

Я. И. БИНДЕР, Б. А. БЛАЖНОВ, Г. И. ЕМЕЛЬЯНЦЕВ,
Д. А. КОШАЕВ, Л. П. СТАРОСЕЛЬЦЕВ, О. А. СТЕПАНОВ

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ АЗИМУТАЛЬНОЙ ВЫСТАВКИ СКВАЖИННЫХ ГИРОИНКЛИНОМЕТРОВ В ВЫСОКИХ ШИРОТАХ

Проанализированы пути создания аппаратуры для азимутальной выставки скважинных гироинклинометров в полярных районах до 80° с. ш. Показано, что требуемая точность может быть обеспечена либо при использовании гироскопического курсоуказателя на основе инерциального измерительного модуля на волоконно-оптических гироскопах, либо с помощью двухантенной аппаратуры спутниковой навигации по фазовым измерениям. Приведены результаты натурных испытаний экспериментальных образцов аппаратуры начальной выставки гироинклинометров разработки ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»».

Введение

При использовании скважинных гироинклинометров в высоких широтах в условиях мобильных буровых установок (МБУ) и особенно на морских буровых платформах возникает задача обеспечения их начальной выставки по курсу с использованием внешней информации, так как в высоких широтах собственный режим гирокомпасирования существующих и разрабатываемых инклинометров не обеспечивает необходимую точность, которая оценивается на уровне 0,6°.

Для выработки эталонного значения курса на подвижном основании могут быть использованы различные курсоуказатели. В настоящее время на морских подвижных объектах различного назначения используются маятниковые гирокомпасы типа Standard-22 (Anschutz, Германия), гирокомпасы с косвенным управлением типа ГКУ-5 (ПНППК, г. Пермь), гирогоризонткомпасы на волоконно-оптических гироскопах (ВОГ) типа SR 2100 (Litton), OCTANS (IXSEA) или «Зенит-СК», «Бекар» (ЦНИИ «Электроприбор»), а также малогабаритные бесплатформенные инерциальные навигационные системы на лазерных гироскопах или ВОГ типа RHINS (IXSEA) [11–15].

Биндер Яков Исаакович. Кандидат технических наук, главный конструктор по направлению – начальник Научно-технического центра телеметрических систем ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» (С.-Петербург). Действительный член Академии навигации и управления движением.

Блажнов Борис Александрович. Кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор».

Емельянец Геннадий Иванович. Доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор». Действительный член Академии навигации и управления движением.

Кошаев Дмитрий Анатольевич. Доктор технических наук, ведущий научный сотрудник ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор». Член секции молодых ученых Академии навигации и управления движением.

Старосельцев Леонид Петрович. Кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор».

Степанов Олег Андреевич. Доктор технических наук, начальник отдела – начальник Научно-образовательного центра ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор». Вице-президент Академии навигации и управления движением.

Известно, что к недостаткам классических гироскопических компасов относится значительный уровень их погрешностей при эксплуатации в северных широтах, а также при их использовании на маневренных судах. К недостаткам прецизионных гироскопических компасов и бесплатформенных систем на лазерных гироскопах и ВОГ следует отнести их значительную стоимость. Это и определяет тот факт, что до сих пор на большинстве морских судов применяются гироскопические компасы. Однако для решения обсуждаемой задачи представляет интерес анализ возможности использования современного малогабаритного бескарданного инерциального измерительного модуля (БИИМ) на ВОГ среднего уровня точности (нестабильность дрейфа около 0.01 град/ч) типа IMU-120 (IXSEA) [14].

Новое направление в морском приборостроении связано с разработкой так называемых GPS-компасов – интегрированных инерциально-спутниковых систем ориентации и навигации с использованием мультиантенной приемной аппаратуры спутниковых навигационных систем (СНС). В частности, известна интегрированная система Seapath 300 норвежской фирмы Seatex AS для морских судов [16]. В ее состав входит дешевый бескарданный инерциальный модуль на микромеханических датчиках и мультиантенная аппаратура GPS с фазовыми измерениями на несущей частоте. Такая интегрированная система получила широкое распространение в морской практике, так как обеспечивает выработку всех кинематических параметров движения объекта и характеризуется умеренной стоимостью. Однако ее применение в условиях буровой платформы требует решения проблемы ограниченной доступности навигационных спутников и обеспечения помехоустойчивости в приеме данных мультиантенной ПА СНС [3-5].

Цель данной работы – анализ путей создания аппаратуры для азимутальной выставки скважинных гироскопических компасов на буровых установках и платформах в полярных районах до 80° с. ш. при использовании гироскопического компаса на основе инерциального измерительного модуля на ВОГ, а также с помощью фазовых измерений от двухантенной аппаратуры спутниковой навигации.

Анализ возможности использования гироскопического компаса на основе инерциального измерительного модуля на волоконно-оптических гироскопах

Обсудим возможность решения задачи, связанной с определением курса в условиях морской буровой платформы, гироскопического компаса на основе инерциального измерительного модуля на ВОГ среднего уровня точности с нестабильностью дрейфа гироскопов порядка 0.01 град/ч. Для этой цели используем БИИМ на ВОГ IMU-120 (IXSEA, Франция), интегрированный с одноантенной приемной аппаратурой СНС. Для выполнения анализа точности были проведены стендовые и мореходные испытания. При проведении испытаний осуществлялась запись данных гироскопов и акселерометров БИИМ, на частоте 100 Гц. На стенде, кроме того, записывались углы поворота платформы, на которой установлен прибор. Затем в камеральном режиме осуществлялась обработка данных с использованием разработанных в пакете MATLAB (Simulink) программ, реализующих работу интегрированной системы ориентации и навигации (ИСОН) [10]. С целью коррекции показаний БИИМ в программе предусмотрено решение задачи калмановской фильтрации с использованием разностных скоростных и позиционных измерений [2]. При этом вектор состояния расчетной модели имел следующий вид:

$$x^T = [\Delta K \ \beta \ \gamma \ \Delta V_E \ \Delta V_N \ \Delta V_H \ \Delta \varphi \ \Delta \lambda \ \Delta h \ \Delta \bar{\omega}_{xb} \ \Delta \bar{\omega}_{yb} \ \Delta \bar{\omega}_{zb} \ \Delta \bar{a}_{xb} \ \Delta \bar{a}_{yb} \ \Delta \bar{a}_{zb}], \quad (1)$$

где $\bar{\Lambda}_h = [\beta \ \gamma \ \Delta K]^T$ – вектор малых угловых поворотов Эйлера, описывающий погрешности построения географического сопровождающего трехгранника ENH ; угол ΔK характеризует погрешность по курсу, определяемую разворотом приборного трехгранника xuz вокруг вертикали места, а углы β, γ – погрешности построения вертикали места соответственно в плоскости меридиана места и в плоскости первого вертикаля; $\Delta V_i, i = E, N, H$ – погрешности составляющих вектора линейной скорости; $\Delta \varphi, \Delta \lambda, \Delta h$ – погрешности географических координат соответственно по широте, долготе и высоте; $\Delta \bar{\omega}_i (i = xb, yb, zb)$, $\Delta \bar{a}_i$ – смещения нулей ВОГ и акселерометров.

Матрица динамики расчетной модели погрешностей системы с вектором состояния (1) соответствует моделям погрешностей задач построения в БИИМ географического сопровождающего трехгранника, выработки составляющих вектора линейной скорости и координат места, приведенных в работе [10]. А также содержит описание дрейфов гироскопов и погрешностей акселерометров, аппроксимированных соответствующими винеровскими процессами.

Погрешности измерения приемной аппаратурой СНС составляющих вектора линейной скорости и координат места имитировались дискретными белыми шумами. Значения параметров расчетной модели погрешностей гироскопов и акселерометров БИИМ были выбраны с учетом анализа их спектральных плотностей, полученных по данным стендовых испытаний на неподвижном основании (рис. 1).

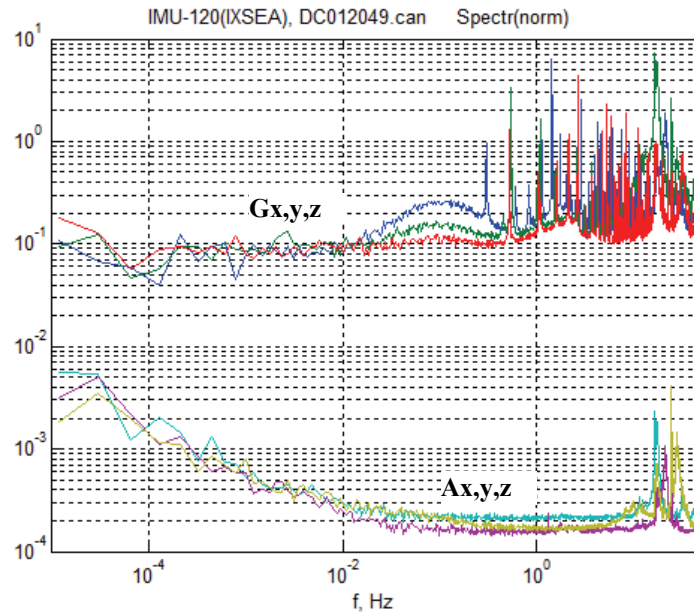


Рис. 1. Значения квадратного корня из спектральных плотностей погрешностей акселерометров $A_{x,y,z}$ ($\text{м/с}^2 / \sqrt{\text{Гц}}$) и дрейфов гироскопов $G_{x,y,z}$ ($\text{град/ч} / \sqrt{\text{Гц}}$)

На основании проведенного анализа были выбраны соответствующие значения начальной матрицы ковариаций и порождающих шумов для БИИМ в фильтре Калмана. Погрешности приемной аппаратуры СНС по составляющим

вектора линейной скорости были аппроксимированы дискретными белыми шумами уровня 0.1 м/с (1σ).

Стендовые испытания БИИМ проводились на 3-осном стенде Acutronic как в условиях неподвижного основания, так и при наличии рыскания и качки на широте 59.96° . Параметры угловых гармонических колебаний платформы стенда принимались следующими.

	Амплитуда, $^\circ$	Период, с
Рыскание	6	30
Килевая качка	30	16
Бортовая качка	25	6

Продолжительность испытаний – около 10 ч. Скоростные измерения от СНС имитировались.

При решении задачи коррекции БИИМ учитывалось отстояние его блока акселерометров относительно центра качания стенда.

Результаты обработки записанных на стенде данных гироскопов, акселерометров IMU-120 и данных имитатора СНС по разработанной в пакете MATLAB (Simulink) программе, реализующей работу интегрированной системы, приведены на рис. 2.

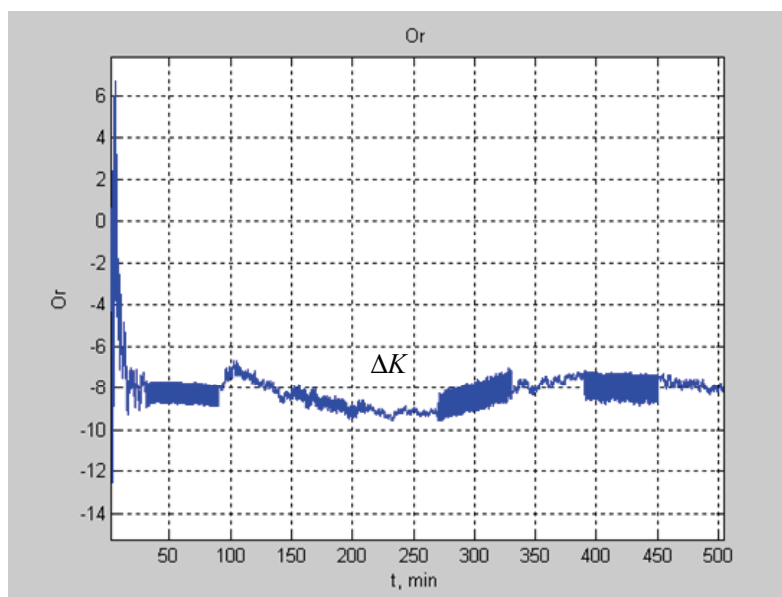


Рис. 2. Погрешность (угл. мин) по курсу ΔK

Из рисунка следует, что погрешность по курсу не превышала 10 угл. мин. как в условиях неподвижного основания, так и при наличии качки (на часовых интервалах времени).

Мореходные испытания проводились на исследовательском судне «Азимут» на Ладожском озере при непрерывном использовании спутниковых данных приемной аппаратуры Javad. В качестве эталона при анализе точности определения курса использовались данные от разработанного в ЦНИИ «Электроприбор» GPS-компас «Вега» с измерительным модулем на ВОГ и двухантенной приемной аппаратурой СНС с разнесением антенн на базе около 19 м [1]. Кроме

того, были использованы данные еще от одного GPS-компаса «ИСОН-1», также разработанного в ЦНИИ «Электроприбор» с антенной базой 1,5 м.



Рис. 3. Расположение антенных модулей: 1 – антенны изделия «ИСОН-1», 2 – антенны изделия «Вега», 3 – антенна приемной аппаратуры Javad

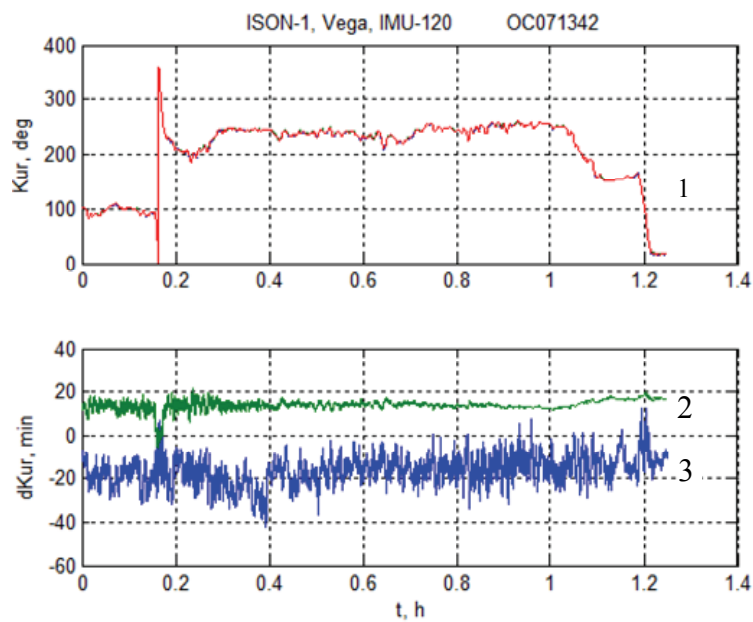


Рис. 4. Погрешности курса (угл. мин), полученного по данным IMU-120, относительно систем «ИСОН-1» и «Вега»: 1 – изменения курса (град); 2 – погрешности относительно «Вега»; 3 – погрешности относительно ИСОН-1

Учитывая, что точность привязки отсчетных баз по курсу IMU-120 ф. IXSEA и GPS-компасов «Вега» и «ИСОН-1» составляла 10...15 угл. мин., можно оценить погрешность получения курса по данным IMU-120 при его коррекции по спутниковым данным во время морских испытаний в пределах 6...10 угл. мин. Это полностью соответствует данным стендовых испытаний.

Так как испытания проводились на широтах примерно 60° , то ожидаемый уровень погрешности по курсу на широте 80° можно оценить следующим образом. Известно, что для погрешности БИИМ по курсу справедливо кинематическое соотношение [10]

$$\Delta K = \frac{1}{\cos \varphi} \tau_{\bullet} + \operatorname{tg} \varphi \cdot \gamma, \quad (2)$$

где $\tau_{\bullet}$ – погрешность построения в алгоритмах БИИМ оси Мира в плоскости, ортогональной плоскости меридиана места, систематическая составляющая которой определяется проекцией дрейфов гироскопов на восточную ось; γ – погрешность построения вертикали места в плоскости первого вертикала, определяемая в основном погрешностями акселерометров.

Полагая, что систематические составляющие погрешностей $\tau_{\bullet}$ и γ практически не зависят от широты места, приближенно можно записать, что для произвольной широты φ

$$\Delta K(\varphi) \cos \varphi = \Delta K(60^0) \cos 60^0 + \gamma(\sin \varphi - \sin 60^0), \quad (3)$$

где $\Delta K(60^0)$ – погрешность по курсу на широте 60^0 , равная ~ 10 угл. мин.

Так как для БИИМ типа **IMU-120** погрешность γ не превышает 1 угл. мин, вторым слагаемым в выражении (3) на широте 80^0 можно пренебречь.

Следовательно, погрешность ΔK по курсу на широте 80^0 приближенно можно записать как

$$\Delta K(\varphi) = \Delta K(60^0) \cos 60^0 / \cos \varphi, \quad (4)$$

и при $\Delta K(60^0) \leq 10$ угл. мин не будет превышать 30 угл. мин.

Определение курса по фазовым измерениям навигационных спутников

Существуют разнообразные методы определения углов ориентации по фазовым измерениям спутниковых систем в условиях, когда их неоднозначность исключена [9]. При определении курса с помощью двухантенной системы на первый план выходит проблема исключения неоднозначности, которая решается с учетом известной длины антенной базы, а определение курса сводится к применению простых геометрических соотношений.

Для работы в условиях ограниченной видимости космических аппаратов (КА) в работе [3] представлен специализированный алгоритм определения курса. Его особенностью является то, что он позволяет получить курсовое решение по всей совокупности вторых разностей фазовых измерений, относящихся к различным моментам времени. При этом снимается требование одновременного наблюдения четырех и более КА для достоверного исключения фазовой неоднозначности, которое предъявляется к алгоритмам, рассчитанным на выработку показаний по текущим измерениям. Такое требование зачастую невыполнимо на буровой установке и платформе, где значительная часть небесной полусферы может быть затенена металлическими конструкциями. Наряду с этим приемом в алгоритме используются уже внедренные и апробированные в изделиях «Вега» и «ИСОН-1» [1] способы сокращения вычислительных затрат при обработке фазовых измерений [6]. Следует также отметить использование в алгоритме широко распространенного при исключении неоднозначности фазовых измерений LAMBDA-преобразования, которое облегчает поиск наиболее достоверного целого числа фазовых периодов [7].

В работе [3] представлены результаты натурных испытаний, демонстрирующие эффективность этого алгоритма при ограниченных секторах видимости.

Анализ полученных результатов позволил выработать следующие рекомендации по размещению антенн в интересах точности курсоуказания:

а) при открытой верхней полусфере антенную базу следует ориентировать в направлении север–юг;

б) при ограниченном секторе видимости КА антенную базу следует размещать примерно по биссектрисе угла, определяющего сектор видимости;

в) следует избегать размещения антенн к северу от препятствий, блокирующих прохождение сигналов от КА.

По возможности данные рекомендации учитывались при проведении описанных ниже испытаний вблизи и непосредственно на мобильной буровой установке (МБУ).

В ходе испытаний использовались фазовые измерения и вспомогательные навигационные данные GPS, поступающие от ИСОН-1 с двухантенным блоком при базе 1,5 м. В этой системе используются два приемника спутниковой навигации МПВ 1К-161, серийно изготавливаемые ОАО РИРВ [8]. Поскольку ИСОН-1 предназначена для выработки показаний по текущим измерениям в интересах судовождения, она малоприспособлена для применения на буровой установке, где приходится сталкиваться с ограниченной видимостью КА. Поэтому решение проводилось с помощью указанного специализированного алгоритма в камеральном режиме. При этом минимальная длительность была установлена в 1 ч. В качестве эталонного средства при проведении испытаний применялся гиротеодолит и два автоколлимационных теодолита, с помощью которых определялся азимут нормали к плоскости зеркала, закрепленного на кронштейне антенного блока.

Испытания проводились на территории базы Национального минерально-сырьевого университета «Горный» в пос. Ульяновка Ленинградской области. Головная часть МБУ была ориентирована на юг. Всего было проведено 6 экспериментов с различными вариантами размещения антенного блока. При проведении испытаний учитывались указанные выше рекомендации а) и б). В связи с чем антенный блок во всех экспериментах (кроме второго) устанавливался с азимутом примерно в 180°. На рис. 5 показан вид МБУ сбоку с указанием мест расположения антенного блока в каждом эксперименте. Варианты размещения антенного блока № 4 и 5 представлены на рис. 6.

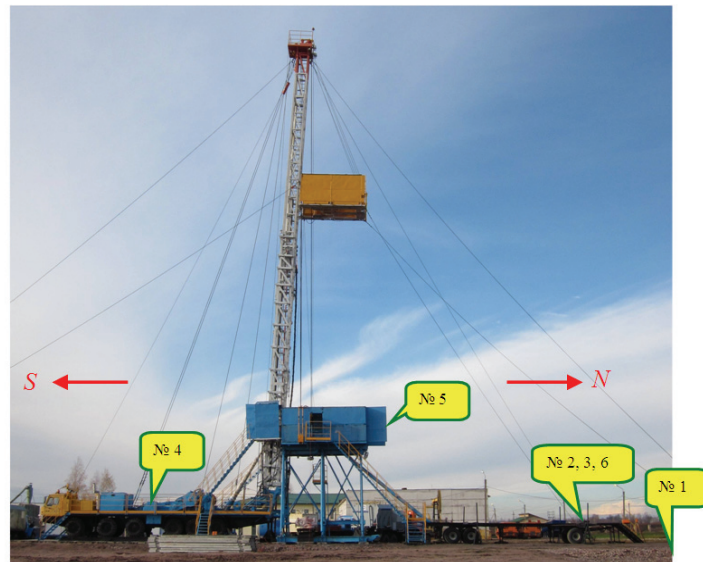


Рис. 5. Общий вид МБУ и места размещения антенного блока для шести экспериментов

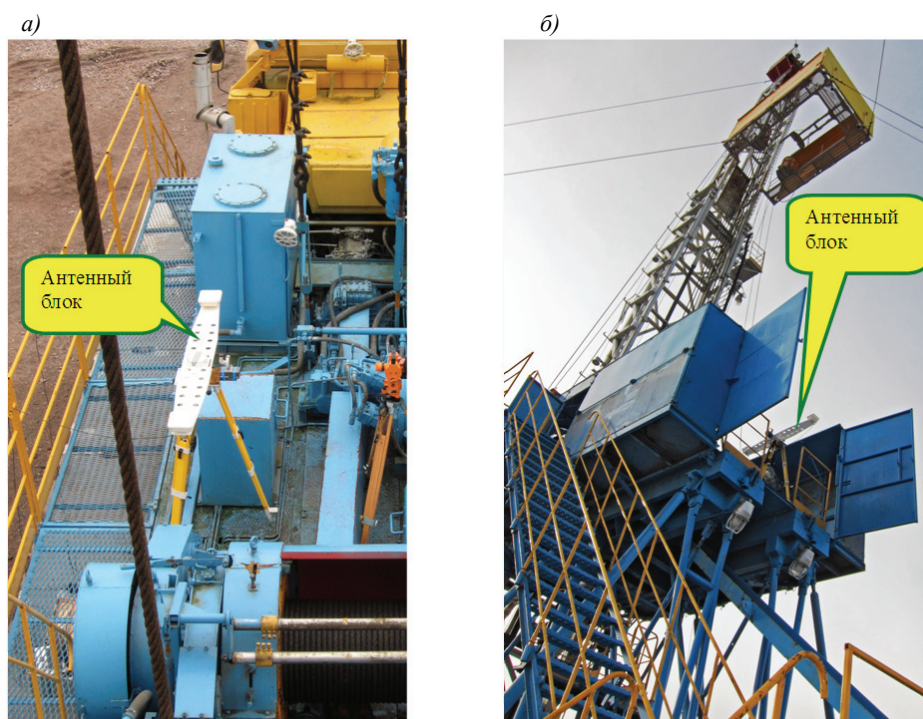


Рис. 6. Расположение антенного блока в экспериментах № 4 (а) и № 5 (б)

Результаты испытаний сведены в таблице, где кратко описано расположение антенного блока, курсовое решение и его ошибка. При оценке полученных результатов следует иметь в виду, что северная часть полусферы, как было установлено по результатам экспериментов [3], является значительно менее благоприятной для точности курсового решения из-за малого числа доступных для наблюдения КА, а также по причине их низкого расположения над горизонтом и, как следствие, повышенных помех. Этим обстоятельством объясняется низкая точность курсового решения в экспериментах № 2, 3, 5 и подтверждается актуальность рекомендации в).

№	Место размещения антенного блока	Время, ч	Азимут, град	Ошибка, град
1	На грунте в 40 м к северу от МБУ	1	180.39	-0.15
2	На приемных мостках (северная сторона МБУ)	1	266.05	-0.84
3	На приемных мостках (северная сторона МБУ)	1	183.89	0.75
4	На платформе верхового оборудования (южная сторона МБУ)	1	184.04	-0.13
5	На буровой площадке с ограждением при открытых створках на север	1.8	186.64	1.29
6	На приемных мостках (северная сторона МБУ)	1	186.05	-0.41

Отметим, что в эксперименте № 5 (см. рис. 6, б), который проводился на буровой платформе, откуда имеется непосредственный доступ к скважине, ситуация существенно усугубляется крайней ограниченностью наблюдаемого пространства и многочисленными переотражениями спутниковых сигналов от дна и ограждения платформы, состоящего из сплошных металлических листов. Во

время проведения эксперимента № 5 открывались створки ограждения, которые давали доступ к небольшому северному сектору небесной полусферы, где сравнительно мало доступных для наблюдения КА. Еще одним фактором, негативно отразившимся на точности определения курса в данном эксперименте, является недостаточная длина реализации измерений – около 2 ч. Тогда как для получения достоверного решения в подобной ситуации, как следует из результатов [2], требуется ориентировочно 4–6 ч.

В то же время примечательно, что в эксперименте № 4 (см. рис. 6, а) выступающие фрагменты МБУ (лебедки и редукторы) не помешали достичь высокой точности курсоуказания. Эксперимент № 1 продемонстрировал возможность получения приемлемой точности курсового решения при размещении антенного блока на умеренном (~40 м) удалении от МБУ, близком к высоте буровой вышки.

Заключение

1. Использование инерциального измерительного модуля на ВОГ IMU-120 при его коррекции по позиционным и скоростным спутниковым измерениям обеспечивает определение курса платформы для начальной выставки инклинометра как для неподвижного основания, так и в условиях качки с погрешностью не более 10 угл. мин на широте около 60° и не более 0,5° на широте 80°.

2. При использовании специально разработанного алгоритма обработки спутниковых фазовых измерений, предполагающего их накопление примерно в течение часа и разрешение неоднозначности по завершении времени накопления, показано, что точность определения курса обеспечивается на уровне 0,2° при размещении антенного блока непосредственно на платформе МБУ к югу от буровой вышки, а также на удалении от МБУ на расстояние, сопоставимое с высотой вышки; на уровне 1° при размещении антенного блока на платформе МБУ к северу от буровой вышки.

При размещении антенного блока непосредственно на буровой площадке с доступом к узкому северному сектору небесной полусферы и при воздействии многочисленных переотражений от сплошных металлических стенок погрешность определения курса оказывается неприемлемой.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Блажнов Б.А.** Опыт разработки двухантенной спутнико-инерциальной системы / Б.А. Блажнов [и др.] // Реферат докл. на XXVIII конф. памяти Н.Н.Острякова // Гироскопия и навигация. – 2012. - № 4. – С. 123-124.
2. **Емельянец Г.И.** О калибровке БИИМ на ВОГ в условиях стенда / Г.И.Емельянец, Е.В.Драницына, Б.А.Блажнов // Гироскопия и навигация. - 2012.-№ 3(78).- С.55 – 64.
3. **Кошаев Д.А.** Определение курса по фазовым измерениям в условиях ограниченной видимости навигационных спутников на неподвижном основании // Гироскопия и навигация. – 2013. - № 1. – С.64-78.
4. **Первовский В.С.** Азимутальная выставка гириноклинометров для скважин произвольной ориентации с использованием GPS-компыаса / В.С. Первовский, Я.И. Биндер // Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики. - 2009.- № 57.- С. 41-46.
5. **Галимов И.Т.** Устройство для проверки показаний азимута инклинометров с применением систем спутниковой навигации / И.Т. Галимов, В.М. Коровин // Научно-технический вестник «Каротажник», АИС.- Тверь, 2012 г. -Вып. № 2.- С. 62-65.
6. **Блажнов Б.А.** Определение относительной траектории движения и углов ориентации по фазовым спутниковым измерениям и данным микромеханического гироскопа / Б.А.Блажнов, Д.А.Кошаев // Гироскопия и навигация. - 2009. -№ 4.- С. 15-34.

7. **De Jong P.J.** Computational Aspects of the LAMBDA Method for GPS Ambiguity Resolution / De Jong P.J., Tiberius C.C.J.M., Teunissen P.J.G. // Proc. of ION GPS-96. Sept. 17-20, 1996, Kansas City, Missouri.
8. <http://www.rirt.ru>
9. **Степанов О.А.** Исследование методов решения задачи ориентации с использованием спутниковых систем / О.А.Степанов, Д.А.Кошаев // Гироскопия и навигация.- 1999.- N 2.- С. 30-54.
10. **Анучин О.Н.** Интегрированные системы ориентации и навигации для морских подвижных объектов / О.Н.Анучин, Г.И.Емельянцеv. - СПб.: ЦНИИ «Электроприбор», 2003.- 389 с.
11. <http://www.marinetec.com/ru/catalogue/products>
12. <http://www.ppk.perm.ru>
13. <http://www.antarsat.ru>
14. <http://www.ixsea.com/en/products>
15. <http://www.elektropribor.spb.ru/prod/>
16. <http://www.km.kongsbergb.com>

Abstract. The paper analyzes the methods to design tools for azimuth alignment of downhole gyroinclinometers in polar areas up to 80 deg N. The required accuracy may be achieved using FOG IMU-based gyro heading indicator or two-antenna satellite navigation system phase measurements. Test results for research prototypes of gyroinclinometer initial alignment system designed by Concern SCRI Elektropribor, JSC are presented.

Key words: downhole gyroinclinometers, heading indicators, stabilizer gyrocompass, marine mobile objects

Материал поступил 25.06.13