

УДК 531.383-11:681.7

DOI 10.17285/0869-7035.2015.23.3.126-134

А. В. СОКОЛОВ, А. А. КРАСНОВ, Л. П. СТАРОСЕЛЫЦЕВ, А. Н. ДЗЮБА

### РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ГИРОСКОПИЧЕСКОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ НА ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ГИРОСКОПАХ ДЛЯ АЭРОМОРСКОГО ГРАВИМЕТРА

*Исследуется математическая модель системы гироскопической стабилизации аэроморского гравиметра на базе волоконно-оптических гироскопов ВОГ) с акселерометрической схемой коррекции. Приводятся результаты экспериментальных исследований достижимой точности стабилизации макета гиросtabilизатора на ВОГ. Особенность экспериментальных исследований заключалась в том, что контур безредукторной следящей системы строился на базе поплавковых интегрирующих гироскопов, а волоконно-оптические гироскопы, установленные на внутреннем кольце гиросtabilизатора, использовались для расчета динамических погрешностей стабилизации, вызванных возмущениями безредукторной следящей системы на качке. Оценка точности расчета погрешностей динамической стабилизации по данным ВОГ производилась с привлечением автоколлимационных измерений.*

**Ключевые слова:** гироскопическая стабилизация, волоконно-оптический гироскоп, аэроморской гравиметр.

#### Введение

Гравиметрическая съемка с подвижных объектов является одним из основных методов изучения гравитационного поля Земли [1–9]. Для решения этой

---

**Соколов** Александр Вячеславович. Кандидат технических наук, зам. ген. директора по инновациям АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Университет ИТМО (С.-Петербург). Член секции молодых ученых международной общественной организации «Академия навигации и управления движением».

**Краснов** Антон Алексеевич. Начальник сектора АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Университет ИТМО.

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

**Дзюба** Андрей Николаевич. Инженер АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Университет ИТМО.

Статья по докладу на XXII Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам, 2015.

задачи АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» разрабатывает высокоточные гравиметрические комплексы серии «Чекан», система гироскопической стабилизации которых построена на основе поплавковых гироскопов, обеспечивающих погрешность менее угловой минуты в частотном диапазоне угловых колебаний носителя [10–12]. Применение волоконно-оптических гироскопов (ВОГ) для системы гироскопической стабилизации чувствительного элемента гравиметра позволит снизить себестоимость и повысить надежность гравиметрической аппаратуры. Поэтому предметом данной работы является исследование возможности использования ВОГ среднего класса точности с постоянным уходом на уровне 0,1 град/ч в системе гироскопической стабилизации относительного и абсолютного гравиметров.

Работа выполнена в два этапа. Сначала представлена и исследована математическая модель двухосного гиростабилизатора гравиметра на ВОГ с безредукторной следящей системой (БСС) и контуром акселерометрической коррекции (АК) и получены оценки погрешностей стабилизатора на качке. Затем проведены стендовые испытания макета гиростабилизатора на ВОГ в составе гравиметра «Чекан-АМ». По результатам испытаний оценена погрешность стабилизации по данным ВОГ и определены требования к их точностным характеристикам.

### Математическая модель гиростабилизатора гравиметра на ВОГ

На этапе математического моделирования [13, 14] была разработана структурная схема системы стабилизации, полученная синтезом БСС на ВОГ и схемы АК (рис. 1)

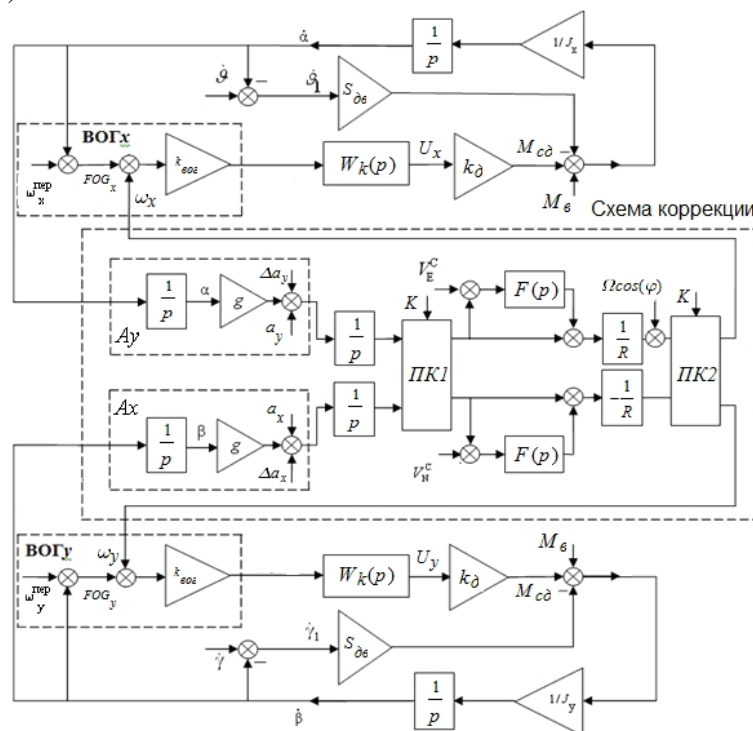


Рис. 1. Структурная схема двухосного гиростабилизатора на ВОГ

Гиростабилизатор гравиметра содержит высокочастотный контур БСС и низкочастотный контур АК.

На рис. 1 приняты следующие обозначения:  $A_x, A_y$  – блок-схема формирования сигналов поперечного и продольного акселерометров;  $ВОГ_x, ВОГ_y$  – блок-схема формирования сигналов поперечного и продольного ВОГ;  $\omega_x^{пер}, \omega_y^{пер}$  – составляющие переносной угловой скорости в связанных осях; ПК1, ПК2 – преобразователи координат;  $\dot{\vartheta}, \dot{\gamma}$  – угловые скорости килевой и бортовой качек;  $\Delta\omega_x, \Delta\omega_y$  – погрешности ВОГ относительно системы координат  $x_{uz}$ , связанной с осями стабилизированной платформы;  $\omega_x, \omega_y$  – сигналы АК;  $\dot{\vartheta}_1, \dot{\gamma}_1$  – угловые скорости вращения ГС относительно объекта;  $a_x, a_y$  – линейные ускорения;  $\Delta a_x, \Delta a_y$  – погрешности акселерометров;  $V_E^C, V_N^C$  – восточная и северная составляющие скорости, выдаваемые аппаратурой потребителя спутниковой навигационной системы;  $J_x, J_y$  – суммарные моменты инерции на осях стабилизации;  $k_d$  – коэффициент передачи двигателя, Н·м/В;  $k_{ВОГ}$  – коэффициент передачи ВОГ, В·с<sup>0</sup>;  $U_x, U_y$  – сигналы, управляющие двигателем, В;  $S_{дв}$  – коэффициент скоростного сопротивления двигателя, Н·м·с,  $\frac{1}{p}$  – оператор интегрирования;  $M_B, M_{сд}$  – возмущающий момент и момент, прикладываемый моментным двигателем;  $J$  – суммарный момент инерции платформы и ротора двигателя;  $W_k(p)$  – передаточная функция (ПФ) корректирующего контура;  $\alpha, \beta$  – динамические погрешности стабилизации;  $K$  – значение приборного курса;  $F(p)$  – демпфирующий фильтр;  $R$  – радиус Земли;  $\Omega \cos(\phi)$  – горизонтальная составляющая угловой скорости вращения Земли.

Математическая модель БСС на ВОГ для одного канала гиростабилизатора описывается уравнениями [15]:

$$\begin{cases} p^2\beta + \omega_p^2\beta = \frac{(M_B - M_{сд})}{J}; \\ M_B = M_{mp} \text{sign} \dot{\gamma}_1 + K_{жг} \gamma_1 + M_{ост} \sin(-2mz) + M_{неб}; \\ M_{сд} = [K_d + \Delta K_d \cdot \sin(-z\gamma_1)] \cdot U - S_{дв} p \gamma_1; \\ U = \kappa_{ВОГ} \cdot W_k(p) \cdot (p\beta + v_{ВОГ}); \\ \beta = (\gamma - \gamma_1), \end{cases} \quad (1)$$

где  $J$  – суммарный момент инерции платформы и ротора двигателя;  $\omega_p$  – собственная частота карданова подвеса;  $U$  – сигнал управления двигателем;  $\beta$  – динамическая погрешность стабилизации;  $M_{тр}$  – момент сил сухого трения на оси стабилизации;  $K_{жг}$  – коэффициент упругости жгута проводников;  $M_{ост}$  – остаточный момент моментного двигателя;  $M_{неб}$  – момент небаланса платформы;  $K_d$  – коэффициент передачи двигателя по моменту;  $\Delta K_d$  – коэффициент пульсации моментного двигателя;  $z$  – число зубцов на роторе моментного двигателя;  $m$  – число фаз силовой обмотки моментного двигателя;  $v_{ВОГ}$  –

нескомпенсированный дрейф ВОГ;  $\gamma$  – угол качки;  $\gamma_1$  – угол поворота стабилизируемой платформы относительно плоскости качающегося объекта.

Второй канал БСС по другой оси стабилизации описывается аналогичным выражением.

Так как ВОГ измеряют угловую скорость погрешности стабилизации, то для устранения ухода платформы, вызванного возмущением БСС на качке, необходимо использовать корректирующий контур с астатизмом первого или второго порядка [15].

Используя результаты, полученные в работе [15], получим ПФ БСС с астатизмом первого порядка в виде

$$W_k(p) = \frac{K_k (1 + T_2 p)}{p(1 + T_3 p)}, \quad (2)$$

где  $T_2, T_3$  – постоянные времени, выбираемые исходя из необходимости обеспечения требуемого запаса устойчивости БСС,  $K_k$  – коэффициент передачи корректирующего контура.

Можно показать, что ПФ разомкнутого канала БСС запишется в виде

$$W(p) = \frac{K_\Omega (1 + T_2 p)}{p(1 + T_c p)(1 + T_3 p)}, \quad (3)$$

где  $K_\Omega$  – добротность по скорости,  $T_c = \frac{J}{s_{сд}}$  – постоянная времени стабилизации.

Увеличивая коэффициент  $K_k$  в корректирующем контуре БСС (2), можно добиться снижения максимальной динамической погрешности стабилизации до требуемого уровня.

Схема формирования сигналов АК, приведенная на рис 2, придает гиростабилизатору гравиметра свойства короткопериодной гировертикали, демпфированной по скоростным измерениям.

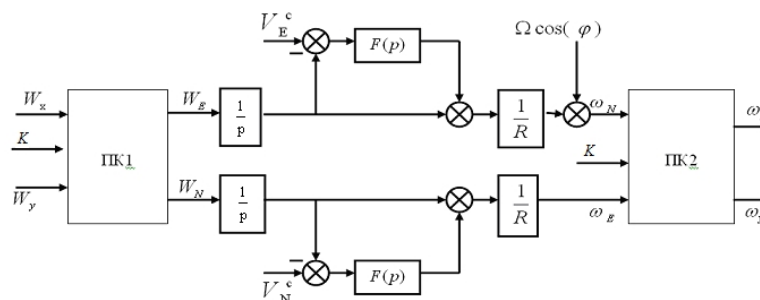


Рис. 2. Схема формирования сигналов коррекции ВОГ

На рис. 2 обозначены:  $W_x, W_y$ ;  $W_E, W_N$  – измерения горизонтальных акселерометров в связанных и горизонтных осях;  $\omega_N, \omega_E$  – сигналы коррекции в горизонтных осях;  $\omega_x, \omega_y$  – сигналы коррекции в связанных осях.

Акселерометры измеряют проекции кажущегося ускорения на собственные оси и используются как датчики положения платформы относительно отвесной линии (4):

$$\begin{cases} W_x = a_x - \alpha g; \\ W_y = a_y - \beta g, \end{cases} \quad (4)$$

где  $a_x, a_y$  – линейные ускорения;  $\alpha, \beta$  – погрешности стабилизации.

Сигналы коррекции  $\omega_x, \omega_y$  содержат информацию о проекциях переносной угловой скорости на связанные оси и о дрейфах ВОГ. Вычитая из сигналов ВОГ сигналы коррекции  $\omega_x, \omega_y$ , получаем оценку относительной угловой скорости движения платформы, т.е. оценку угловой скорости погрешности стабилизации:

$$\begin{cases} FOG_x - \omega_x = \dot{\alpha} + v_{\text{вог}_x}; \\ FOG_y - \omega_y = \dot{\beta} + v_{\text{вог}_y}, \end{cases} \quad (5)$$

где  $FOG_x, FOG_y$  – измерения поперечного и продольного ВОГ;  $\dot{\alpha}, \dot{\beta}$  – угловые скорости погрешности стабилизации;  $v_{\text{вог}_x}, v_{\text{вог}_y}$  – некомпенсированные дрейфы поперечного и продольного ВОГ.

Разностный сигнал, стоящий в левой части выражения (5), используется в контуре управления БСС.

Схема, представленная на рис. 2, инвариантна к линейным ускорениям носителя.

Фильтр  $F(p)$  предназначен для демпфирования шулеровских колебаний, а постоянная времени фильтра выбирается исходя из обеспечения минимизации дисперсии случайных погрешностей гировертикали в установившемся режиме. Случайные погрешности гировертикали обусловлены прежде всего случайными составляющими погрешностей ВОГ, поэтому при синтезе фильтра  $F(p)$  необходимо иметь информацию о характере случайных погрешностей ВОГ.

В работе [16] принято следующее выражение для передаточной функции  $F(p)$ :

$$F(p) = \frac{1}{2} \left( \frac{T_{\text{ш}}}{T} \right)^2 \frac{aTp+1}{bTp+1}, \quad (6)$$

где  $T_{\text{ш}}$  – постоянная времени Шулера,  $T$  – постоянная времени вертикали,  $a, b$  – коэффициенты, определяющие характер переходного процесса гировертикали. Выбор структуры фильтра  $F(p)$  для контура вертикали подробно рассмотрен в работах [17, 18].

Погрешности ВОГ  $\Delta\omega_x, \Delta\omega_y$  описываются в виде суммы постоянной  $\bar{\delta}$  и случайной  $\tilde{\delta}$  составляющих:

$$\Delta\omega = \bar{\delta} + \tilde{\delta}, \quad (7)$$

$$\tilde{\delta} = \tilde{w} + v, \quad (8)$$

где  $\bar{\delta}$  – постоянный уход гироскопа (0,1 град/ч);  $v$  – белый шум интенсивности  $q^2$ ;  $\tilde{w}$  – интеграл от белого шума интенсивности  $q_1^2$  [19], описывающий низкочастотный дрейф ВОГ.

Для используемых ВОГ  $\bar{\delta} = 0,1$  град/ч,  $q = 0,015$  град $\sqrt{\text{ч}}$ ;  $q_1 = 0,0036$  град $\sqrt{\text{ч}}$ .

ВОГ также имеют зону нечувствительности на уровне  $\Delta\omega = 1,0$  град/ч.

На рис. 3 представлены результаты моделирования динамической погрешности гиросtabilизации гравиметра на ВОГ на качающемся основании, полученные численным интегрированием уравнений (1) с заданными параметрами БСС. Качка основания моделировалась в виде гармонического процесса с заданными амплитудой и периодом колебаний. Постоянная времени гировертикали определена методом локальных аппроксимаций [19, 20], и для данного характера случайных погрешностей ВОГ  $T = 5$  с.

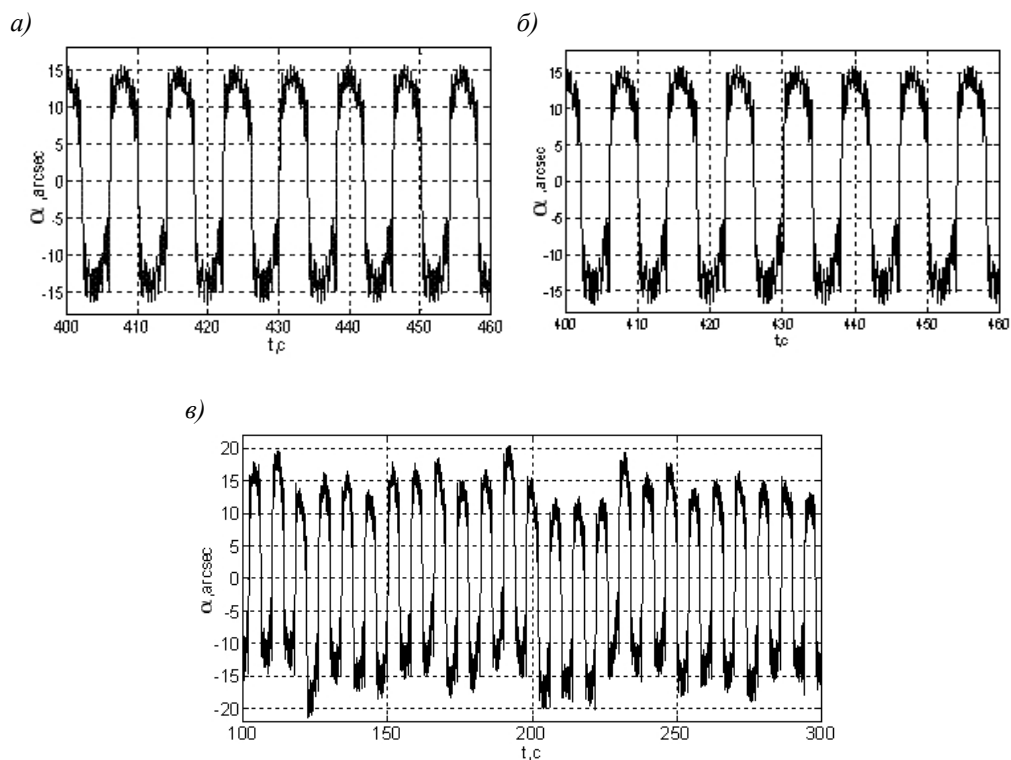


Рис. 3. Динамическая погрешность стабилизации в установившемся режиме на качающемся основании (качка –  $12^\circ 8''$ ): а – погрешности стабилизации при отсутствии погрешностей ВОГ и акселерометров; б – погрешности стабилизации при наличии зоны нечувствительности у ВОГ; в – погрешности стабилизации при наличии случайных погрешностей ВОГ

Как видно из сравнения рис. 3, а и 3, б, наличие зоны нечувствительности ВОГ на уровне  $1,0$  град/ч практически не оказывает влияния на точность стабилизации.

Результаты исследований показали также, что основное влияние на точность стабилизации оказывают низкочастотные дрейфы ВОГ, которые, при наличии астатизма в контуре БСС, обуславливают накопление погрешности стабилизации во времени. Для устранения этого эффекта при сохранении астатизма БСС могут быть выбраны соответствующие параметры фильтра  $F(p)$  контура АК. Выбором постоянной времени фильтра  $F(p)$  можно добиться минимизации СКП среднего значения динамической погрешности стабилизации, вызванного случайным дрейфом ВОГ, до требуемого уровня (3, в).

## Результаты стендовых испытаний макета гиросtabilизатора гравиметра

Для оценки точности стабилизации был изготовлен макет гиросtabilизатора на основе гироплатформы гравиметра «Чекан-АМ», на внутреннем кольце которой вместо чувствительного элемента гравиметра установлен кронштейн с триадой ВОГ. Заметим, что для ВОГ, используемых в гиросtabilизаторе гравиметра, важны низкий уровень шумов, широкая полоса пропускания и малая величина запаздывания выходного сигнала.

В качестве чувствительных элементов системы стабилизации были выбраны гироскопы ВГ035КД фирмы «Физоптика». Точностные характеристики ВГ035КД приведены ниже.

|                                                              |         |
|--------------------------------------------------------------|---------|
| Динамический диапазон, град/с.....                           | 60      |
| Уровень шумов (случайный дрейф), град $\sqrt{ч}$ , $q$ ..... | 0,015   |
| Полоса пропускания, Гц.....                                  | 450     |
| Габаритные размеры.....                                      | Ø130×30 |

Для контроля динамических погрешностей гиросtabilизатора использовался цифровой автоколлиматор в качестве эталонного средства измерения малых углов наклона платформы. Одновременно регистрировались данные автоколлиматора, датчиков углов прецессии (ДУП) поплавковых гироскопов и параметры кватерниона, выработанного по показаниям триады ВОГ [21].

На рис. 4 представлены результаты измерений динамической погрешности стабилизации на качающейся платформе стенда качки при различных возмущающих моментах.

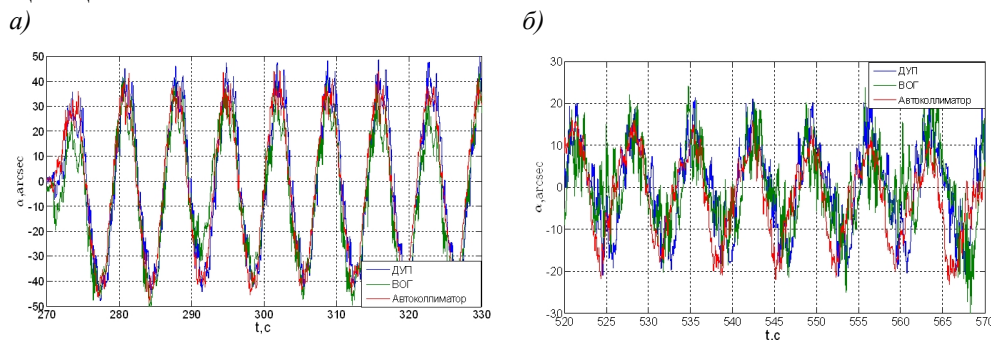


Рис.4. Динамическая погрешность стабилизации на качке, полученная с использованием автоколлимационных измерений, ДУП поплавкового гироскопа и ВОГ при различных возмущающих моментах

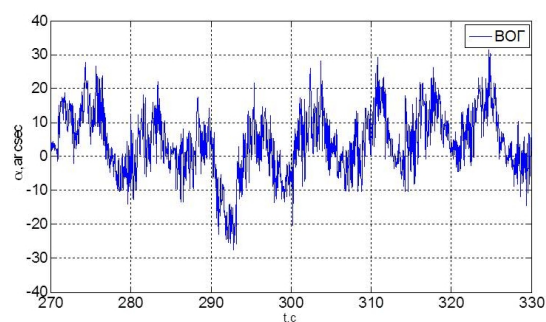


Рис. 5. График погрешности оценки динамической погрешности стабилизации по данным ВОГ

Как видно из графиков, показания ДУП поплавкового гироскопа, ВОГ и автоколлиматора достаточно хорошо коррелированы, что говорит о достоверности измерений.

На рис. 5 приведен график погрешности оценки динамической погрешности стабилизации по данным ВОГ, полученный путем вычитания данных автоколлиматора и ВОГ, представленных на рис. 4, а.

Видно, что погрешность оценки динамической погрешности стабилизации не превосходит 25 угл. с.

Основное влияние на величину самой динамической погрешности стабилизации, а также на точность ее оценивания (расчета), оказывает задержка выходного сигнала ВОГ, поэтому для повышения точности системы стабилизации необходимо уменьшить запаздывание выходного сигнала ВОГ.

### **Заключение**

Получена и исследована математическая модель гиростабилизатора гравиметра на ВОГ с безредукторной следящей системой и акселерометрической схемой коррекции. Проведено моделирование динамической погрешности стабилизации на качке и показано, что выбором параметров БСС и фильтра акселерометрической коррекции можно снизить ее до требуемого уровня.

Проведены экспериментальные исследования динамической погрешности стабилизации с помощью специально разработанного макета, выполненного на базе гироплатформы гравиметра «Чекан-АМ» с установленной на внутреннем кольце триадой ВОГ фирмы «Физоптика». С использованием данных поплавковых гироскопов, ВОГ и автоколлиматора (как эталонного средства) измерена динамическая погрешность стабилизации и рассчитана погрешность ее оценки. Экспериментальные исследования подтвердили результаты, полученные на этапе моделирования.

Теоретические и экспериментальные исследования показали возможность создания гиростабилизатора аэроморского гравиметра на ВОГ среднего класса точности.

Важно подчеркнуть, что повышение точности используемых ВОГ создает предпосылки для построения курсового канала на основе принципов бесплатформенной инерциальной системы, что особенно важно для гиростабилизатора абсолютного гравиметра.

*Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда  
(проект №14-29-00160).*

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Пешехонов В.Г., Соколов А.В., Элинсон Л.С., Краснов А.А. Результаты разработки и испытаний нового аэроморского гравиметра // XXII Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. - СПб.: АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2015. - С. 173-179.
2. Краснов А.А., Соколов А.В. Изучение гравитационного поля труднодоступных районов Земли с использованием мобильного гравиметра «Чекан-АМ» // Труды Института прикладной астрономии РАН. - 2009. - №20. - С.353-357.
3. Соколов А.В., Усов С.В., Элинсон Л.С., Опыт проведения гравиметрической съемки в условиях выполнения морских сейсмических работ // Гироскопия и навигация. - 2000. - №1 - С. 39-50.
4. Дробышев Н.В., Конешов В.Н., Конешов И.В., Соловьев В.Н. Создание самолета-лаборатории и методика выполнения аэрогравиметрической съемки в арктических условиях // Вестник Пермского университета. - 2011. - №3. - С.37-50.
5. Смоллер Ю.Л., Юрист С.Ш., Федорова И.П., Болотин Ю.В., Голован А.А., Конешов В.Н., Hewison W., Richter T., Greenbaum J., Young D., Blankenship D. Использование аэрогравиметра GT-2A в полярных областях. Международный симпозиум «Наземная, морская и аэрогравиметрия: измерения на неподвижных и подвижных основаниях». - СПб.: ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2013. - С. 30-40. (Yu.L.Smoller, S.S.Yurist,

- I.P.Fedorova, Yu.V.Bolotin, A.A. Golovan, V.N. Koneshov, W. Hewison, T. Richter, J. Greenbaum, D. Young, D. Blankenship. Using Airborne Gravimeter GT2A in Polar Areas).
6. Железняк Л.К., Конешов В.Н., Михайлов П.С., Соловьев В.Н. Использование модели гравитационного поля земли при измерениях силы тяжести на море // Физика Земли. - 2015. - № 4. - С. 103-110.
  7. Болотин Ю.В., Дорошин Д.Р. Адаптивная фильтрация данных авиагравиметрии с использованием скрытых марковских моделей // Вестник Моск. ун-та. Сер. 1: Математика. Механика. - 2011. - № 3. - С. 36-42.
  8. Bolotin Yu.V., Popelensky M.Yu. Accuracy analysis of airborne gravity when gravimeter parameters are identified in flight. Journal of Mathematical Sciences. 2007. T. 146. № 3. С. 5911-5919.
  9. Конешов В.Н., Конешов И.В., Клевцов В.В., Макушин А.В., Смоллер Ю.Л., Юрист С.Ш., Болотин Ю.В., Голован А.А. О способе уточнения аномального гравитационного поля полярных шапок Земли // Физика Земли. - 2013. - № 1. - С. 81-83.
  10. Краснов А.А., Соколов А.В., Элинсон Л.С. Новый аэроморской гравиметр серии «Чекан» // Гироскопия и навигация. - 2014. - №1 - С. 26-34.
  11. Краснов А.А., Соколов А.В., Элинсон Л.С. Результаты эксплуатации гравиметров «Чекан-АМ» // Гироскопия и навигация. - 2014. - №1 - С. 98-104.
  12. Krasnov A.A., Sokolov A.V., Usov S.V. // Gyroscopy and Navigation. - 2011. - Т. 2, № 3. - С. 178-183.
  13. Дзюба А.Н. Исследование путей создания двухосного гиросtabilизатора гравиметра на волоконно-оптических гироскопах. // XV конференция молодых ученых «Навигация и управление движением». - СПб: ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор» - 2013. - С. 46-54.
  14. Дзюба А.Н., Старосельцев Л.П. Моделирование погрешностей гиросtabilизатора гравиметра на волоконно-оптических гироскопах // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. - 2013, №6. - С. 73-78.
  15. Бесекерский В.А., Фабрикант Е.А. Динамический синтез систем гироскопической стабилизации. - Л.: Судостроение, 1968. - 348 с.
  16. Краснов А.А., Одинцов А.А., Семенов И.В. Система гироскопической стабилизации гравиметра // Гироскопия и навигация. - 2009, - № 4. -
  17. Лопарев А.В., Степанов О.А., Челпанов И.Б. Использование частотного подхода при синтезе нестационарных алгоритмов обработки навигационной информации // Гироскопия и навигация. - 2011, № 3. - С. 115 - 132.
  18. Степанов О.А., Лопарев А.В., Челпанов И.Б. Частотно-временной подход к решению задач обработки навигационной информации // Автоматика и телемеханика. - 2014. - №6. - С. 141-163.
  19. Степанов О.А. Основы теории оценивания с приложениями к задачам обработки навигационной информации. Ч.2. Введение в теорию фильтрации. - СПб: ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2012. - 417 с.
  20. Челпанов И.Б., Несенюк Л.П., Брагинский М.В. Расчет характеристик навигационных приборов. - Л.: Судостроение, 1978. - 264 с.
  21. Матвеев В.В., Распопов В.Я. Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем. - СПб.: ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2009. - 280 с.

**Abstract.** A mathematical model of a gyro stabilization system for an air-sea gravimeter is considered. The stabilization system is based on fiber-optic gyroscopes (FOGs) with accelerometer correction loops. The aim of the experimental studies was to estimate attainable accuracy of the FOG-based gyrostabilizer breadboard. In these experiments, the gearless servo system loop included floated integrating gyroscopes, whereas FOGs, mounted on the inner ring of the gyrostabilizer, were used to calculate dynamic stabilization errors caused by disturbances of the gearless servo system at rocking. The calculated dynamic stabilization accuracy obtained with the FOG data was evaluated with the use of autocollimation measurements.

**Key words:** air-sea gravimeter, fiber-optic gyroscopes, stabilization