

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ МАКЕТА НАЗЕМНОГО ПРИБОРА ОРИЕНТАЦИИ

Белянин Л. Н., Ву Доан Кет
Национальный исследовательский Томский политехнический университет
634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30
E-mail: doanket@tpu.ru

METHOD FOR EXPERIMENTAL RESEARCH OF THE MAQUETTE OF THE GROUND ORIENTATION DEVICE

Lev Belyanin, Ket Vu
Tomsk Polytechnic University
Russia, Tomsk, Lenin ave., 30, 634050
E-mail: doanket@tpu.ru

Приводится методика проведения экспериментальных исследований макета наземного прибора ориентации. Исследования проводятся в три этапа: калибровка акселерометров и датчика угловой скорости; проверка предложенных порядка замеров и алгоритма вычисления угла, характеризующего ориентацию проекции вектора угловой скорости вращения Земли на экваториальную плоскость прибора и оценка степени влияния дефектов датчика угловой скорости на точность определения этого угла; проверка разработанных алгоритмов вычисления параметров ориентации прибора (углов Эйлера–Крылова).

The method for experimental research of the maquette of the ground orientation device is given. This research is divided into three stages: accelerometers and angular velocity sensors calibration; checking of proposed measurements order and algorithm for calculating the angle, characterizing orientation of projection of the angular velocity vector of the Earth's rotation on the device equatorial plane and estimation of the influence degree of the angular velocity sensor defects on the accuracy of determining this angle; checking of developed algorithms for calculating device orientation parameters (Euler-Krylov angles).

Наземный прибор ориентации представляет собой систему аналитического гирокомпасирования. Отличительными особенностями исследуемой системы являются, во-первых, использование не двух (или трёх) датчиков угловой скорости (ДУС), а одного, установленного на вращающейся платформе [1]. Во-вторых, предложен алгоритм вычисления азимутального угла, основанный на отсчётах угла поворота платформы в те моменты времени, когда сигнал с ДУС, изменяющийся по гармоническому закону, становится равным нулю. Снимая отсчёты при вращении платформы в одну сторону, а затем в другую сторону и учитывая, кроме того, знак производной выходного сигнала ДУС, можно определить угол ε_N . Последний характеризует ориентацию проекции вектора угловой скорости вращения Земли на экваториальную плоскость прибора (плоскость OXY) [1]. Такой метод позволяет исключить влияние на точность определения угла ε_N смещения нуля ДУС, изменения крутизны его характеристики, запаздывания (сдвига фазы) при условии, что в процессе замеров (в пуске) указанные параметры остаются постоянными. Измерения при вращении платформы на несколько оборотов в одну сторону, а затем на такое же количество оборотов в другую сторону позволяют, кроме того, уменьшить ошибку, вызванную наличием шума в выходном сигнале ДУС. Определением угла ε_N заканчивается первая стадия измерений и вычислений.

На второй стадии по показаниям акселерометров при известной величине ускорения силы тяжести вычисляются углы Θ и Φ , характеризующие ориентацию прибора по отношению к вертикали места. После этого азимутальный угол Ψ вычисляется по разработанному алгоритму как функции от углов Θ , Φ и ε_N .

Конкретные цели экспериментальных исследований вытекают из описанных выше порядка замеров и используемых при этом разработанных авторами алгоритмов вычислений:

– определение эффективности подавления влияния дефектов ДУС на точность определения угла ε_N , а также определение достижимой точности определения этого угла на макете НПО при вертикальном положении оси OZ ;

– экспериментальная проверка алгоритмов вычисления углов ориентации прибора при его произвольной ориентации относительно горизонтальной, географически ориентированной системы координат и оценка точности определения этих углов.

В макете НПО использован двухкомпонентный ДУС на основе динамически настраиваемого гироскопа, у которого при проведении экспериментов использовался только один канал измерения – канал Y .

В экспериментальных исследованиях можно выделить три этапа.

На первом этапе осуществляется калибровка акселерометров и двухкомпонентного ДУС. Для этого НПО устанавливается на двухкоординатную оптическую делительную головку так, чтобы ось OZ связанной с корпусом прибора системы координат совпадала с осью шпинделя делительной головки. Последняя закрепляется на первом испытательном столе так, чтобы ось шпинделя была строго вертикальна. Контроль осуществляется с помощью оптического квадранта.

Начальное положение осей связанной с платформой системы координат (осей чувствительности ДУС) в азимуте определяется с помощью наземного гироскопического компаса типа 1Г17 с автоколлимационной зрительной трубой и прецизионного зеркала, закреплённого на платформе макета НПО. Гироскопическим компасом определяется азимут перпендикуляра к плоскости зеркала, совпадающего с направлением оси OY_{II} [1]. Основной прибор гироскопа при этом устанавливается на втором испытательном столе. Испытательные столы представляют собой массивные стальные плиты, закреплённые на кронштейнах. Последние замурованы в капитальную стену здания, удалённого от транспортных магистралей и других источников вибраций.

При калибровке акселерометров оси их чувствительности последовательно переводятся в горизонтальное положение (устранение смещения нуля), а затем в строго вертикальное (обеспечение заданной крутизны характеристики акселерометра). Для этого ось шпинделя делительной головки переводится в горизонтальное положение. Достижение заданной крутизны обеспечивается подбором номиналов резисторов в преобразователях «ток – напряжение» акселерометров ($ПТНА_x$ и $ПТНА_y$) [1].

При калибровке каналов измерения ДУС ось чувствительности калибруемого канала переводится в горизонтальное положение и ориентируется в направлении Восток – Запад. В таком положении подбором номиналов резисторов в схемах компенсации усилителей-преобразователей $УПДУС_x$, $УПДУС_y$ устраняется смещение нулей. После этого разворотом в азимуте на 90° ось чувствительности переводится в плоскость географического меридиана. В таком положении путём подбора номиналов резисторов в схемах $ПТНД_x$, $ПТНД_y$ обеспечивается требуемая крутизна характеристики каналов ДУС. Последняя определяется как отношение величины горизонтальной проекции угловой скорости вращения Земли $\Omega_3 \cdot \cos \varphi_0$ к выходному напряжению калибруемого канала. Ω_3 – величина угловой скорости вращения Земли (15,041 град/час); φ_0 – широта места.

На втором этапе исследований ось OZ макета НПО занимает вертикальное положение. Обеспечивается вращение платформы с постоянной, достаточно малой, скоростью в одну сторону и ведутся отсчёты значений угла ε с учётом знака производной выходного сигнала ДУС в течение интервала времени, за который платформа делает n оборотов. Затем направление вращения меняется на противоположное и при той же величине скорости вращения платформы производятся отсчёты тех же параметров.

Обозначим: $\bar{\varepsilon}_{2i-1\uparrow}$ – значение угла ε при его увеличении (производная по времени сигнала ДУС положительна) в момент срабатывания компаратора К [1]; $\bar{\varepsilon}_{2i\downarrow}$ – то же, при отрицательной производной; $\bar{\varepsilon}_{2i-1\uparrow}$

– значение угла ε при его уменьшении и положительной производной; $\bar{\varepsilon}_{2i\downarrow}$ – то же, при отрицательной производной; i – номер оборота (отсчёта) при вращении платформы в одну и другую стороны.

Искомое значение угла ε_N вычисляется по формуле

$$\varepsilon_N = \sum_{i=1}^n \frac{\bar{\varepsilon}_{2i-1\uparrow} + \bar{\varepsilon}_{2i\downarrow} + \bar{\varepsilon}_{2i-1\uparrow} + \bar{\varepsilon}_{2i\downarrow}}{4n}.$$

При вертикальном положении оси OZ этот угол равен азимутальному углу Ψ . Сравнением угла ε_N с азимутальным углом макета НПО, определённого с помощью гирокомпаса, находится погрешность определения угла Ψ .

Эксперименты проводятся при различных величинах фазовых сдвигов, вносимых ДУС, уровнях шума в выходном сигнале ДУС и при различных величинах скорости вращения платформы.

На третьем этапе проверяются разработанные алгоритмы вычисления углов Эйлера-Крылова Ψ , Θ и Φ , характеризующих ориентацию макета НПО при его различных положениях в азимуте и относительно вертикали. При этом углы Θ и Φ не должны превышать $\pm(15 - 20)$ градусов.

Макет НПО закрепляется на поворотном столе (стенде) КПА-5, способном воспроизводить углы Эйлера-Крылова в диапазонах: Ψ – от 0 до 360° ; Θ – от -40 до $+40^\circ$; Φ – от -50 до $+50^\circ$. Нониусные отсчётные устройства обеспечивают погрешность отсчётов углов Θ и Φ – не более ± 6 угловых минут, угла Ψ – не более ± 3 угловых минуты.

Стенд закрепляется на первом испытательном столе. На втором испытательном столе по-прежнему закреплён основной прибор гирокомпаса. Выставка осей стенда по отношению к горизонтальной, географически ориентированной системе координат производится с использованием уже упоминавшегося оптического квадранта и наземного гироскопического компаса.

Порядок проведения эксперимента следующий.

Платформа стенда приводится в положение, характеризующее выбранными значениями трёх углов: Ψ , Θ , Φ . Переключатель SA_1 переводится в положения «а» и с цифровых вольтметров $ЦВ_x$, $ЦВ_y$ считываются напряжения U_{a_x} и U_{a_y} , характеризующие кажущиеся линейные ускорения a_x и a_y . Величины ускорений вычисляются по формулам

$$a_x = \frac{U_{a_x}}{K_a}; \quad a_y = \frac{U_{a_y}}{K_a},$$

где K_a – крутизна характеристики акселерометров.

Вычисляются главные значения углов Θ , Φ по формулам [2]

$$\Theta^* = \arctg \frac{a_x}{\sqrt{g^2 - a_x^2}}; \quad \Phi^* = \arctg \frac{a_y}{\sqrt{g^2 - (a_x^2 + a_y^2)}},$$

где: g – ускорение силы тяжести в месте расположения НПО.

Если по каким-либо причинам величина ускорения силы тяжести g неизвестна, её можно вычислить по приближённой формуле [3]

$$g = g_0 + 0.0517 \cdot \sin^2 \varphi_0,$$

где g_0 – ускорение силы тяжести в точке, расположенной на экваторе на уровне Мирового океана.

В формуле не учитывается влияние на величину g высоты над уровнем моря. На равнинной местности в лаборатории влияние этого фактора на точность определения величины g незначительно.

Действительные значения углов Θ , Φ определяются с учётом квадранта, в котором лежат углы. В зависимости от знаков выходных сигналов акселерометров имеем: $a_x > 0$ – Θ лежит в первом квадранте; $a_x < 0$ – Θ лежит в четвёртом квадранте; $a_y > 0$ – Φ лежит в первом квадранте; $a_y < 0$ – Φ лежит в четвёртом квадранте.

Переключатель SA_1 переводится в положение «0». Включается вращение платформы сначала в одну сторону, затем в другую и по методике, использованной на втором этапе исследований, определяется значение угла ε_N . Далее находятся значения $\sin \Psi$ и $\cos \Psi$ путём решения следующих уравнений и неравенства

$$\sin^2 \Psi + \cos^2 \Psi = 1; A_1 \cdot \cos \Psi + B_1 \cdot \sin \Psi + C_1 = 0; A_2 \cdot \cos \Psi + B_2 \cdot \sin \Psi + C_2 > 0,$$

где:

$$A_1 = \cos \varphi_0 \cdot \sin \Theta \cdot \sin \Phi \cdot \cos \varepsilon_N - \cos \varphi_0 \cdot \cos \Theta \cdot \sin \varepsilon_N;$$

$$B_1 = -\cos \varphi_0 \cdot \cos \Phi \cdot \cos \varepsilon_N;$$

$$C_1 = -\sin \varphi_0 \cdot \sin \Theta \cdot \sin \varepsilon_N - \sin \varphi_0 \cdot \cos \Theta \cdot \sin \Phi \cdot \cos \varepsilon_N;$$

$$A_2 = \cos \varphi_0 \cdot \sin \Theta \cdot \sin \Phi \cdot \sin \varepsilon_N + \cos \varphi_0 \cdot \cos \Theta \cdot \cos \varepsilon_N;$$

$$B_2 = -\cos \varphi_0 \cdot \cos \Phi \cdot \sin \varepsilon_N;$$

$$C_2 = \sin \varphi_0 \cdot \sin \Theta \cdot \cos \varepsilon_N - \sin \varphi_0 \cdot \cos \Theta \cdot \sin \Phi \cdot \sin \varepsilon_N.$$

Главное значение угла Ψ вычисляется по формуле

$$\Psi^* = \arctg\left(\frac{\sin \Psi}{\cos \Psi}\right).$$

Действительное значение угла Ψ определяется с учетом квадранта, в котором лежит угол, по известным формулам приведения. Номер квадранта находится по соотношению знаков $\sin \Psi$ и $\cos \Psi$.

Проведённые калибровка датчиков и пробные эксперименты показали пригодность описанной методики для выполнения всех трёх этапов исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белянин Л. Н., Ву Доан Кет. Установка для экспериментального исследования макета наземного прибора ориентации. – Настоящий сборник, с. – .
2. Ву Доан Кет. Алгоритмы вычисления параметров в системе ориентации и навигации горнопроходческого комбайна. НАУКА. ТЕХНОЛОГИИ. ИННОВАЦИИ // Сборник научных трудов в 10 ч. / под ред. д.т.н. Гуськова А.В. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2017. – Часть 10. – с. 102–106.
3. Белянин Л. Н. Алгоритмы вычислений в непрерывном гироскопическом инклинометре // Автоматизация и информационное обеспечение технологических процессов в нефтяной промышленности: Сб. статей / Под ред. А. К. Хорькова. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2002. – Т2 – с. 50 – 63.