

ГИДРОАКУСТИЧЕСКИЕ МОДЕМЫ С ИНТЕГРИРОВАННЫМИ ЦЕЗИЕВЫМИ ЧАСАМИ ДЛЯ ЗАДАЧ ПОДВОДНОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ АВТОНОМНЫХ НЕОБИТАЕМЫХ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ

К.Г. Кебкал¹, А.Г. Кебкал¹, Е.В. Глушко¹, В.К. Кебкал¹,
Л. Себастьяно², А. Паскоаль², Дж. Рибейро²,
Г. Сильва², М. Рибейро², Дж. Индивери³

Evologics GmbH¹
Центр высших учебных заведений
по исследованиям и разработкам в робототехнике²
Университет Саленто,
Департамент инновационного инжиниринга³

Точная временная синхронизация узлов цифровой (сенсорной) гидроакустической сети является необходимой предпосылкой для эффективного использования информации, получаемой разнообразными подводными сенсорами, распределенными в обширной акватории моря. Одной из наиболее сложных задач является синхронизация мобильных узлов гидроакустической сети, например, в составе группы автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА), выполняющих совместные согласованные действия.

В статье представлены результаты экспериментов по позиционированию АНПА с использованием гидроакустического модема, оснащенного миниатюрными цезиевыми часами (chip-scale clock, CSAC) и способного оценивать задержки (дальности) распространения гидроакустического сигнала от геопривязанных источников этих сигналов.

Представлены экспериментальные результаты по точности работы миниатюрных цезиевых часов в различных ситуациях имеющих практический интерес, экспериментальные результаты по точности позиционирования АНПА с использованием гидроакустических модемов с интегрированными цезиевыми часами, а также практические рекомендации по «дисциплинированию» CSAC и их фазовой синхронизации с источником хронометрических сигналов.

ВВЕДЕНИЕ

Один из наиболее перспективных методов точной синхронизации АНПА состоит в использовании часов с малым дрейфом, способных генерировать точные отсчеты времени при выполнении продолжительной миссии АНПА в автономном режиме.

При использовании часов с малым дрейфом позиционирование АНПА может быть выполнено путем измерения времени (дальности) распространения гидроакустических (г/а) сигналов в одном направлении от нескольких геопривязанных источников до приемника сигналов. Поскольку современные АНПА обычно оснащаются средствами цифровой г/а связи [1], задачу оценки времени (дальности) распространения сигнала можно возложить на г/а модем.

Г/а модем, оснащенный на стороне приемника точными часами (изначально синхронизированными с часами источника хронометрических сигналов) и

принимающий в составе пакета данных информацию о времени передачи сигнала источником, способен оценивать время распространения г/а сигнала в среде распространения и пересчитывать его через известную скорость звука в дальность. При использовании нескольких разнесенных в пространстве геопривязанных источников, передающих данные о своих географических координатах и времени передачи, принимающий г/а модем получает достаточно сведений для оценки своего географического положения (координат и глубины).

Особенность модели г/а модема, использованного в экспериментах, состояла в наличии интегрированных в его электронику миниатюрных цезиевых часов (chip-scale clock, CSAC) и соответствующих функций, которые позволяли оценивать дальности

¹ 13355, Germany, Berlin Ackerstrasse, 76. E-mail: kebkal@evologics.de

² 1049-001, Portugal, Lisboa, Av. Rovisco Pais, 1, Torre Norte – ISR.

³ 73100, Italy Lecce, Via per Monteroni.

до геопривязанных источников по задержке распространения сигналов, передаваемых источниками в направлении АНПА. Это обуславливало для АНПА возможность определения своего местоположения в режиме «гидроакустического молчания». Поскольку необходимость двунаправленного обмена сигналами исключалась, решение задачи позиционирования АНПА приобретало такие преимущества, как сокращение цикла позиционирования, а также возможность масштабирования группы АНПА до произвольно больших размеров без удлинения периода оценивания текущей позиции каждым из аппаратов.

В отличие от рассматриваемого решения задачи позиционирования, основанной на двунаправленном обмене пакетами данных между геопривязанными источниками сигналов и АНПА [2], дополнительные преимущества решения состояли в возможности избежать перегрузок г/а канала из-за вынужденно высокой акустической активности множества г/а модемов, а также в энергоэффективности решения, минимизации акустического воздействия на морскую среду (минимизации «акустического загрязнения») и, соответственно, скрытности работы АНПА.

В следующих разделах статьи обоснован выбор типа цезиевых часов, выполнено исследование их характеристик в различных режимах работы, приведены данные о результатах интеграции цезиевых часов в состав аппаратной платформы г/а модема, а также представлены результаты экспериментов с позиционированием АНПА с помощью г/а модемов, оснащенных цезиевыми часами.

Используя терминологию, принятую для описания цифровых г/а сетей, г/а модемы, оснащенные функциями управления доступом к среде и функциями маршрутизации, называются в статье «узлами». Для геопривязанного источника сигнала используется наименование «узел антенны». Для получателя сигнала на объекте позиционирования (АНПА) используется наименование «узел позиционирования».

В качестве АНПА в экспериментах использовались три вида: «Medusa» производства IST, Португалия (рис. 1, а), «Manta» производства Evologics, Гер-

мания (рис. 1, б), и «Folaga» производства Graaltech, Италия (рис. 1, в).

Поскольку АНПА обычно оснащается датчиком давления (глубины), для решения задачи позиционирования АНПА может быть достаточным использование двух узлов антенны. При этом неоднозначность оценки положения узла позиционирования может разрешаться за счет задания априорной информации о полупространстве расположения АНПА по отношению к плоскости/линии, соединяющей узлы антенны, или за счет учета доплеровских сдвигов принимаемого сигнала.

1. Миниатюрные цезиевые часы для интеграции в вычислительную платформу г/а модема

Результаты, приведенные ниже, получены в ходе работ в рамках европейского проекта WiMUST (Widely scalable Mobile Underwater Sonar Technology – масштабируемая технология подводного акустического зондирования на мобильных носителях) [3]. Цель проекта состоит в разработке инновативной системы геотехнической съемки с использованием морских роботов, оснащенных г/а источниками зондирующих сигналов и сейсмокосами, буксируемыми в толще воды, преимущественно у дна. В этом контексте важным требованием к системе является высокая точность оценки положения АНПА, причем точное позиционирование должно выполняться в режиме г/а молчания. В частности, спецификация системы WiMUST допускает рассогласование часов АНПА не более чем на 50 мкс на протяжении автономной миссии длительностью в 8 часов. Также спецификация содержит требование о малых размерах и массе часов, о низком энергопотреблении, невысокой стоимости и коммерческой доступности.

Г/а позиционирование АНПА в этом проекте основано на применении г/а модемов, построенных на технологии S2C (Sweep-Spread Carrier technology [4]). Для минимизации занимаемого



Рис. 1. АНПА, использованные в экспериментах

пространства цезиевые часы интегрировались на вычислительной платформе г/а модема, но при этом обеспечивали интерфейс для распределения хронометрических импульсов другим модулям АНПА.

В настоящее время на общедоступном коммерческом рынке малогабаритные цезиевые часы представлены единственной моделью, которая по своим основным характеристикам удовлетворяет требованиям спецификации проекта WiMUST: модель Microsemi SA.45s Chip Scale Atomic Clock (CSAC) [5]. Согласно описанию, устройство имеет на три порядка более высокую точность, чем осциллятор OCXOs [6], и на два порядка более высокую, чем осциллятор TCXOs [7, 8], оно потребляет менее 120 мВт, имеет массу 35 г и занимает объем не более 16,5 см³. Устройство обеспечивает доступ к меандру 10 МГц и сигналам 1PPS на стандартных уровнях CMOS с кратковременной стабильностью (отклонением Аллана) около $3 \cdot 10^{-10}$ ppm за 1 с. Дрейф из-за долгосрочного старения увеличивается не более чем на $9 \cdot 10^{-9}$ ppm в месяц, а в широком диапазоне температур (10°C – 70°C) максимальное изменение частоты составляет $\pm 5 \cdot 10^{-10}$ ppm. CSAC способен принимать на вход эталонный сигнал 1PPS (например, хронометрический сигнал GPS-приемника), который может использоваться для синхронизации выхода 1PPS цезиевых часов с точностью ± 10 нс.

Чтобы убедиться, что заявленные точности цезиевых часов достижимы в практических условиях работы разрабатываемой системы WiMUST или, по крайней мере, обеспечивают требуемую спецификацией точность работы, была проведена серия тестов с CSAC во время и после их интеграции в электронику г/а модема. Кроме того была проведена аналогичная процедура после установки г/а модемов в АНПА для работы в море (с определением точности временной синхронизации АНПА и определением точности оценивания местоположения АНПА).

2. Исследование основных характеристик цезиевых часов (дисциплинирование и синхронизация)

Каждый экземпляр цезиевых часов характеризуется индивидуальным дрейфом частоты осциллятора, в основном вследствие старения и повторного включения/выключения [9]. Поэтому даже в случае идеальной начальной синхронизации фаз хронометрических сигналов нескольких цезиевых часов их различные дрейфы будут обуславливать возрастающую рассинхронизацию генерируемых ими хронометрических сигналов на выходе 1PPS. Эта особенность

обусловлена небольшими различиями материала и, соответственно, некоторыми различиями частот колебаний (для CSAC это порядка 10^{-7} – 10^{-8} %). Эти различия могут быть скорректированы путем индивидуальной регулировки частоты генератора цезиевых часов по отношению к внешнему источнику эталонных хронометрических сигналов, в частности, сигналов с выхода 1PPS приемника GPS. Процесс корректировки называется дисциплинированием.

Обычно приемники GPS способны поддерживать высокую точность работы своих встроенных часов, чтобы с высокой точностью вычислять собственные географические координаты (внутренние часы GPS-приемников постоянно синхронизируются со временем GPS для удовлетворения требований по точности позиционирования). Они могут демонстрировать кратковременный шум – относительно большой разброс в периодичности формирования хронометрического сигнала на коротком промежутке времени, однако на длительном интервале времени усреднение по периоду формирования хронометрического сигнала (на выходе 1PPS) обычно дает устойчивое значение, равное одной секунде [10].

В ходе экспериментов выполнена экспериментальная оценка достаточного интервала усреднения кратковременного шума на выходе 1PPS приемника GPS – постоянной времени дисциплинирования, по крайней мере, для часто используемых (общедоступных) коммерческих моделей приемников GPS. Другой величиной, которая оценивалась в ходе экспериментов, была погрешность фазовой синхронизации хронометрических сигналов на выходе 1PPS приемника GPS и выходе 1PPS цезиевых часов. На основании этой величины устанавливался порог допустимой рассинхронизации цезиевых часов и часов приемника GPS, по достижении которого (на интервале постоянной времени дисциплинирования) процедура дисциплинирования цезиевых часов считалась успешно завершённой [9].

Ниже представлены экспериментальные результаты дисциплинирования цезиевых часов в различных сценариях. В составе экспериментальной установки использовались:

- два модуля цезиевых часов CSAC SA.45;
- два типа GPS-приемников: Sparkfun Venus с антенной JavaD GrAnt и Ashtech MB100 с антенной Hemisphere A21;
- две индивидуальные батареи 12 В;
- компьютер Panasonic CF31 с ОС Debian Linux, USB-концентратор, кабели.

Схематичное представление соответствующего оборудования приведено на рис. 2. Каждый GPS-

приемник может работать независимо от любого другого, генерируя на выходе 1PPS хронометрические сигналы, которые могут использоваться для независимого дисциплинирования и фазовой синхронизации множества цезиевых часов. Это обстоятельство может быть использовано и для выполнения процедуры одновременного дисциплинирования множества часов, подключенных к собственным приемникам GPS, например, перед началом автономной миссии, пока АНПА находятся на поверхности. Одновременное независимое дисциплинирование двух цезиевых часов было смоделировано и протестировано.

В экспериментах использовался вычислитель на основе Arduino для измерения разности фаз между сигналами на выходе 1PPS CSAC и на выходе 1PPS GPS-приемника во время и после дисциплинирования.

Экспериментальная установка использовалась для трех основных целей: дисциплинирования атомных часов с использованием разных приемников GPS, для синхронизации фазы сигнала 1PPS цезиевых часов с фазой сигнала 1PPS GPS, а также для имитации многочасовой автономной миссии работы цезиевых часов после их дисциплинирования и фазовой синхронизации.

Все данные с выходов CSAC, GPS и вычислителя Arduino регистрировались и использовались для дальнейшего анализа. На рис. 3 и 4 показаны изменения параметра дисциплинирования (steer) и расхождения фаз (phase) сигналов на выходах 1PPS цезиевых часов в процессе дисциплинирования: при использовании хронометрических сигналов Sparkfun Venus GPS (рис. 3) и Ashtech MB100 GPS (рис. 4).

В целом на выходе 1PPS приемника GPS Sparkfun Venus шум был заметно более значимым, чем на выходе 1PPS приемника GPS Ashtech.

В ряде тестов оказалось, что заявленный в документации на CSAC порог допустимой рассинхронизации величиной в 20 нс (был установлен производителем «по умолчанию») может не достигаться, и,

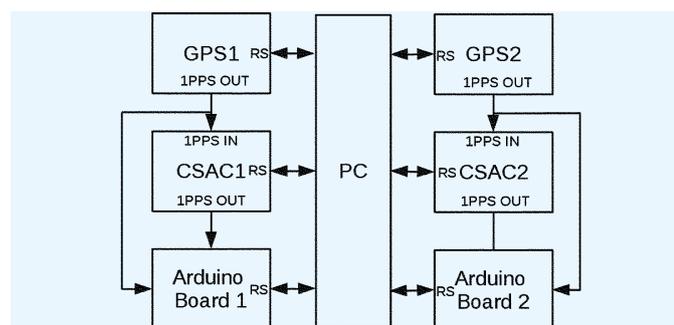


Рис. 2. Схематическое представление оборудования для исследования процедуры дисциплинирования и фазовой синхронизации цезиевых часов

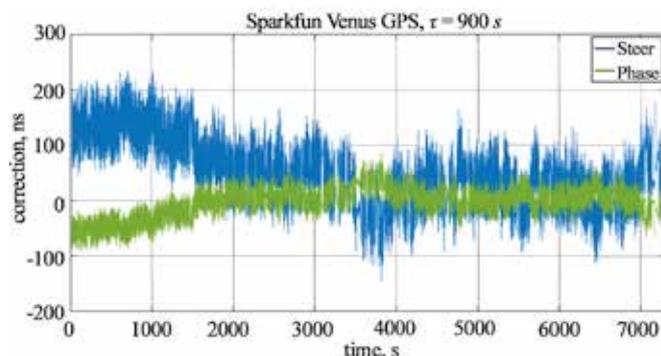


Рис. 3. Процесс дисциплинирования CSAC с использованием хронометрических сигналов на выходе GPS-приемника Sparkfun

соответственно, успешное завершение процедуры дисциплинирования часов может никогда не наступать. Для различных GPS-приемников существование шума на выходе 1PPS может отличаться в разы. Фактически разность фаз сигналов на выходе 1PPS приемника GPS и выходе 1PPS цезиевых часов в течение постоянной времени дисциплинирования может никогда не снижаться ниже уровней 30–40 нс. (Это обстоятельство в ходе переписки с производителем CSAC обусловило внесение в интерфейс цезиевых часов дополнительных команд, обеспечивающих возможность изменения порога допустимой фазовой рассинхронизации до любого приемлемого уровня).

Для множества практических задач приемлемыми величинами погрешности начальной фазовой синхронизации могут быть несколько большие значения, чем 20 нс.

Например, наблюдаемые в экспериментах шумы на выходах 1PPS различных коммерческих GPS-приемников обуславливали погрешности начальной фазовой синхронизации около 30–40 нс (по среднеквадратическому отклонению). Однако такие значения вполне приемлемы для начала автономной миссии АНПА в составе системы WiMUST. Для настройки порога (и ряда других параметров) перед началом процедуры дисциплинирования была

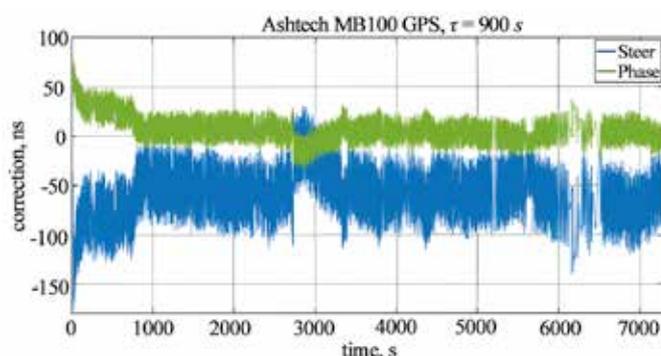


Рис. 4. Процесс дисциплинирования CSAC с использованием хронометрических сигналов на выходе GPS-приемника Ashtech

разработана специальная программная утилита. Порог 30 нс был настроен как одно из рекомендуемых значений и использовался позднее в ходе морских испытаний. Обычно в течение 20–30 минут результаты дисциплинирования и фазовой синхронизации достигали приемлемых значений для начала автономной работы цезиевых часов с точностью, требуемой в системе WiMUST. По завершении процедуры дисциплинирования CSAC результаты – параметр дисциплинирования (steer) и поправка фазы (phase) – с помощью разработанной утилиты сохранялись в энергонезависимой памяти часов.

При проведении многократных экспериментов с цезиевыми часами после их дисциплинирования с погрешностью начальной фазовой синхронизации 30 нс работа в автономном режиме в течение восьми часов завершалась рассинхронизацией часов на 3–5 мкс.

Однако при рассмотрении продолжительных интервалов времени (прошедших после дисциплинирования) так называемый эффект «старения» (aging) настроек часов приводил к ухудшению точности их работы. Например, через месяц после дисциплинирования цезиевые часы оказывалось уже недостаточно точными для задач, выполняемых системой WiMUST. Дрейф цезиевых часов достигал десятков микросекунд в час.

Кроме того, включением/выключением CSAC была обусловлена дополнительная погрешность – погрешность «обратного хода» (retrace) – сдвиг частоты осциллятора, приводящий к дрейфу фазы хронометрического сигнала на выходе 1PPS. Многократное включение/выключение CSAC могло приводить к накоплению погрешностей – дальнейшему увеличению сдвига частоты осциллятора. Заявленное значение retrace указывает на возможный дрейф часов до $\pm 5 \cdot 10^{-10}$ за 48 часов. В соответствии с информацией изготовителя цезиевые часы после многократных включений/выключений могут расходиться с эталонными часами примерно на 30 мкс за 8 часов (наихудший случай).

Фактически в экспериментах с цезиевыми часами в результате их включения/выключения сразу после завершения процедуры дисциплинирования (выключения на несколько минут) дрейф между 1PPS цезиевых часов и 1PPS GPS-приемника достигал 6 мс на интервале автономной работы продолжительностью 8 часов.

Таким образом, погрешность старения и погрешность «обратного хода» оказывают значимое влияние на точность работы цезиевых часов. В соответствии с этим цезиевые часы следует дисциплинировать как

можно более часто. После дисциплинирования их не следует выключать до начала автономной работы.

Конечно, поддержание группы АНПА в постоянной готовности к развертыванию может быть затратным, а нахождение цезиевых часов под питанием в течение длительного периода времени (месяцы) может оказаться непрактичным.

Поэтому одна из альтернатив может состоять в установлении регламента, при котором цезиевые часы проходили бы периодическое дисциплинирование, так чтобы в начале автономной миссии достаточно было бы выполнить лишь фазовую синхронизацию часов (с внешним источником хронометрических сигналов 1PPS, без повторного дисциплинирования). Однако для установления регламента необходимо было определиться с периодичностью дисциплинирования, чтобы исключить чрезмерное старение настроек часов и, соответственно, снижение точности синхронизации до недопустимых величин в период их автономной работы.

Другая альтернатива может состоять в установлении такого регламента, при котором цезиевые часы также проходили бы периодическое дисциплинирование. Однако при этом необходимо предусмотреть, чтобы в начале автономной миссии достаточно было бы выполнить только фазовую синхронизацию часов с непродолжительным дисциплинированием (для частичной компенсации эффекта старения настроек часов).

Оба варианта могут быть приемлемыми для множества задач. Основываясь на требованиях спецификации к системе WiMUST, при проведении экспериментов было установлено, что для цезиевых часов CSAC SA.45 предпочтительной является вторая альтернатива. В частности, при дисциплинировании часов каждые три недели (без многократного промежуточного выключения/выключения) достаточно производить уточнение устаревших настроек параметра steer и более точную синхронизацию фазы хронометрического сигнала 1PPS. Тогда перед началом автономной миссии достаточно осуществлять дисциплинирование в течение 300–600 с. В экспериментах после начала автономной работы цезиевых часов на протяжении 8 часов их рассинхронизация не превышала 40–50 мкс.

По результатам исследований такой регламент был рекомендован для практического применения в системе WiMUST. Также аналогичный регламент с непродолжительным дисциплинированием цезиевых часов может быть приемлемым и для множества других приложений. Нахождение АНПА на поверхности моря в течение минут с включенным GPS для подго-

товки миссии не является необычным. При этом действия, связанные с дисциплинированием и синхронизацией часов, параллельно с другими действиями по подготовке АНПА к погружению (обычно посредством удаленного доступа) вряд ли будут приводить в дополнительному расходованию судового времени на подготовку миссии.

Следует отметить, что значение постоянной времени дисциплинирования может отличаться для различных партий цезиевых часов и моделей приемников GPS. В связи с этим в состав программной утилиты для настройки цезиевых часов были включены дополнительные возможности:

а) установки постоянной дисциплинирования и фазовой синхронизации;

б) настройки порога допустимой рассинхронизации фазы для автоматического принятия решения об успешном завершении процесса дисциплинирования;

в) графические отображения процесса дисциплинирования;

г) возможность прерывать запущенный процесс с сохранением текущих параметров *steer* и *phase*. (При графическом отображении процесса оператор может принять решение о том, что параметры *steer* и *phase* достигли достаточно точных значений для его текущей задачи, и процесс дисциплинирования и фазовой синхронизации часов может быть принудительно завершен, а текущие параметры дисциплинирования/синхронизации сохранены).

3. Интеграция цезиевых часов в электронику г/а модема

На рис. 5, а представлена электроника стандартного модема модели S2CM18/34 OEM. Для интеграции цезиевых часов были учтены геометрические ограничения отсека АНПА (рис. 5, б – отсек АНПА "Medusa"). На рис. 6 представлена электроника г/а модема S2CM18/34 OEM с интегрированными цезиевыми часами. После интеграции точность работы цезиевых часов измерялась в ряде испытаний в лаборатории и в ходе морских испытаний (с использованием в качестве носителя АНПА «Manta» производства Evologics, Германия, рис. 1, б). Основным результатом состоял в том, что после дисциплинирования и фазовой синхронизации часов с порогом погрешности 30 нс при постоянной времени дисциплинирования 600 с рассинхронизация хронометрического сигнала цезиевых часов 1PPS часов (по отношению к сигналу 1PPS GPS-приемника) не превышала 20 мс после 3–5 ч автономной миссии, т.е. результаты синхронизации

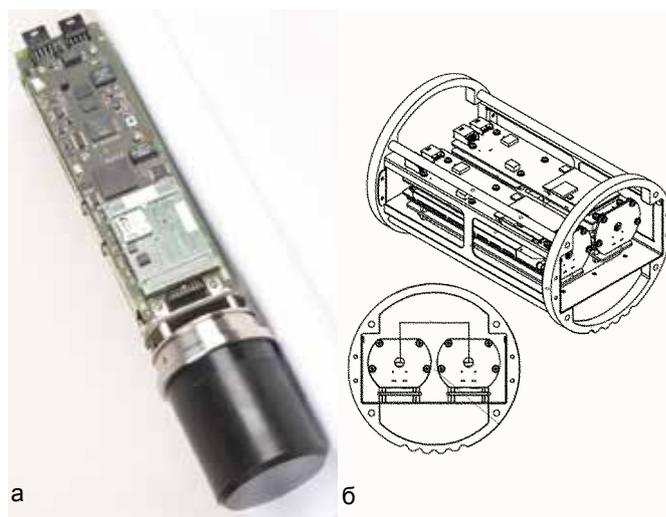


Рис. 5. Электроника г/а модема S2CM18/34OEM: а – фотография модема до интеграции CSAC; б – модель отсека АНПА с размещением двух модемов: S2CM18/34 OEM и S2CM42/65 OEM

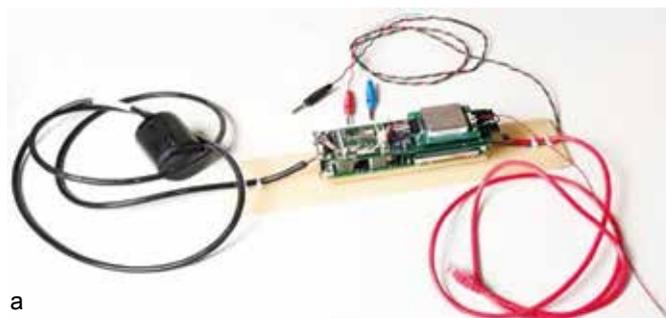


Рис. 6. Электроника г/а модема S2CM18/34OEM: а – фотография модема со всеми компонентами, включая SCAC SA.4s; б – размещение модуля цезиевых часов на плате вычислителя г/а модема

совпадали с результатами лабораторных испытаний на стенде (рис. 2). Прогнозная точность позиционирования АНПА при их длительной автономной работе (несколько часов) составляла порядка единиц сантиметров.

Фактические оценки погрешностей позиционирования определялись в ходе морских испытаний с несколькими АНПА, имитирующими совместную миссию. Результаты морских испытаний представлены в следующем разделе.

4. Экспериментальные результаты позиционирования АНПА посредством г/а модема с цезиевыми часами

Одна из основных целей интеграции цезиевых часов в электронику г/а модема заключалась в достижении точного позиционирования (навигации) АНПА при выполнении совместных операций в составе масштабируемой по размеру группы. Это обстоятельство обуславливало необходимость позиционирования АНПА в режиме г/а молчания. Морские эксперименты по позиционированию АНПА посредством г/а модемов с интегрированными цезиевыми часами были проведены в декабре 2016 г. в окрестности г. Синеш, Португалия.

В этих экспериментах использовались двухкорпусные АНПА «Medusa» (рис. 7) производства IST, Португалия. АНПА находились в полупогруженном состоянии – нижний корпус с г/а модемом находился под водой (заглубление г/а модема – около 0,5 м), а верхний корпус – на уровне воды. Благодаря такому расположению антенна GPS на стойке на верхнем корпусе всегда находилось над водой на высоте около 25 см, обеспечивая возможность сравнения данных, полученных с помощью г/а позиционирования, с данными, полученными с помощью GPS RTK.

Условия работы: спокойное море – волнение 1 балл, ветер 2–3 м/с. Скорость движения геопривязанных источников и АНПА не превышала 1,0 м/с.

В экспериментах использовались два геопривязанных «узла антенны», которые с помощью г/а модемов поочередно передавали свои координаты и временные метки в направлении АНПА, выполняющих роль объектов позиционирования («узлов позиционирования»).

Узлы позиционирования (г/а модемы АНПА), будучи синхронизированными по времени с узлами антенны (г/а модемами на геопривязанных источниках сигналов), принимали координаты и временные метки и на основании полученных данных оценивали

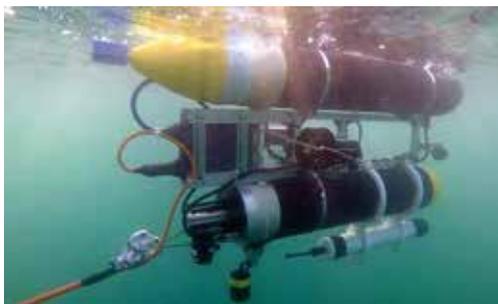


Рис. 7. АНПА «Medusa» в полупогруженном состоянии (внизу – приемопередатчик г/а модема)

свои географические координаты. Для оценки точности г/а позиционирования эти координаты сравнивались с координатами, получаемыми с помощью GPS RTK в момент приема г/а сигнала.

На рис. 8 показан порядок приема сигналов АНПА во время движения по прямой. Для простоты последовательные моменты времени представлены целыми безразмерными числами. Геопривязанные узлы антенны обозначены как ASV_1 и ASV_2 (ASV – аббревиатура для автономного плавсредства на поверхности). Узел позиционирования (АНПА в качестве объекта позиционирования) обозначен как AUV . Поскольку все аппараты имели доступ к GPS RTK, ASV_1 и ASV_2 передавали пакеты данных со своими координатами посредством г/а модема в направлении AUV . По этим данным AUV оценивал задержки (и соответственно дальности) распространения г/а сигналов от ASV_1 и ASV_2 . Используя дополнительно данные о глубине, аппарат оценивал собственное географическое местоположение.

В частности, в момент времени $t = 1$ AUV принимал данные $p'_{1,1}$ о местоположении ASV_1 и оценивал дальность r_1 до ASV_1 . Спустя некоторое время в момент $t = 2$ AUV перемещался на некоторое расстояние d_1 и принимал данные $p'_{2,2}$ о местоположении ASV_2 и оценивал дальность r_2 до ASV_2 . Таким образом, во время движения AUV получал набор n измерений с оценками расстояний r_1, r_2, \dots, r_n , полученных в моменты времени t_1, t_2, \dots, t_n , в точках $p_{1,1}, p_{1,2}, \dots, p_{1,n}$ соответственно.

Оценки дальностей $r_{[1:n]}$ сравнивались с дальностями, соответствующими координатам $p'_{[1:n]}$ и $p_{[1:n]}$, поступающими на AUV с приёмников GPS в моменты времени t_1, t_2, \dots, t_n и на ASV_1 и ASV_2 моменты передачи ими данных о своем местоположении.

Точное измерение времени по цезиевым часам обеспечивало не только функцию точной оценки задержки распространения г/а сигнала. Г/а модем был оснащен также физическим интерфейсом, обеспечи-

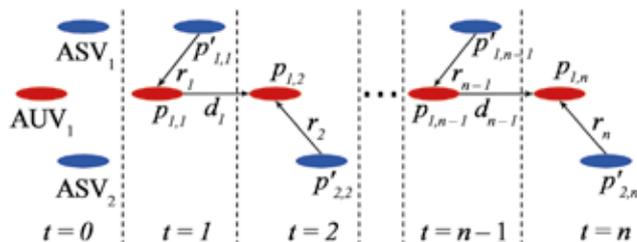


Рис. 8. Иллюстрация концепции позиционирования АНПА с помощью г/а модемов с интегрированными цезиевыми часами (позиционирование в режиме г/а молчания)

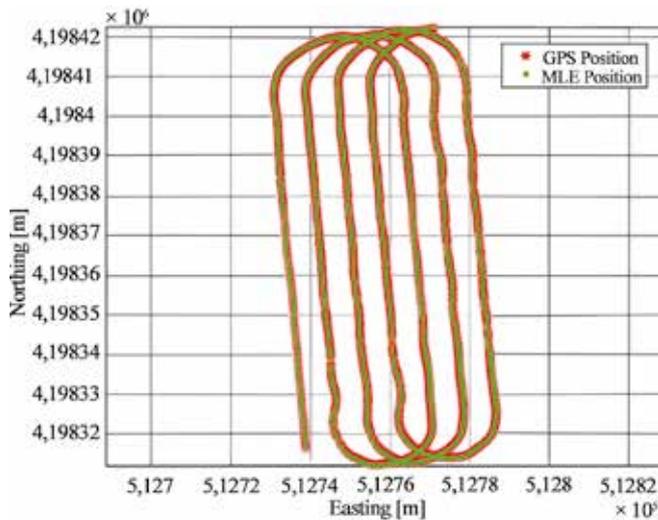


Рис. 9. Траектория движения АНПА в тесте на точность его позиционирования с помощью данных от г/а модема

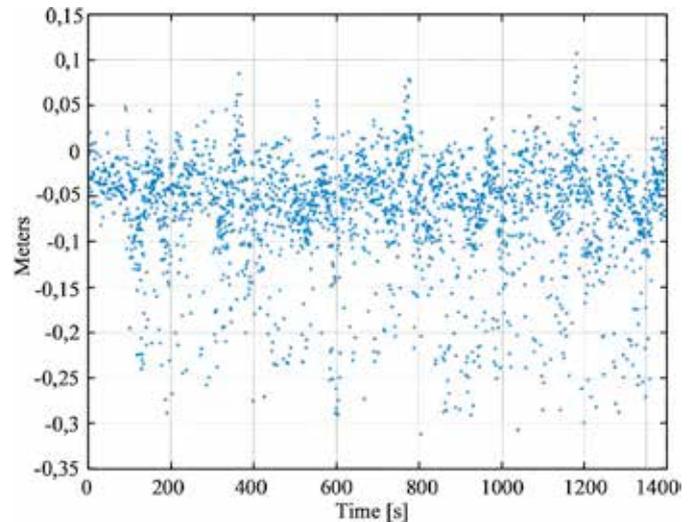


Рис. 10. Разность в оценке дальности от АНПА до поверхностного источника сигнала, измеренная с помощью г/а модема и GPS-приемника

вающим предоставление хронометрических сигналов другим устройствам АНПА, в частности бортовому компьютеру АНПА и системе сбора сенсорных данных. Набор данных от инерциальных сенсоров, микромеханической курсоверткали использовались для моделирования движения АНПА (так называемой одометрии), что могло быть использовано для дальнейшего повышения точности позиционирования/навигации АНПА. В данных тестах, однако, наибольший интерес представляла только возможность независимого от одометрии позиционирования/навигации АНПА с помощью г/а модема (рис. 9).

ASV_1 и ASV_2 имели доступ к источнику точного времени непосредственно от GPS-приемника и использовали выход 1PPS для получения хронометрических сигналов. (Именно сценарий использования двух-трех геопривязанных источников сигналов на борту поверхностных плавсредств предусмотрен в системе WiMUST). Точная оценка местоположения ASV_1 и ASV_2 выполнялась непосредственно с помощью GPS, работающего в режиме RTK.

На рис. 9 представлена траектория движения АНПА во время морских экспериментов, полученная с помощью GPS (зеленым цветом указана траектория АНПА с помощью оценки максимального правдоподобия). Результат использования цезиевых часов для позиционирования АНПА с помощью г/а сигналов представлен на рис. 10 в виде разностей в оценках дальностей от АНПА до поверхностных источников сигнала по данным, получаемым от г/а модема АНПА, и по данным от его GPS-приемника. Поскольку позиционирование с помощью GPS RTK можно считать точным (погрешность – несколько

сантиметров), данные на рис. 10 дают представление о размере погрешности позиционирования АНПА по данным г/а модема.

Как следует из рис. 10, среднее значение разностей составляет 4 см. Ненулевое среднее обусловливается неточным учетом изменений в скорости звука в воде (с течением времени и при изменении местоположения). Стандартное отклонение не превышает 9 см. По сути, стандартное отклонение является оценкой точности позиционирования АНПА с помощью данных г/а модема. Следует, однако, отметить, что реальная погрешность позиционирования может быть меньше. Дело в том, что нижний корпус АНПА «Medusa» с закрепленным на нем г/а модемом находился под водой, а верхний корпус с закрепленным на стойке приёмником GPS – на поверхности воды. Из-за качки АНПА «плечо» между точкой размещения GPS и точкой размещения модема варьировалось. Отсутствие компенсации длины плеча (посредством учета крена и дифферента) приводило к некоторой погрешности определения местоположения г/а модема.

Таким образом, фактически измеренное стандартное отклонение (9 см) характеризует не только собственно погрешность позиционирования по данным г/а модема с цезиевыми часами, но, скорее, сумму нескольких погрешностей: позиционирования АНПА по данным г/а модема, позиционирования АНПА по данным GPS RTK, а также погрешность из-за варьирования плеча между закрепленными на АНПА приёмником GPS и г/а модемом.

Очевидно, в последующих тестах следует ввести возможность учета крена и дифферента АНПА в момент передачи г/а модемом данных о местоположении GPS. Тем не менее измеренное стандартное

отклонение 9 см говорит в пользу высокой точности определения местоположения по данным г/а модема – точности порядка сантиметров, т.е. сравнимой с GPS RTK (по крайней мере, для дальностей работы устройств в составе системы WiMUST, т.е. порядка сотен метров).

Дрейф цезиевых часов на всем интервале изменений составил около 2,5 мкс в час, что согласуется с данными лабораторных испытаний и удовлетворяют требованиям системы WiMUST.

ВЫВОДЫ

Миниатюрные цезиевые часы CSAC SA.45 успешно интегрированы в электронику г/а модема, заменяя собой обычно используемые кварцевые часы и обеспечивая дополнительные функциональные возможности г/а модемов. В частности, в качестве средства позиционирования/навигации АНПА в режиме г/а молчания с высокой точностью, а также в качестве источника хронометрических сигналов 1PPS для других устройств АНПА.

В результате лабораторных экспериментов выработаны практические рекомендации по регламентному обслуживанию и подготовке цезиевых часов к автономной миссии. В частности, при дисциплинировании часов каждые три недели (без их многократного промежуточного выключения/выключения) кратковременное дисциплинирование в течение 300–600 с оказывается достаточным для уточнения

устаревающих настроек часов. Тогда во время автономной миссии на протяжении 8 часов их рассинхронизация не превышает 40–50 мкс.

Экспериментальные результаты позволяют оценить точность позиционирования АНПА с использованием г/а модемов S2CR18/34OEM с интегрированными цезиевыми часами CSAC SA.45. Показана возможность позиционирования/навигации АНПА в режиме «гидроакустического молчания» с точностью сантиметрового диапазона (по среднеквадратическому значению) в течение получасовой миссии при приблизительной оценке дрейфа цезиевых часов около 2,5 мкс в час. Этот результат отвечает требованиям системы WiMUST и открывает путь для решения множества практических задач, требующих применения больших (масштабируемых) групп АНПА в течение многочасовых автономных миссий.

Работа выполнена в рамках европейского проекта шифр WiMUST, грант № 645141, программа H2020-ICT-2014-1. Проведенное исследование стало возможным благодаря совместным усилиям партнеров по проекту WiMUST: Межвузовского центра интегрированных систем для морской среды (ISME, Италия), Центра высших учебных заведений по исследованиям и разработкам в робототехнике (IST-ID, Португалия), Центра исследований и технологий Альгарва (CINTAL, Португалия), Высшей школы компьютерных наук университета Хартфордшир, компаний CGG, Франция, Evologics, Германия, Geo Marine Survey Systems, Португалия, Geosurveys, Нидерланды и Graal Tech, Италия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кебкэл К.Г., Кебкэл В.К., Кебкэл А.Г. Цифровые гидроакустические сети для связи в условиях длительных задержек и разрывов соединения: экспериментальное исследование // Подводные исследования и робототехника. 2015. № 2 (20). С. 12–19.
2. Кебкэл К.Г., Кебкэл А.Г., Кебкэл В.К., Себастьяо Л., Паскоаль А., Рибейро Дж., Индивери Дж., Келхолт Э., Джизус С., Мантуока А. Оценка производительности двухканальной цифровой гидроакустической связи на фоне импульсных помех излучающего спаркера // Подводные исследования и робототехника. 2018. № 1 (25). С. 4–11.
3. Antonelli G., Caffaz A., Casalino G., Pollini L. The Widely scalable Mobile Underwater Sonar Technology (WiMUST) H2020 project: First year status // Proc. of OCEANS 2016. Shanghai, China, 2016. DOI: 10.1109/OCEANSAP.2016.7485587.
4. Кебкэл К., Bannasch R. Sweep-spread carrier for underwater communication over acoustic channels with strong multipath propagation // J. Ac. Soc. America. 2002. Vol. 112 (5). P. 2043–2052.
5. Lutwak R. et. al. The Chip-Scale Atomic Clock – Coherent Population Trapping vs. Conventional Interrogation // Proc. of 34th Annual Precise Time and Time Interval Systems and Applications Meeting (3–5 Dec.). Reston, VA, 2002. P. 539–550.
6. Poddar A.K., Ulrich L.R. Techniques minimize the phase noise in crystal oscillator circuits // IEEE Int. Symp. on Frequency Control (FCS) (20–24 May). Baltimore, Maryland, 2012.
7. Ulrich L.R., Poddar A.K., Apte A.M. Getting Its Measure: Oscillator Phase Noise Measurement Techniques and Limitations // IEEE Microwave Magazine. 2013. Vol. 14, Iss. 6.
8. Stofanik V., Sam A.E., Balaz I., Minarik M. Direct Digital Synthesizer Clock Frequency Versus Temperature Dependency Compensation Using Two Look-Up Tables // Proc. of the 2004 IEEE Joint 50th Anniversary Conference UFFC (24–27 Aug). Montreal, Canada, 2004. P. 770–774.
9. Gardner A.T., Collins J.A. A second look at Chip Scale Atomic Clocks for long term precision timing // OCEANS 2016 MTS/IEEE. Monterey, CA, 2016. P. 1–9.
10. Ingram David M.E. Assessment of precision timing and real-time data networks for digital substation automation. Queensland University of Technology, 2013.