующих ГА-модемов во время обмена полезными данными между ними.

Работа выполнена при поддержке морской измерительной кампании CommsNet13 и проекта сотрудничества SUNRISE в рамках европейской программы FP7-IST-2013-10 FIRE, грант 611449. За оказанное содействие при проведении работ и обмене экспериментальными результатами авторы благодарны Центру морских исследований и экспериментов (CMRE, La Spezia) и лично доктору Джону Поттеру (John Potter), а также университету La Sapienza в Риме и лично доктору Роберто Петрочча (Roberto Petroccia).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Mills, David L.** Network Time Synchronization: the Network Time Protocol on Earth and in Space, second Edition, CRC Press 2011, 466 p.
2. **Eidson, John C.** Measurement, Control and Communication Using IEEE 1588. Springer Verlag London Limited 2006, ISBN 1-84628-250-0, 282 p.
3. **Elson, J., Estrin D**., Time Synchronization for Wireless Sensor Networks, in Proc. 15th Int. Parallel & Distributed Processing Symposium IPDPS '01, IEEE Computer Society, Washington, DC, 2001, p. 186. ISBN:0-7695-0990-8.
4. **Elson J., Girod L., Estrin D.** Fine-grained network time synchronization using reference broadcasts. ACM SIGOPS Operating Systems Review - OSDI '02: Proceedings of the 5th symposium on Operating systems design and implementation, vol. 36 issue SI, ACM, NY: 2002, pp. 147-163. DOI=10.1145/844128.844143.
5. **Ganeriwal S., Kumar R., Srivastava M. B**. Timing-sync protocol for sensor networks. In Proc. 1st Int. Conf. on Embedded networked sensor systems SenSys '03. ACM, New York, NY, USA, pp. 138-149. DOI=10.1145/958491.958508.
6. **Maróti M., Kusy B., Simon G., Lédeczi Á**. The flooding time synchronization protocol. In Proc. 2nd Int. Conf. on Embedded networked sensor systems SenSys '04. ACM, New York, NY, 2004, pp. 39-49. DOI=10.1145/1031495.1031501.
7. **Syed A.A.; Heidemann J.** Time Synchronization for High Latency Acoustic Networks. In Proc. 25th IEEE International Conference on Computer Communications INFOCOM 2006, pp.1-12, 2006, doi: 10.1109/INFOCOM.2006.161.
8. **Van Walree P. A.** Propagation effects in underwater acoustic communication channels. In Proc. UComms 2012, Sestri Levante, Italy, Sep 2012.
9. **Proakis J.G., Salehi M**. Digital Communications, McGraw-Hill, 5th ed., NY, 2007. 1150 p. ISBN-10:0072957166
10. **Pascal G**. Clock Synchronization Through Time-Variant Underwater Acoustic Channels. M.Sc. Thesis, Naval Postgraduate School, Monterey, CA, 2009, http://hdl.handle.net/10945/17368.
11. **Kebkal K.G., Bannasch R.**, Sweep-Spread Carrier for Underwater Communication over Acoustic Channels with Strong Multipath Propagation," J. Acoust. Soc. Am., 2002, vol. 112(5), pp. 2043 – 2052.
12. **Acoustic** Modems. Product Description, http://www.evologics.de/en/products/acoustics/index.html.
13. **TIA Standard:** Data Transmission Systems and Equipment - Serial Asynchronous Automatic Dialing and Control TIA/EIA-602-A. Telecommunications Industry Association, July 2000.
14. **Horauer M., Schmid U., Schossmaier K., Höller R., Kerö N. P**SyncUTC – Evaluation of a High Precision Time Synchronization Prototype System for Ethernet LANs. In Proc. 34th IEEE Precise Time and Time Interval Systems and Application Meeting (PTTI'02), Reston, Virginia, USA. December 2002, pp. 263-279.

15. **Kebkal O., Komar M., Kebkal K., Bannasch R.** D-MAC: Media access control architecture for underwater acoustic sensor networks. In Proc. Oceans'2011 OES/IEEE, 6-9 June 2011, Santander, Spain. DOI: 10.1109/Oceans-Spain.2011.6003586.
16. **Kebkal K.G., Bannasch R**. Process and system form information transfer. Patent No. US 6,628,724 B2, 2002.
17. **Kebkal K.G., Kebkal O.G, Bannasch R.** Synchronisation of Underwater Communication Receivers by Means of Swept Pulses. Proccedings of the 4th International Conference on Underwater Acoustic Measurements: Technologies and Results, Kos, Greece, 20– 24 June, 2011. – ISBN: 978-960-98883-5-6.

Abstract. Modern underwater acoustic (UWA) modems, besides receiving-transmitting data, can measure signal propagation time and evaluate the distance between the transmitter and the receiver. Such capabilities can be exploited for synchronization of UWA sensor networks, where sensing and actuation must be coordinated across multiple nodes, UWA positioning and navigation of autonomous underwater vehicles. However, such problem as the accuracy of propagation time measurement, especially in highly reverberant environment, as well as the evaluation of clock skew on interacting modems, have been investigated rather poorly. One of the objectives consists in experimental evaluation of the precision of propagation time measurements between UWA modems communicating in reverberant environments (Fig.5), as well as in demonstration of the modems built-in tools providing opportunities for precise estimation of the modems clock skews (Fig.6). Another objective is to demonstrate a "comfortable" way for clock synchronization of UWA network nodes directly during payload data exchange (Fig.1). Experiments were carried out during CommsNet13 sea trials, CMRE, La Spezia.

Key words: digital sonar communication, digital sonar networks, underwater sensor networks, synchronization in sonar channel

Материал поступил 12.05.14