

ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЙ МЕТОД ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ АВТОНОМНОГО НЕОБИТАЕМОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА ПРИ ВЕДЕНИИ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ

Л. А. Мартынова^а, доктор техн. наук, старший научный сотрудник
^аАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург, РФ

Постановка проблемы: одной из важнейших задач при ведении сейсморазведки с использованием автономного необитаемого подводного аппарата является определение его местоположения с требуемой точностью. В силу особенностей ведения сейсморазведки, связанных с миниатюрными массогабаритами аппарата, отсутствием возможности излучения акустического сигнала и определения с высокой точностью собственного местоположения, имеющиеся методы навигации объекта в морской среде не могли быть применены в полной мере. **Цель исследования:** разработка метода определения местоположения автономного необитаемого подводного аппарата с учетом особенностей его использования при ведении сейсморазведки, включающего в себя дифференциальный режим коррекции положения аппарата. **Метод:** определение расстояния между аппаратом и излучателем разностно-дальномерным методом, позволяющим устранить ошибки, связанные с расхождением временных шкал аппарата и излучателя. **Результаты:** разработан метод определения местоположения автономного необитаемого подводного аппарата, который, в отличие от использовавшихся ранее, не требует синхронизации шкал излучателя и приемника, проведения специальных исследований среды распространения звукового сигнала, излучений со стороны аппарата и позволяет вести вычисления по определению местоположения аппарата непосредственно на его борту. Установка одной базовой станции в районе исключает необходимость размещения на дне сети донных станций «маяков-ответчиков», используемых в настоящее время при определении местоположения в морской среде по методу длинной базы. Дифференциальный режим предлагаемого метода включает в себя алгоритмы выработки дифференциальных поправок и их корректировки местоположения подводного аппарата, широко используемые в спутниковой навигации. Проведенные исследования позволили установить основные закономерности использования режима дифференциальных поправок, определить ограничения предложенного метода. **Практическая значимость:** предложенный метод существенно сокращает время на проведение подготовительных работ при сейсморазведке, является коммерчески более скрытым по сравнению с используемыми.

Ключевые слова — автономный необитаемый подводный аппарат, местоположение объекта, поправки, дифференциальный режим.

Введение

В настоящее время вопросам сейсморазведки уделяется повышенное внимание, особенно в условиях ледовой обстановки. В статье [1] предложен метод ведения сейсморазведки, заключающийся в использовании группы автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА) с размещенными на них геофонами. В процессе сейсморазведки геофоны принимают отраженные от залежей углеводородов сигналы, излучаемые специальным излучателем (вибратором), расположенным на крупногабаритном обитаемом подводном объекте-носителе. Реализация предложенного в работе [1] метода эффективна только при достаточно точном определении местоположения каждого АНПА группы по широте-долготе и по глубине.

Имеется большое количество методов позиционирования подводного объекта, в данном случае АНПА, в морской среде с использованием гидроакустических сигналов [2].

Однако позиционирование АНПА при выполнении сейсморазведки имеет ряд особенностей, которые не позволяют в полной мере воспользоваться имеющимися на сегодняшний момент

методами и способами [3–7]. Так, применение методов с длинной базой связано с необходимостью оборудования морского дна маяками-ответчиками, что само по себе является дорогостоящим, технически сложным мероприятием. Использование методов короткой базы связано с необходимостью излучения АНПА сигнала, что приводит к избыточному расходу запаса электроэнергии АНПА, а также препятствует скрытному позиционированию и является демаскирующим признаком, что в условиях коммерческой конкуренции крайне нежелательно. Использовать метод ультракороткой базы нельзя из-за невозможности размещения на АНПА фазированной решетки с учетом его очень скромных массогабаритов, исчисляемых десятками сантиметров. Использование одномаяковой навигации требует дополнительной подготовительной работы, связанной с оценками эффективной скорости распространения звукового сигнала в воде [7] в рассматриваемом районе. Поскольку ведение сейсморазведки — процесс достаточно длительный, происходит в течение нескольких суток и даже недель, то измерения вертикального распределения скорости звука необходимо вести регулярно в процессе сейсморазведки, что связано с техни-

ческими, временными и финансовыми трудностями.

Таким образом, применение перечисленных выше методов невозможно, с одной стороны, из-за сложностей, сопровождающих их использование, и, с другой стороны, необходимости учитывать ряд особенностей при позиционировании АНПА. Однако положительным фактором является то, что определение точного нахождения АНПА в большей степени необходимо при их стационарном состоянии, а при движении основное внимание следует сосредоточить на безаварийности движения АНПА с одной стороны и удалении на дальности связи друг от друга с другой стороны. Вместе с тем прикрепленный к дну АНПА может оказаться в зоне тени по отношению к излучателю вследствие неровностей рельефа. Это также должно учитываться при выборе метода определения местоположения АНПА.

В настоящей работе в развитие перечисленных в статье [2] методов предлагается метод высокоточной навигации АНПА путем дифференциальной коррекции позиционирования АНПА с учетом особенностей ведения сейсморазведки.

Особенности метода ведения сейсморазведки

Сейсморазведка проводится следующим образом [1]. В заданном районе с использованием АНПА перемещают и к дну прикрепляют геофоны в точках, расположенных в узлах условной сетки, покрывающей дно заданного района. Вблизи донной поверхности по круговой траектории (циклоиде) перемещается излучатель, расположенный на подводном носителе, зондируя донную поверхность импульсными сигналами. АНПА с геофонами принимают отраженные сигналы от залежей углеводородов в придонном слое [1].

Предложенный метод поиска залежей углеводородов [1] основан на согласованном функционировании излучателя и группы АНПА. В то время как большая часть АНПА из группы прикреплена к дну и принимает отраженный сигнал, создаваемый излучателем, другая часть АНПА перемещается для занятия новой позиции, не участвуя при этом в приеме отраженных сигналов. После занятия новой позиции отраженные сигналы принимает группа АНПА в обновленном составе, при этом часть АНПА, не задействованная в приеме сигнала, перемещается в места новой своей дислокации. Тем самым достигается динамичность функционирования всей системы в целом и непрерывность сейсморазведки, что сокращает время на ее проведение.

Из данного описания метода ведения сейсморазведки следует, что:

— наиболее точное позиционирование АНПА должно быть обеспечено в периоды его стационарного положения при прослушивании отраженных сигналов;

— позиционирование можно проводить как до начала излучения геосигнала, так и в процессе сейсморазведки;

— время, затрачиваемое на позиционирование стационарно расположенных АНПА, не ограничено: определять местоположение можно синхронно с приемом отраженных сигналов.

При разработке метода позиционирования каждого АНПА группы предполагаем следующие:

— подводный носитель оснащен качественной высокоточной бортовой инерционной навигационной системой и обладает возможностью определения своего местоположения, например, с использованием информации глобальной навигационной спутниковой системы;

— навигационная система подводного носителя обеспечивает стабильную временную шкалу;

— уход шкалы времени у каждого АНПА постоянен и с течением времени не меняется;

— расхождение шкал времени Δt излучателя и АНПА на время проведения измерений у каждого АНПА будем считать постоянной величиной.

В соответствии с предложенным методом [1] ведения сейсморазведки подводный аппарат с излучателем движется по круговой траектории и излучает акустический сигнал. Пусть мощность излучаемого сигнала такова, что прямой сигнал регистрируется каждым АНПА. Поскольку положение АНПА различно, то и прием каждым АНПА сигнала происходит в разное время. Если бы часы АНПА были синхронизированы с часами излучателя, то достаточно было бы зарегистрировать сигнал на АНПА и на этом закончить измерения. Однако часы каждого АНПА имеют собственную временную шкалу, уход которой от шкалы излучателя неизвестен. В то же время предполагаем, что уход шкалы у каждого отдельно взятого АНПА — постоянный по отношению к временной шкале излучателя. По прямому сигналу излучателя каждый АНПА определяет дальность до излучателя и по совокупности нескольких измерений дальности самостоятельно решает навигационную задачу, в результате чего определяет свое собственное местоположение.

Метод определения положения АНПА

При определении местоположения АНПА после их прикрепления к дну воспользуемся разностно-дальномерным методом определения местоположения АНПА, в ходе которого происходит измерение разностей времен распространения сигнала от излучателя до АНПА для поиска

точки пересечения гипербол. Такой метод является одной из разновидностей методов длинной базы [2]. Достоинством методов длинной базы является возможность высокоточного (до десятков сантиметров) определения координат АНПА при условии использования для измерения времени распространения сигнала между излучателем и АНПА разработанного в последние годы так называемого модемного обмена [2]. Модем позволяет обеспечить точность измерения времени распространения сигнала между излучателем и АНПА вплоть до 0,01% [2], в том числе в условиях многолучевого гидроакустического канала. Однако в рассматриваемом случае такой метод не применим, поскольку, как было сказано в начале, АНПА лишен возможности излучать ответный сигнал.

Для идеальных условий синхронизации излучателя с приемниками АНПА и среды распространения сигнала уравнение дальности от излучателя с координатами (x_n, y_n, z_n) до i -го АНПА имеет вид

$$R_i = \sqrt{(x_n - x_i)^2 + (y_n - y_i)^2 + (z_n - z_i)^2}, \quad (1)$$

где x_i, y_i, z_i — координаты i -го АНПА.

Однако реальные условия отличаются от идеальных тем, что:

— шкалы времени излучателя и приемников АНПА не синхронизированы;

— условия распространения сигнала, прежде всего вертикальное распределение скорости звука в текущий момент времени, также неизвестно.

В связи с этим при измерении дальности до i -го АНПА получаем так называемую *псевдодальность* R_i^* , отличающуюся от истинной дальности R_i на постоянную величину ΔR_i . Уравнение (1) для псевдодальностей приобретает вид

$$R_i^* = \sqrt{(x_n - x_i)^2 + (y_n - y_i)^2 + (z_n - z_i)^2} + \Delta R_i. \quad (2)$$

Поверхностью положения i -го АНПА является сфера с центром в точке положения излучателя, но радиус этой сферы изменен на неизвестную величину ΔR_i . Для определения координат каждого i -го АНПА необходимо решить задачу с четырьмя неизвестными $(x_i, y_i, z_i, \Delta R_i)$. Следовательно, для решения системы уравнений в псевдодальномерном методе при классическом использовании метода необходимо измерить псевдодальности минимум до четырех пространственно разнесенных излучателей. Поскольку в рассматриваемом методе ведения сейсморазведки используется только один излучатель, то в этом случае, по аналогии со спутниковой навигацией [8], возникающую пространственную неоднозначность исключают при помощи последовательных измерений

нескольких (четырёх-пяти) положений излучателя [2]. При этом в каждом j -м измерении определяется псевдодальность R_{ij}^* :

$$R_{ij}^* = \sqrt{(x_{nj} - x_i)^2 + (y_{nj} - y_i)^2 + (z_{nj} - z_i)^2} + \Delta R_{ij}. \quad (3)$$

По полученным значениям псевдодальностей на борту АНПА определяется его местоположение.

Исключение расхождения временных шкал излучателя и АНПА-приемника при определении дальностей

Для исключения расхождения временных шкал излучателя и АНПА-приемника воспользуемся разностно-дальномерным методом. Его особенностью является то, что шкалы излучателя и каждого акустического приемника i -го АНПА не должны быть синхронизированы, поскольку метод основан на разностях прихода сигнала от различного положения излучателя к одному и тому же i -му АНПА, и разногласие шкал при обработке исключается из рассмотрения.

При разностно-дальномерном методе используются три разности между псевдодальностями R_1, R_2, R_3, R_4 , вычисленные для четырех измерений расстояний от излучателя до АНПА по (2), так как в этом выражении величина ΔR_i постоянная и сокращается при вычитании псевдодальностей. Следовательно, вычисление разностей псевдодальностей равносильно вычислению разностей истинных дальностей. В данном случае навигационным параметром является ΔR_i , а поверхность положения представляет собой двуполостной гиперboloид вращения, фокусами которого являются координаты положения излучателя при $(j-1)$ -м и j -м измерениях ($j=1\div 4$). Ограничением на применение разностно-дальномерного метода является требование относительно положения излучателя в моменты определения положения АНПА: точки положения излучателя должны быть достаточно широко разнесены в пространстве для повышения точности позиционирования АНПА [9].

В результате решения системы уравнений (3) АНПА определяет координаты своего местоположения.

При этом необходимо отметить, что такой процесс может происходить параллельно с зондированием дна сейсмосигналами, поскольку они отличаются по частоте и их приемом заняты геофоны, а не гидрофоны. Тогда можно синхронизировать излучение акустических сигналов с излучением геопосылок.

Поскольку в силу особенностей ведения сейсморазведки большая часть АНПА достаточно долго остается прикрепленной ко дну, то количество акустических сигналов, формируемых излучателем, может оказаться значительно больше четырех и достаточным, чтобы по разностно-дальномерному методу определить положение АНПА с требуемой точностью.

Возможность получить большее количество сигналов от АНПА, своего рода избыточность, необходима также на тот случай, если некоторые АНПА окажутся затененными по отношению к излучателю из-за особенностей рельефа дна.

Таким образом, в процессе сейсморазведки определение положения АНПА происходит следующим образом: АНПА прикреплены ко дну, и в течение времени несколько раз производится излучение/прием геосигналов излучателя, положение которого известно. Одновременно идет излучение акустического сигнала для позиционирования АНПА. При этом излучатель постоянно движется, совершая круговые движения вокруг группы АНПА. АНПА неподвижны, поэтому по этим последовательным излучениям, в свою очередь, определяются координаты положения АНПА. Причем чем шире широкоазимутальность прихода сигналов на АНПА и обратно к излучателю, тем точнее определяется положение АНПА [9].

В ходе постобработки на каждом АНПА на зарегистрированные моменты времени будут получены разности времени между приходами сигналов от излучателя. По результатам разностей времени принятых сигналов будут получены данные для определения местоположения каждого АНПА.

Исключение влияния среды распространения на определение дальностей. Метод дифференциального режима уточнения положения под водой

При необходимости более точного получения координат АНПА в работе предлагается метод учета погрешности распространения акустического сигнала, связанной с особенностями среды распространения, возможными аномалиями распространения звука в воде, в результате чего происходит искривление лучей, задержки в распространении акустического сигнала, причем на разных глубинах — по-разному. Как отмечено в работе [2], для устранения этого эффекта целесообразно иметь измерения распределения скорости звука, однако это требует дополнительных усилий, и измерение по глубине также вызывает определенные трудности. Необходим инструментарий для высокоточного определения скорости звука в воде.

Предлагаемый в настоящей работе метод формирования дифференциальных поправок, включающий необходимость измерений скорости звука, удобен тем, что для его использования необходимо знать лишь разность между временем распространения звука в идеальных условиях и временем распространения звука в фактических условиях, без анализа причин возникновения и изменения с глубиной этой разности.

Метод основан на выработке дифференциальных поправок к псевдодальностям между излучателем и каждым АНПА.

Из спутниковой навигации известно [8], что если все псевдодальности изменить на одну и ту же величину, то результат решения навигационной задачи не изменится. На этом факте основан также принцип уточнения определения местоположения АНПА с использованием поправок к псевдодальностям: соотношение между псевдодальностями должно стремиться к теоретически рассчитанному соотношению расстояний до излучателя.

Предлагаемый метод дифференциального режима уточнения местоположения АНПА заключается в использовании базовой станции (БС), например, в специальном АНПА или отдельном маяке, расположенном на возвышенном месте донной поверхности вблизи места проведения поиска углеводородов. Положение БС определяется с высокой точностью на предварительном (подготовительном) этапе до сейсморазведки. Для этого допустимо проведение специального мероприятия, например, специальное движение подводного объекта с излучателем вокруг этой БС и определение ее местоположения. И уже после определения ее местоположения — собственно проведение сейсморазведки. В отличие от использования трех БС в методах длинной базы, в предлагаемом методе необходима только одна станция, что экономически более выгодно. Чтобы впустую не расходовался ресурс БС, она становится работоспособной только в момент ведения сейсморазведки по сигналу от излучателя. Все остальное время она может находиться в «спящем» режиме.

При изложении метода предполагаем, что для получения точного положения отдельно взятого «базового» АНПА технического оснащения достаточно, а время высокоточного определения БС не ограничено.

Пусть по результатам высокоточных измерений известно положение БС с координатами (x_6, y_6, z_6) . Тогда в момент излучения акустического сигнала подвижным излучателем, положение которого известно, определяется измеренное расстояние до излучателя

$$R_{ij}^{\text{изм}} = \sqrt{(x_{ij} - x_6)^2 + (y_{ij} - y_6)^2 + (z_{ij} - z_6)^2}.$$

Одновременно вычисляется «теоретическое» расстояние от БС до излучателя, поскольку координаты БС известны с высокой точностью:

$$R_{ij} = \sqrt{(x_{и_j} - x_б)^2 + (y_{и_j} - y_б)^2 + (z_{и_j} - z_б)^2}.$$

По полученным результатам определяется разность расстояния хода сигнала от излучателя до БС при j -м измерении:

$$\Delta R_{ij} = R_{ij} - R_{ij}^{\text{изм}}.$$

К i -м псевдодальностям остальных АНПА добавляется вычисленная поправка ΔR_{ij} , поскольку предполагается, что условия распространения звука одинаковые. Тогда корректировка псевдодальностей с учетом дифференциальных поправок примет вид

$$R_{ij}^* = \sqrt{(x_{и_j} - x_i)^2 + (y_{и_j} - y_i)^2 + (z_{и_j} - z_i)^2} + \Delta R_{ij}.$$

При использовании предложенного метода необходимо, чтобы расстояние от АНПА до излучателя многократно превосходило расстояние между БС и остальными АНПА. Если же расстояние соизмеримо, то поправки к псевдодальностям БС и остальных АНПА уже нельзя считать одинаковыми, и в этом случае для повышения точности целесообразно учитывать различие дистанций от излучателя до БС и от излучателя до остальных АНПА. Также можно дополнительно учитывать время хода сигнала от БС до каждого АНПА.

Таким образом, использование метода дифференциальной коррекции происходит в два этапа.

Сначала высокоточно определяется положение БС. Для этого совершаются круговые вращения излучателя вокруг БС. Как отмечалось в работах [1, 2 и 9], в данном случае такая траектория способствует широкоазимутальности приема сигналов от АНПА, а поскольку БС неподвижна, то, как следствие, — увеличению точности определения ее местоположения.

На втором этапе, уже в ходе ведения сейсморазведки, наряду с геосигналами излучателем излучается акустический сигнал. На АНПА регистрируются приходы сигнала от излучателя и от БС. Сравниваются теоретически прогнозируемая и фактически полученная дальности до БС, и по ним вычисляется дифференциальная поправка, которая затем добавляется к дальности, полученной по сигналу от излучателя. Предполагается, что в рассматриваемом районе условия распространения звукового сигнала одинаковы по всему району. При этом распределение звука по глубине совершенно неважно, главное — иметь поправку к псевдодальности.

Использование метода дифференциальной коррекции в каждом измерении приводит к повышению точности определения местоположения АНПА.

Для получения количественных характеристик повышения точности определения местоположения АНПА целесообразно проведение моделирования или натурального эксперимента. Поскольку подводные эксперименты затруднительны, то используют математическое моделирование. При этом необходимо учитывать процессы, происходящие в реальности.

Для выявления характерных закономерностей был проведен более доступный эксперимент с сигналами спутниковых радионавигационных систем, позволяющий затем перенести полученные закономерности в моделирование водной среды, поскольку:

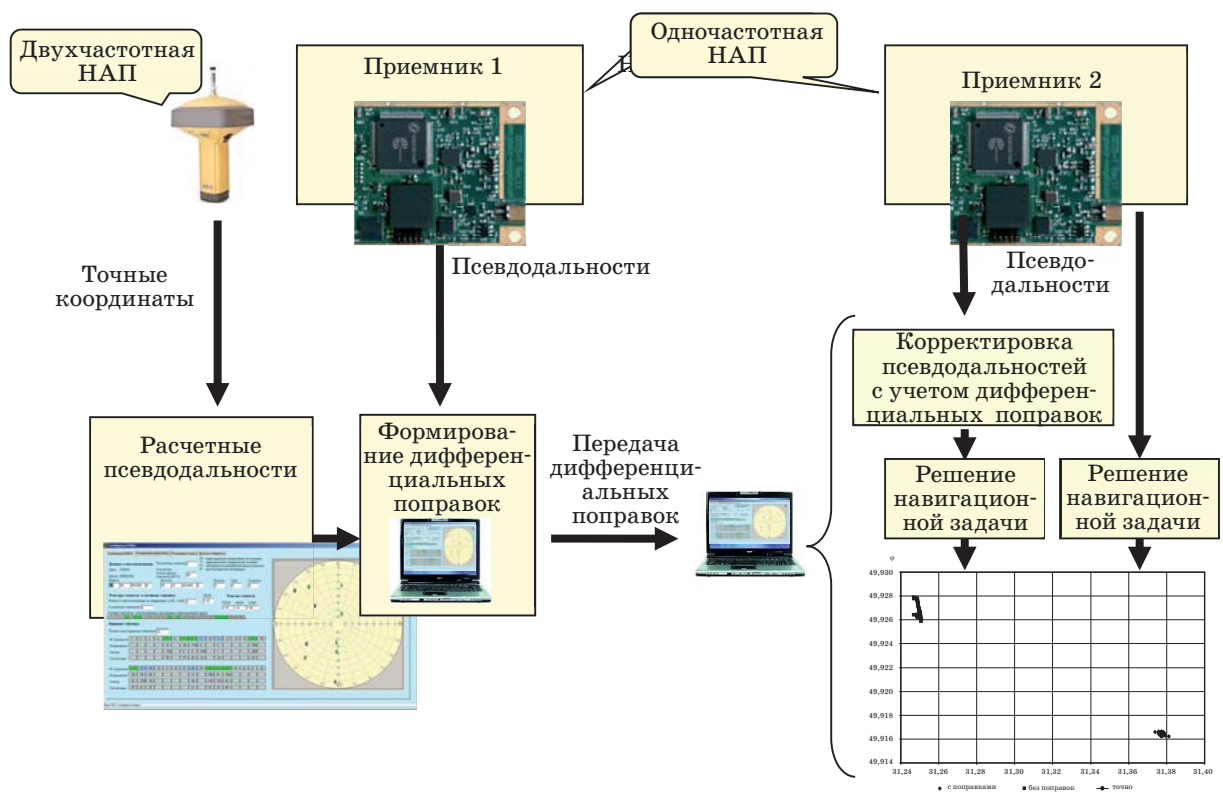
- влияние на время распространения сигнала оказывает как морская, так и воздушная среда;
- математический аппарат обработки результатов измерений от среды не зависит.

Результаты эксперимента

Чтобы убедиться в том, что, с одной стороны, дифференциальные поправки действительно повышают точность позиционирования, а с другой стороны, кроме дифференциальных поправок, никаких дополнительных данных не требуется, был проведен натуральный эксперимент [10–13].

При проведении эксперимента использовались два одночастотных приемника «Геос-1», позволяющих получить текущие псевдодальности до навигационных спутников. Преимуществом приемника «Геос-1» является несложность его использования. В качестве исследуемой рассматривалась конкретная точка с фиксированными координатами. Точная информация о координатах выбранной точки была получена по результатам длительных измерений двухчастотным геодезическим приемником «Топкон» (Япония).

На эти же моменты времени определялись теоретически рассчитанные точные значения псевдодальностей, полученные по специально разработанной математической модели определения положения навигационных спутников на расчетный текущий момент времени для точки с точно измеренными координатами, в которой находится приемник «Геос-1». Модель и реализующая ее программа работали в реальном масштабе времени и позволяли в каждый момент приема псевдодальностей определять видимое созвездие. Эта же модель по полученным псевдодальностям до видимых навигационных спутников позволяла сформировать оптимальное рабочее созвездие, решить навигационную задачу и определить координаты (широту и



■ **Рис. 1.** Схема стенда по работе с дифференциальными поправками: НАП — навигационная аппаратура потребителя
 ■ **Fig. 1.** Diagram of the stand for work with differential corrections: НАП — navigation equipment

долготу), а также высоту нахождения приемника.

Схема экспериментального стенда по формированию, передаче и учету дифференциальных поправок к псевдодальностям приведена на рис. 1.

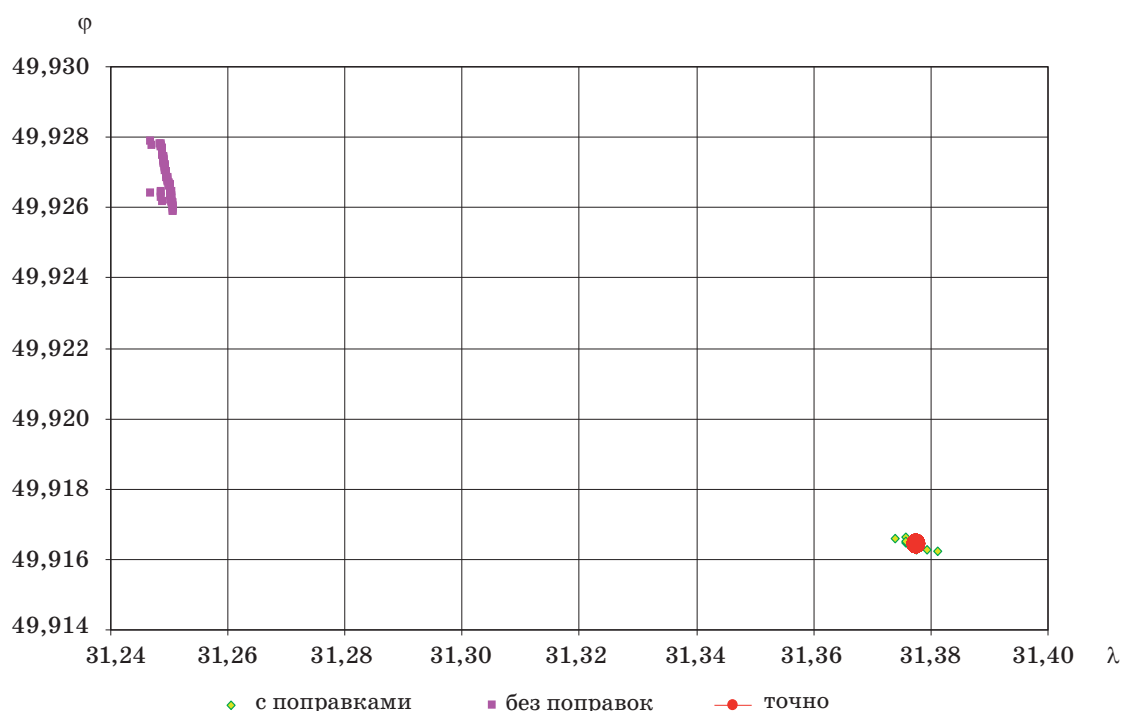
В ходе проведения эксперимента по показаниям «Геос-1» (приемник 1) поступали псевдодальности и передавались на ПК, на основании полученной информации происходило определение поправок к псевдодальностям по каждому космическому аппарату видимой группировки.

Затем полученные поправки передавались в программу, регистрирующую псевдодальности с приемника, расположенного в другом месте (приемник 2). Полученные с приемника 1 поправки использовались для корректировки псевдодальностей приемника 2. По данным приемника 2 осуществлялось решение навигационной задачи и определялись координаты точки его положения. Для исследований влияния использования поправок на точность определения местоположения координаты точки рассчитывались как без учета, так и с учетом поправок к псевдодальностям.

Результаты регистрировались на ПК приемника 2 параллельно для последующей постобработки.

Рассматривался вариант размещения приемников «Геос-1», при котором оба приемника находились рядом в одной и той же точке, но с различными условиями приема.

При таком варианте размещения двух приемников один из них находился на крыше четырехэтажного здания, другой — под ним на окне четвертого этажа этого же здания. Особенность такого положения приемника заключалась в том, что стена здания экранировала спутниковые сигналы, и практически половина спутниковых сигналов приемником не регистрировалась. За «базу» принимался приемник, расположенный на крыше и в зоне видимости которого находились практически все навигационные спутники видимого для данной точки созвездия. Приемник, расположенный на окне («пользователь»), определял псевдодальности и передавал их по локальной сети на ПК, на котором псевдодальности уточнялись с использованием поправок. Оба ПК были соединены витой парой. По полученным значениям на приемнике 2 осуществлялось решение навигационной задачи по псевдодальностям как без полученных поправок, так и с поправками. Эксперимент длился 12 часов в дневное время. За весь период наблюдения использование поправок к псевдодальностям дало значительно лучший результат по сравнению с решением навига-



■ **Рис. 2.** Мишенное поле положения точки без поправок и с поправками
 ■ **Fig. 2.** Target field of the point position without corrections and with corrections

ционной задачи без поправок. Причем результат решения с полученными поправками практически соответствовал точным координатам данной точки. Приемник «Геос-1», расположенный на крыше, получал сигналы от спутников при угле их видимости от 15° , при этом были видны 11 навигационных спутников.

Приемник «Геос-1», расположенный на окне, получал сигналы практически только от половины навигационных спутников (4–5), так как экранировала стена дома. Из-за этого решение навигационной задачи оказывалось крайне неточным. Использование сформированных и переданных поправок позволило существенно улучшить точность определения местоположения и приблизить полученный результат к точным координатам точки.

Мишенное поле с указанием положения точек определения местоположения показано на рис. 2.

В левом верхнем углу мишенного поля расположены точки, координаты которых получены без учета дифференциальных поправок, в правом нижнем углу расположены точки, координаты которых получены с учетом дифференциальных поправок, там же большой круг красного цвета показывает точное положение навигационного приемника.

В результате проведения эксперимента подтвердились теоретические предпосылки формирования дифференциальных поправок к псев-

додальностям, использование которых привело к повышению точности определения координат в дифференциальном режиме. Это позволит в дальнейшем учитывать и использовать дифференциальный режим в других смежных работах, в том числе и в морской среде. Кроме того, полученные результаты натурального эксперимента в дальнейшем могут быть использованы при построении математической модели определения местоположения АНПА — с учетом особенностей распространения гидроакустического сигнала в морской среде.

Заключение

Предложенный метод позиционирования АНПА при ведении сейсморазведки отличается тем, что не требует излучения сигнала самого АНПА. Рассмотрены возможности ухода от необходимости синхронизации временных шкал и учет среды распространения без необходимости проведения трудоемких дорогостоящих измерений характеристик самой среды. На результатах натурального эксперимента показана работоспособность и эффективность применения предложенного метода.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 17-08-00666-а).

Литература

1. Мартынова Л. А. Метод согласованного поведения излучателя и автономных необитаемых подводных аппаратов для эффективного ведения сейсморазведки // Информационно-управляющие системы. 2017. № 1. С. 83–92. doi:10.15217/issn1684-8853.2017.1.83
2. Кебкал К. Г., Машошин А. И. Гидроакустические методы позиционирования автономных необитаемых подводных аппаратов // Гироскопия и навигация. 2016. № 3 (94). С. 115–130. doi:10.1728/0869-7035.2016.24.3.115-130
3. Кебкал К. Г., Кебкал В. К., Кебкал А. Г., Петрочка Р. Экспериментальная оценка вероятности доставки пакетов навигационных данных по цифровому гидроакустическому каналу связи // Гироскопия и навигация. 2016. № 2 (93). С. 107–122. doi:10.17285/0869-7035.2016.24.2107-122.
4. Кебкал К. Г., Кебкал А. Г. Комбинированная система гидроакустического позиционирования с короткой и длинной базой: экспериментальные результаты // СЕКЦИЯ 2 Технические средства и методы акустических, геофизических и физико-химических исследований океана, биотехнологии и экология. <http://libed.ru/knigi-nauka/415342-1-sekciya-tehnicheskie-sredstva-metodi-akusticheskikh-geofizicheskikh-fiziko-himicheskikh-issledovaniy-okeana-biotehnolog.php> (дата обращения: 23.03.2017).
5. Кебкал К. Г., Кебкал В. К., Кебкал А. Г. Цифровые гидроакустические сети для условий связи с произвольно большими задержками соединения и разрывами соединений: экспериментальное исследование // Подводные исследования и робототехника. 2015. № 2(20). С. 12–19.
6. Дубровин Ф. С., Щербатюк А. Ф. Исследование некоторых алгоритмов однопаяковой мобильной навигации АНПА: результаты моделирования и морских испытаний // Гироскопия и навигация. 2015. № 4 (91). С. 160–172. doi:10.17285/0869-7035.2015.23.4.160-172
7. Кебкал К. Г., Кебкал В. К., Кебкал А. Г. Инструментальные средства синхронизации гидроакустических устройств связи в задачах управления подводными сенсорами, распределенными антеннами, автономными аппаратами // Гироскопия и навигация. 2014. № 4 (85). С. 70–85.
8. Яценков Б. Б. Основы спутниковой навигации. — М.: Каталог, 2002. — 106 с.
9. Буя М., Флорес П. Э., Хилл Д., Палмер Э., Росс Р., Уокер Р., Хаубирс М., Томпсон М., Лаура С., Менликли Д., Молдовану Н., Снайдер Э. и др. Морская сейсморазведка по спиральной траектории Coil Shooting // Нефтегазовое обозрение. 2008. Т. 21. № 4. С. 22–39.
10. Мартынова Л. А. Разработка технологии комплексной обработки разнородной информации, содержащей данные космических радионавигационных систем: дис. ... д-ра техн. наук — СПб., 2013. — 272 с.
11. Мартынова Л. А. Обработка информации космических радионавигационных систем для определения местоположения в условиях ограниченного приема спутникового сигнала // Информация и космос. 2012. № 3–4. С. 58–60.
12. Мартынова Л. А. Обработка информации, включающей данные космических радионавигационных систем, при установке и функционировании быстроразвертываемого охранного комплекса // Информация и космос. 2013. № 2. С. 61–64.
13. Емельянец Г. И., Блажнов Б. А., Степанов А. П. Особенности использования фазовых измерений в задаче ориентации интегрированной инерциально-спутниковой системы. Результаты ходовых испытаний // Гироскопия и навигация. № 3 (74). 2011. С. 3–23.

UDC 519.87

doi:10.15217/issn1684-8853.2017.4.77

Differential Method of Positioning a Standalone Unmanned Submersible in Seismic Exploration

Martynova L. A.^a, Dr. Sc., Tech., Associate Professor, martynowa999@bk.ru^aState Research Center of the Russian Federation Concern CSRI Elektropribor, JSC, 30, Malaya Posadskaya St., 197046, Saint-Petersburg, Russian Federation

Introduction: One of the most important problems in seismic exploration with a standalone unmanned submersible is to determine its location with the required accuracy. Such seismic surveys have certain peculiarities: small size of the submersibles, their impossibility to emit an acoustic signal, and the difficulty to determine their own location with high accuracy. Therefore, the available methods for positioning an object in a marine environment cannot be fully applied. **Purpose:** We need to develop a method for positioning a standalone unmanned submersible taking into account all its specific features, including the differential mode of correcting the device position. **Method:** The distance between the device and the radiator is measured by the difference-ranging method which allows you to eliminate the errors caused by the discrepancy between the time scales of the device and of the radiator. **Results:** A method has been developed for determining the location of a standalone unmanned submersible. Unlike the previously used methods, this one does not require the synchronization of the radiator and receiver scales, special research of the sound propagation medium, or providing emission from the device. All the calculations can be carried out aboard the submersible. Setting up just one base station in the area makes it unnecessary to arrange a network of “beacon-responder” bottom stations which are commonly used now with the long base technique.

The differential mode of the proposed method includes algorithms for generating differential corrections in order to correct the submersible position which are widely used in satellite navigation. The conducted research helped us to find the ways of using the differential correction mode and to determine the limitations of the proposed method. **Practical relevance:** The proposed method significantly reduces the time necessary for the preparatory work in seismic exploration, being more commercially concealed as compared to others.

Keywords — Standalone Unmanned Submersible, Object Location, Corrections, Differential Mode.

References

1. Martynova L. A. Concerted Action of a Radiator and Autonomous Uninhabited Submersibles for Effective Seismic Exploration. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2017, no. 1, pp. 83–92 (In Russian). doi:10.15217/issn1684-8853.2017.1.83
2. Kebkal K. G., Mashoshin A. I. Acoustic Positioning Methods of Autonomous Vehicles. *Giroskopiia i navigatsiia*, 2016, vol. 24, no. 3 (94), pp. 115–130 (In Russian). doi:10.1728/0869-7035.2016.24.3.115-130
3. Kebkal K. G., Kebkal V. K., Kebkal A. G., Petrochcha River. Experimental Estimation of Delivery Success of Navigation Data Packages Transmitted via Digital Hydroacoustic Communication Channel. *Giroskopiia i navigatsiia*, 2016, vol. 24, no. 2 (93), pp. 107–122 (In Russian). doi:10.17285/0869-7035.2016.24.2107-122
4. Kebkal K. G., Kebkal A. G. Combined System of Hydroacoustic Positioning with a Short and Long Basis: the Experimental Results. *SEKTSIIA 2 Tekhnicheskie sredstva i metody akusticheskikh, geofizicheskikh i fiziko-khimicheskikh issledovaniy okeana, biotekhnologii i ekologiia*. Available at: <http://libed.ru/knigi-nauka/415342-1-sekciya-tehnicheskikh-sredstva-metodi-akusticheskikh-geofizicheskikh-fiziko-himicheskikh-issledovaniy-okeana-biotekhnolog.php> (accessed 23 March 2017).
5. Kebkal K. G., Kebkal V. K., Kebkal A. G. Digital Hydroacoustic Networks for Communication in Conditions of Long Delays and Breaks the Connection: an Experimental Research. *Podvodnye issledovaniia i robototekhnika*, 2015, no. 2(20), pp. 12–19 (In Russian).
6. Dubrovin F. S., Scherbatyuk A. F. Study of the Algorithms for the Single Beacon Mobile Navigation of Underwater Vehicles: Results of Simulation and Sea Trials. *Giroskopiia i navigatsiia*, 2015, no. 4 (91), pp. 160–172 (In Russian). doi:10.17285/0869-7035.2015.23.4.160-172
7. Kebkal K. G., Kebkal V. K., Kebkal A. G. Synchronization Tools of Acoustic Communication Devices in Control of Underwater Sensors, Distributed Antennas, and Autonomous Underwater Vehicles. *Giroskopiia i navigatsiia*, 2014, no. 2 (85), pp. 70–85 (In Russian).
8. Yatsenkov B. B. *Osnovy sputnikovoi navigatsii* [Bases of Satellite Navigation]. Moscow, Katalog Publ., 2002. 106 p. (In Russian).
9. Flores P. E., Hill D., Palmer E., Ross R., Walker R., Haubirs M., Thompson M., Laura S., Menlikli D., Moldovan N., Snider E. Naval Seismic Exploration on a Spiral Trajectory of Coil Shooting *Neftegazovoe obozrenie*, 2008, vol. 21, no. 4, pp. 22–39 (In Russian).
10. Martynova L. A. *Razrabotka tekhnologii kompleksnoi obrabotki raznorodnoi informatsii, sodержashchei dannye kosmicheskikh radionavigatsionnykh sistem*. Dis. dokt. tehn. nauk [Development of Technology of Complex Processing of the Heterogeneous Information Containing Data of Space Radio Navigational Systems. Dr. tehn. sci. diss.]. Saint-Petersburg, 2013. 272 p. (In Russian).
11. Martynova L. A. Information Processing Operation of Space-based Radio Navigation Systems for Position Fixing in Conditions of Terminated Satellite Signal. *Informatsiia i kosmos*, 2012, no. 3–4, pp. 58–60 (In Russian).
12. Martynova L. A. The Information Processing, Including Data of Space Radio Navigational Systems, at Installation and Functioning of the Fast-developed Security Complex. *Informatsiia i kosmos*, 2013, no. 2, pp. 61–64 (In Russian).
13. Emelyantsev G. I., Blazhnov B. A., and Stepanov A. P. Using Phase Measurements for Determining Vehicle's Attitude Parameters by GPS-Aided Inertial System in Sea Tests. *Giroskopiia i navigatsiia*, 2011, no. 3 (74), pp. 3–11.