

ТЕОРІЯ ТА ПРАКТИКА СУЧАСНОГО ПРЕЦИЗІЙНОГО ПРИЛАДОБУДУВАННЯ

УДК 62 – 535 : 526

УРАВНЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ ОСЕЙ ОПОРНО-ПОВОРОТНОГО УСТРОЙСТВА СЛЕДЯЩЕГО ИНСТРУМЕНТА

Задорожний И.С., Задорожний В.И., Черкасский государственный технологический университет, г. Черкассы, Украина

В работе получены формульные выражения для оценки координат движения осей опорно-поворотного устройства системы оптико-электронных средств сбора информации и предложены рекомендации по построению структуры высокоточных приводов наведения осей ОПУ

Вступление

Бурное освоение в последние десятилетия космического пространства привело к тому, что оно буквально «нашпиговано» разнообразным космическим мусором: обломками ракетных двигателей, остатками выработавших свой ресурс искусственных спутников Земли. Все это на различных высотах находится в безвоздушном пространстве над нашими головами и представляет собой реальную угрозу действующим искусственным спутникам Земли, космическим кораблям, пилотируемым орбитальным станциям и космонавтам, работающим в открытом космосе. Достаточно одного небольшого столкновения с летящим обломком ракетного двигателя, и тот же метеоспутник стоимостью в несколько миллионов долларов будет навсегда выведен из строя, превратится в кучу бесполезного мусора, угрожающего к тому же действующим космическим аппаратам.

Только с помощью оптико-электронных средств можно с достаточно высокой степенью вероятности обезопасить орбитальные станции, космические корабли и искусственные спутники Земли, заранее предупредив о надвигающейся опасности наземные службы управления и космонавтов, находящихся в открытом космосе. Создание таких комплексов позволяет проводить постоянный экологический мониторинг околоземного пространства.

Постановка задачи

Однако создание таких оптико-электронных комплексов требует решения ряда задач, связанных с вопросами определения схем построения опорно-поворотных устройств для установки оптических средств и приводов управления ими. В настоящей работе ставится задача определения законов управления осями опорно-поворотного устройства (ОПУ), построенного по горизонтальной схеме (двухосной монтировке).

Решение проблемы

Для однозначного определения координат КО, движущегося по эллипти-

ческим орбитам, рассмотрим следующую полную систему координат из шести независимых параметров (рис. 1а, б) [1]. Параметры i , Ω , ω , позволяют определить положение орбиты КО относительно притягивающего центра (Земли), параметры a и e – размеры и тип орбиты, время τ позволяет произвести временную привязку КО к орбите.

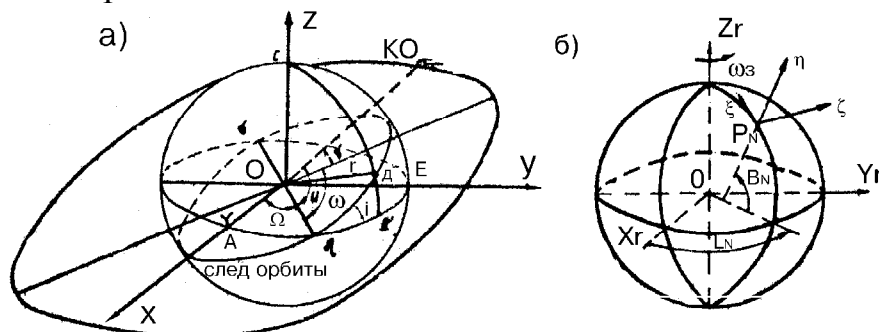


Рис. 1. Система координат движения КО по эллиптическим орбитам, где: i – наклонение орбиты; Ω – долгота восходящего узла; ω – аргумент перигея; a – величина большой полуоси орбиты; e – эксцентриситет орбиты; τ – время прохождения через перигея

Для определения скоростей, ускорений первого и второго порядков по осям горизонтальной системы координат (двухосной монтировки ОПУ) введем следующие системы координат: $OXYZ$ – правая прямоугольная система координат (абсолютная), где ось Z направлена по оси вращения Земли, ось X – в точку весеннего равноденствия, начало – в центре Земли (рис. 1а); $OX_rY_rZ_r$ – подвижная гринвичская система координат, где ось X_r проходит через точку пересечения гринвичского меридиана с экватором, ось Y_r направлена на восток, ось Z_r – по оси вращения Земли, система координат жестко связана с Землей (рис. 1б); $P_N\xi\eta\zeta$ – прямоугольная система координат следящего инструмента, где ось $P_N\xi$ совпадает с касательной к общему земному эллипсоиду в точке P_N и направлена на север (N), ось $P_N\eta$ совпадает с внешней нормалью в точке P_N к эллипсоиду, ось $P_N\zeta$ дополняет систему до правой (рис. 1б); $A_I Z_I$ – альтазимутальная система координат с центром в P_N , где A_I – азимут КО, отсчитываемый от южного направления, а Z_I – зенитное расстояние (рис. 2а); $R_I L_I$ – горизонтальная система координат (двухосная монтировка) (рис. 2б); здесь R_I – полярное расстояние, L_I – долгота.

Координаты КО в абсолютной системе координат через независимые параметры орбиты определяются выражениями, рис.1 [2]:

$$\begin{aligned} x &= r(\cos\Omega\cos U - \sin U \sin\Omega\cos i) , \\ y &= r(\sin\Omega\cos U - \sin U \cos\Omega\cos i) , \\ z &= r \sin U \sin i , \end{aligned} \quad (1)$$

где x, y, z – координаты КО в абсолютной системе; r – радиус орбиты; U – угловое расстояние, $U = \omega + \upsilon$; υ – истинная аномалия.

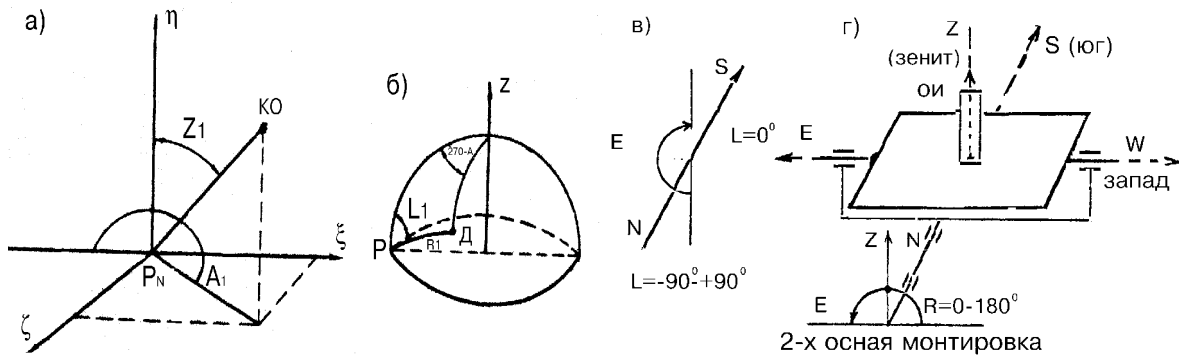


Рис. 2. Система координат ОПУ, где: а) абсолютная, б) подвижная гринвичская, в) горизонтальная (двухосная)

Уравнение орбиты в полярной системе координат имеет вид

$$r = P / (1 + e \cos \upsilon), \quad (2)$$

где P – фокальный параметр, $P = a(1 - e^2)$.

Связь между системами координат $OXYZ$ и $Ox_r Y_r Z_r$ определяется формулами:

$$x_r = x \cos \omega_3 t + y \sin \omega_3 t, \quad y_r = -x \sin \omega_3 t + y \cos \omega_3 t, \quad z_r = z. \quad (3)$$

Связь между системами координат $Ox_r Y_r Z_r$ и $P_N \xi \eta \zeta$:

$$\begin{aligned} \xi &= \delta_{11}(x_r - x_N) + \delta_{12}(y_r - y_N) + \delta_{13}(z_r - z_N), \\ \eta &= \delta_{21}(x_r - x_N) + \delta_{22}(y_r - y_N) + \delta_{23}(z_r - z_N), \\ \zeta &= \delta_{31}(x_r - x_N) + \delta_{32}(y_r - y_N) + \delta_{33}(z_r - z_N), \end{aligned} \quad (4)$$

где $\delta_{11} = -\sin B_N \cos L_N$; $\delta_{12} = -\sin B_N \sin L_N$; $\delta_{13} = -\cos B_N$; $\delta_{21} = \cos B_N \cos L_N$; $\delta_{22} = \cos B_N \sin L_N$; $\delta_{23} = \sin B_N$; $\delta_{31} = -\sin L_N$; $\delta_{32} = \cos L_N$; $\delta_{33} = 0$; B_N ,

L_N – геодезические широта и долгота следящего инструмента; $x_N = (M_N + h_N) \cos B_N \cos L_N$; $y_N = (M_N + h_N) \cos B_N \sin L_N$; $e_1^2 = 2\alpha - \alpha^2$; $\alpha = 1/298,2$; $z_N = [M_N(1 - e^2) + h_N] \sin B_N$; h_N – высота следящего инструмента над поверхностью общего земного эллипсоида; α_1 – полярное сжатие; a_1 – большая экваториальная полуось общего земного эллипсоида, $a_1 = 6378,16$ км.

Из рис. 1а находим:

- если $\xi < 0$, то $\arctg(\zeta / \xi)$, (5)

- если $\xi \geq 0$, то $A = 180 + \arctg(\zeta / \xi)$, $Z_1 = \arctg(\sqrt{\zeta^2 + \xi^2}) / \eta$. (6)

Из сферического треугольника PZD (рис. 2б) для двухосной монтировки определим:

$$L_1 = -\arctg(\tg Z_1 \cos A), \quad R_1 = -\arccos(-\sin Z_1 \sin A). \quad (7)$$

Дифференцируя соотношение (2) по времени t , получаем выражение скорости \dot{r} в виде

$$\dot{r} = [pe \sin \nu \cdot (1 + e \cos \nu)^2] \cdot \dot{\nu}, \quad (8)$$

где $\dot{\nu} = \sqrt{\mu \cdot p} (1 + e \cos \nu)^2 / p^2$. (9)

Дифференцируя выражения (8) и (9), имеем

$$\ddot{r} = \mu \cdot e \cos \nu (1 + e \cos \nu)^2 / p^2, \quad (10)$$

$$\ddot{\nu} = -2\mu e \sin \nu (1 + e \cos \nu)^3 / p^3, \quad (11)$$

Продифференцировав выражения (1) с учетом того, что на фиксированной орбите $\omega = const$, $i = const$, $\Omega = const$, получаем:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \dot{r}(\cos \Omega \cos U - \sin U \sin \Omega \cos i) - r\dot{U}(\cos \Omega \sin U + \cos U \sin \Omega \cos i), \\ \dot{y} &= \dot{r}(\sin \Omega \cos U + \sin U \cos \Omega \cos i) - r\dot{U}(\sin \Omega \sin U + \cos U \cos \Omega \cos i), \\ \dot{z} &= \dot{r}i \sin U \cos i + \dot{r}U \cos U \sin i. \end{aligned} \quad (12)$$

Продифференцировав выражения (12) один раз, находим:

$$\begin{aligned} \ddot{x} &= (\ddot{r} - r\dot{U}^2)(\cos \Omega \cos U - \sin U \sin \Omega \cos i) - (2\dot{r}\dot{U} + r\ddot{U}) \times \\ &\times (\cos \Omega \sin U + \cos U \sin \Omega \cos i), \\ \ddot{y} &= (\ddot{r} - r\dot{U}^2)(\sin \Omega \cos U + \sin U \cos \Omega \cos i) - (2\dot{r}\dot{U} + r\ddot{U}) \times \\ &\times (\sin \Omega \sin U + \cos U \cos \Omega \cos i), \\ \ddot{z} &= (\ddot{r} - r\dot{U}^2) \sin U \sin i + (2\dot{r}\dot{U} + r\ddot{U}) \cos U \sin i, \end{aligned} \quad (13)$$

Дифференцируя выражения (3), имеем:

$$\begin{aligned} \dot{x}_r &= (\dot{x} + y\omega_3) \cos \omega_3 t + (\dot{y} - x\omega_3) \sin \omega_3 t, \\ \dot{y}_r &= -(\dot{x} + y\omega_3) \sin \omega_3 t + (\dot{y} - x\omega_3) \cos \omega_3 t, \\ \dot{z}_r &= \dot{z}. \end{aligned} \quad (14)$$

Дифференцируя выражение (12), получаем:

$$\begin{aligned} \ddot{x}_r &= (\ddot{x} + 2\dot{y}\omega_3 - \omega_3^2 x) \cos \omega_3 t + (\ddot{y} - 2\dot{x}\omega_3 - \omega_3^2 y) \sin \omega_3 t, \\ \ddot{y}_r &= -(\ddot{x} + 2\dot{y}\omega_3 - \omega_3^2 x) \sin \omega_3 t + (\ddot{y} - 2\dot{x}\omega_3 - \omega_3^2 y) \cos \omega_3 t, \\ \ddot{z}_r &= \ddot{z}. \end{aligned} \quad (15)$$

Дифференцируя выражение (4) последовательно два раза, находим:

$$\begin{aligned} \dot{\xi} &= \delta_{11}\dot{x}_r + \delta_{12}\dot{y}_r + \delta_{13}\dot{z}_r, \\ \dot{\eta} &= \delta_{21}\dot{x}_r + \delta_{22}\dot{y}_r + \delta_{23}\dot{z}_r, \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \dot{\zeta} &= \delta_{31}\dot{x}_r + \delta_{32}\dot{y}_r + \delta_{33}\dot{z}_r, \\ \ddot{\xi} &= \delta_{11}\ddot{x}_r + \delta_{12}\ddot{y}_r + \delta_{13}\ddot{z}_r, \\ \ddot{\eta} &= \delta_{21}\ddot{x}_r + \delta_{22}\ddot{y}_r + \delta_{23}\ddot{z}_r, \\ \ddot{\zeta} &= \delta_{31}\ddot{x}_r + \delta_{32}\ddot{y}_r + \delta_{33}\ddot{z}_r, \end{aligned} \quad (17)$$

Дифференцируя соотношения (5), имеем:

$$\dot{A} = \Phi / r_1^2, \quad \dot{Z}_1 = [\eta \cdot p / r_1 - r_1 \dot{\eta}] / \rho^2, \quad (18)$$

$$\ddot{A} = [\psi - 2PA] / r_1^2, \quad \ddot{Z}_1 = \frac{\eta Q - \dot{\eta} P - r_1^2 \ddot{\eta}}{z_1 \rho^2} - \frac{\rho^2 P + 2r_1^2 R_0}{z_1^2 \rho^2} \dot{Z}_1, \quad (19)$$

где $\Phi = \dot{\zeta}\xi - \dot{\xi}\zeta$; $Z_1 = \sqrt{\xi^2 + \zeta^2}$; $\rho^2 = \xi^2 + \eta^2 + \zeta^2$; $P = \xi\dot{\zeta} - \dot{\xi}\zeta$; $R_0 = \zeta\dot{\xi} + \eta\dot{\eta} + \zeta\dot{\zeta}$; $\psi = \xi\ddot{\zeta} - \ddot{\xi}\zeta$; $Q = \xi^2 + \dot{\xi}\zeta + \zeta^2 + \ddot{\zeta}\xi$.

Скорости, ускорения и производные ускорений осей горизонтальной (двухосной) монтировки определим путем дифференцирования выражений (6):

$$\dot{L}_1 = F_1 / C_1, \quad \dot{R}_1 = \gamma_1 / \beta_1. \quad (20)$$

$$\ddot{L}_1 = (D_1 / C_1 - G_1 / C_1) \dot{L}_1, \quad \ddot{R}_1 = (\delta_1 / \beta_1 + \Delta_1 / 2\beta_1^2) \dot{R}_1. \quad (21)$$

где $C_1 = \cos^2 Z_1 (1 + \operatorname{tg}^2 Z_1 \cos^2 A)$; $F_1 = \dot{A} \sin A \sin Z_1 \cos Z_1 - \dot{Z}_1 \cos A$;

$$D_1 = \ddot{A} \sin A \sin Z_1 \cos Z_1 + \dot{A}^2 \cos A \sin Z_1 \cos Z_1 + \dot{A} \dot{Z}_1 \sin A \cos 2Z_1 - \dot{Z}_1 \ddot{A} \cos A + \dot{Z}_1 \dot{A} \sin A$$

$$G_1 = -\dot{Z}_1 \sin 2Z_1 (1 - \operatorname{tg}^2 Z_1 \cos^2 A) + 2\dot{Z}_1 \operatorname{tg} Z_1 \cos^2 A - \dot{A} \sin^2 Z_1 \sin 2A,$$

$$\beta_1 = -\sqrt{1 - \sin^2 Z_1 \sin^2 A},$$

$$\gamma_1 = \dot{Z}_1 \cos Z_1 \sin A + \dot{A} \sin Z_1 \cos A,$$

$$\delta_1 = \ddot{Z}_1 \cos Z_1 \sin A - Z_1^2 \sin Z_1 \sin A + 2\dot{A} \dot{Z}_1 \cos Z_1 \cos A + \ddot{A} \sin Z \cos A - \dot{A}^2 \sin Z_1 \sin A,$$

$$\Delta_1 = \dot{Z}_1 \sin 2Z_1 \sin^2 A + \dot{A} \sin^2 Z_1 \sin 2A.$$

Согласно выражениям (20) и (21) были составлены программы расчета координат и их производных для двухосных монтировок следящего инструмента. В качестве исходных данных были приняты следующие параметры элементов орбиты КО: $R_0 = a_1 = 6378,16 \text{ км}$; $\alpha = 1/298,2$; $\mu = 3,986 \cdot 10^5 \text{ км}^3 / \text{с}$; $B_N = 41^\circ$;

$$L_N = 45^\circ, \omega_3 = 7,2921 \cdot 10^5 / \text{с}, h_N = 0, \varepsilon = 0,$$

$$a = 6450 - 40000 \text{ км}, i = 30^\circ, 60^\circ, 100^\circ, 120^\circ, 150^\circ, \Omega = 120^\circ, 240^\circ, 360^\circ,$$

$$e = 0; 0,4; 0,8 \quad (a = 40000 \text{ км}); e = 0,05 \quad (a = 8800 \text{ км}); e = 0 \quad (a = 6450 \text{ км}),$$

$$0 \leq Z_1 \leq 70^\circ.$$

В качестве независимой переменной была принята истинная аномалия υ , а в качестве критерия оценки конца просчета всех вариантов – условие $0 \leq t \leq 24$ часа, т. е. время, в течение которого Земля совершает один оборот вокруг своей оси со скоростью ω_3 . Условие $\tau = 0$ означает, что в начальный момент $\upsilon = 0$ и $t = 0$. При этом КО находится в точке перигея (П), а гринвичская система координат $OX_r Y_r Z_r$ совпадает с абсолютной системой координат $OXYZ$. Следящий

інструмент (ОПУ) знаходиться на поверхні загального земного еліпсоїда ($h_N = 0$) на широті $B_N = 41^\circ$ і довготі $L_N = 45^\circ$.

Розрахунок координат і їх похідних виконано для двохосної монтировки на ЭЦВМ. Результати розрахунків наведено в таблиці. Максимальні швидкості по осі $L_1 - L_{1\max} = 5,64^\circ/\text{с}$, по осі $\dot{R}_1 - \dot{R}_{1\max} = 3,775^\circ/\text{с}$.

Таблиця – Визначення значень координат руху осей і їх похідних для двохосної монтировки ОПУ

		a , км	e	ω°	i°	Ω°	$\dot{L}_{1\max}$ °/с	$\dot{L}_{1\min}$ °/с	$\ddot{L}_{1\max}$ °/с ²	$\dot{R}_{1\max}$ °/с	$\dot{R}_{1\min}$ °/с	$\ddot{R}_{1\max}$ °/с ²	
Горизонтальная монтировка	1	6450	0	90	100	120	-1,787	-5,64	0,359	1,59	-0,47	0,218	
				90	120	240	-4,16	-0,83	0,188	3,775	0,02	0,234	
	2	8800	0,05	90	100	120	-0,28	-0,069	$8,25 \cdot 10^{-4}$	0,101	-0,05	$4,4 \cdot 10^{-4}$	
				90	120	240	0,187	-0,158	$9,58 \cdot 10^{-4}$	0,151	0,0236	$3,58 \cdot 10^{-4}$	
	3	40000	0	90	100	120	0,00579	-0,00595	$1,16 \cdot 10^{-6}$	0,00598	0,00265	$8,57 \cdot 10^{-7}$	
							0,00946	0,00955	$4,25 \cdot 10^{-6}$	0,015	0,0098	$2,97 \cdot 10^{-6}$	
			0,4	90	120	240	-0,00975	-0,00794	$8,57 \cdot 10^{-7}$	0,00794	0,00354	$1,05 \cdot 10^{-3}$	
							-0,023	0,00666	$5,4 \cdot 10^{-6}$	0,0105	0,00774	$5,5 \cdot 10^{-6}$	
			0,8					-0,294	-0,00967	0,00101	0,0702	0,0155	$9,14 \cdot 10^{-4}$

*Швидкість змінює знак (проходить через 0).

Мінімальні швидкості по осі L_1 і R_1 рівні нулю, причому швидкості руху змінюють знак. Максимальні прискорення становлять $\ddot{L}_{1\max} = 0,094^\circ/\text{с}^2$; $\ddot{R}_{1\max} = 0,254^\circ/\text{с}^2$.

Висновки

1. Виведено рівняння для супроводження КО при встановці оптико-електронного інструмента на двохосній монтировке ОПУ (горизонтальна система координат).

2. Проведено дослідження змін координат руху осей ОПУ і їх похідних при широкому зміні параметрів руху КО: великої півосі орбіти руху КО від $a = 6450$ км до 40000 км, $\omega = 30^\circ; 90^\circ; 150^\circ$; на-

клонениях орбиты КО $i = 30^\circ; 60^\circ; 100^\circ; 150^\circ$; долготы восходящего узла $\Omega = 120^\circ; 240^\circ; 360^\circ$; эксцентриситета орбиты $e = 0; 0,4; 0,8$ и др.

3. Результаты расчета величин изменения координат, скоростей и ускорений для двухосной монтировки ОПУ показали, что максимальные скорости по оси L_1 не превышают $5,64^\circ/\text{с}$; максимальные ускорения составили: $\dot{L}_{1\text{max}} = 0,359^\circ/\text{с}^2$; $\ddot{R}_{1\text{max}} = 0,254^\circ/\text{с}^2$. Полный диапазон изменения скоростей (при допустимой минимальной скорости 15 угл.с) составляет $D_{L1} = 1350$ и $D_{R1} = 905$, а наибольший диапазон скоростей по одной из частных орбит не превышает $D_{д1} = 45$, $D_{к1} = 380$.

4. На основании полученных в работе результатов можно рекомендовать построение оптико-электронных средств поиска и обнаружения КО на основе двухосной монтировки ОПУ и высокоточных приводов с переключением передаточного числа редуктора.

Литература

1. Эльберг П.Е. Введение в теорию полета искусственных спутников Земли. – М.: Наука, 1965. – 436 с.
2. Агаджанов П.А., Дулевич В.Е., Коростелев А.А. Космические траекторные измерения. – М.: Советское радио, 1969. -286 с.
3. Неплохов Б.М. Оценка возможности работы оптического телескопа на азимутальной монтировке при управлении от электронной цифровой системы // Цифровое управление в системах автоматики. – М.: Наука, 1968. – С 26 -30.
4. А.с. № 94491. Система для полуавтоматического азимутального сопровождения./ Задорожний И.С. и др. Оpubл. Бюл. №21.
5. Т. Назаров, А. Богатырев. «Окно» России в горах Таджикистана. http://www.redstar.ru/2005/10/04_10/6_02.html.

Задорожний І.С. Задорожний В.І. **Рівняння руху вісей ОПІ інструмента, що слідкує.** Пропонуються вирази для оцінки координат та похідних руху вісей опорно-поворотного пристрою та рекомендації по побудові структури високоточних приводов наведення.

Zadorozhny I., Zadorozhny V. **Equalizations of motion of axes of the STD watching instrument.**

Expressions for estimation of coordinates are offered and derivative motions of axes of supporting-turning device and recommendation on construction of structure of high-quality drives of aiming.

Надійшла до редакції
27 травня 2007 року

УДК 528.541.4(088.8)

АНАЛИЗ МЕХАНИЗМА КОРРЕКЦИИ ПАРАМЕТРОВ ПОДВЕСКИ В ЖИДКОСТНОМ КОМПЕНСАТОРЕ

Сафарян В.А., Гераимчук М.Д., Национальный технический университет
Украины «Киевский политехнический институт», г. Киев, Украина

Статья посвящена разработке конструкций механизмов ручной и автоматической кор-

рекции геометрических параметров подвески компенсатора, позволяющие исключить ошибки стабилизации визирной линии, в результате воздействия на него температуры окружающей среды

Вступление. Постановка задачи

Одним из основных факторов, влияющих на ошибку стабилизации визирного луча в жидкостных компенсаторах, является термическое изменение показателя преломления, применяемой оптически активной жидкости. Она в основном характеризуется, термическим коэффициентом рефракции Δn_t и равна разности показателя преломления жидкости, при изменении температуры на 1°C . Термический коэффициент в жидкостях, определяется при нормальных условиях и температуре окружающей среды в 20°C . Его величина, при изменении температуры на 1°C в среднем колеблется от 0,0002 до 0.001.

В компенсаторе с жидкостным клином, расположенным в параллельном пучке лучей, перед объективом оптической системы, термическое изменение показателя преломления жидкости вызывает ошибку установки визирного (или лазерного) луча, определяемую по формуле из [1].

$$m_\varepsilon = 2 \cdot \varepsilon \cdot \Delta n_t \cdot \Delta t, \quad (1)$$

здесь ε - угол наклона прибора; Δt - диапазон изменения температуры окружающей среды, соответственно и жидкости. Расчёты показывают, что даже небольшое изменение температуры Δt в $\pm 5^\circ\text{C}$ и угле наклона $\varepsilon = \pm 10'$, приводит к ошибке стабилизации в 3-4", это не приемлемо для компенсирующих устройств, использующихся в измерительных приборах линейно-углового типа. В лучших оптических приборах, средняя квадратическая погрешность компенсации не превышает 0.2-0.5", при угле наклона прибора $\varepsilon = \pm 10'$.

Чтобы избавиться от этой ошибки необходимо, или работать в узком диапазоне рабочих температур, или использовать жидкости с маленьким термическим коэффициентом Δn_t . В первом случае возникают неудобства связанные с ограничением рабочего режима температур, во втором, практически невозможно найти жидкость, или смесь жидкостей [см.2], имеющие постоянный общий показатель n , при смене температуры окружающей среды, например от -30°C до $+30^\circ\text{C}$.

Основной задачей данной статьи, найти решение поставленной проблемы и разработать механизм ручной и автоматической коррекции, позволяющий уменьшить, а в некоторых случаях исключить возникающую ошибку, а вместе с нею снять и все ограничения, связанные с термическим изменением показателя преломления применяемой жидкости. Применение механизма корректировки, позволит расширить возможности и область применения высокочувствительных, широкодиапазонных, жидкостных компенсаторов.

Решение поставленной задачи

Решение поставленной задачи, просматривается полученной в [3] формулы коэффициента механического преобразования K_m , для системы подвески сосуда с жидкостью на скрещенных нитях. Величина полученного коэффициента K_m в

формуле зависит от геометрических параметров подвески, верхней a и нижней базы c , положения центра тяжести (ЦТ) подвешенного сосуда $\pm L$ относительно базы c и угла наклона ε сосуда с жидкостью. Для реализации поставленной задачи предлагается, изменять размер одного из параметров. Изменяя величину коэффициента K_m можно уменьшить, или исключить температурную составляющую ΔK_n .

Для определения связи $\Delta L=f(\Delta n)$, $\Delta a=f(\Delta n)$, определим вначале величину ΔK_n , путём дифференцирования уравнения, описывающего основное условие стабилизации $\alpha=-(n-1) \cdot K_m \cdot \varepsilon$ по Δn , предварительно определив из неё K_m :

$$\Delta K_n = \frac{-\alpha \cdot \Delta n}{(n-1)^2 \cdot \varepsilon}, \quad (2)$$

где α - угол наклона луча; n - показатель преломления жидкости; ε - угол наклона прибора; Δn -изменение показателя преломления от изменения температуры окружающей среды.

Учитывая значения параметров ΔK_L , ΔK_a определенные в [3]:

$$\Delta K_L = \frac{8 \cdot (2 \cdot a \cdot b^2 \cdot c - a^2 \cdot c \cdot h \cdot \varepsilon)}{z^2} \cdot (a-c)^2 \cdot h \cdot \Delta L \quad (3)$$

$$\Delta K_a = \frac{-4 \cdot (b^2 \cdot c - a \cdot h \cdot \varepsilon \cdot c) \cdot Z + (4 \cdot a \cdot b^2 \cdot c - 2 \cdot a^2 \cdot c \cdot h \varepsilon) \cdot \left[3A^2 \cdot c - 2 \cdot h \cdot \varepsilon \cdot c \cdot A - 2a \cdot h \cdot \varepsilon \cdot c + 8 \cdot \left(L - \frac{R}{n} \right) \cdot Ah \right]}{z^2} \cdot \Delta a, \quad (4)$$

и подставляя их в условие (2), выделяя ΔL и Δa , получим искомую функциональную связь, параметров подвески в зависимости от термического показателя преломления жидкости $\Delta L=f(\Delta n)$, $\Delta a=f(\Delta n)$:

$$\Delta L = \frac{1}{8} \cdot \varepsilon \cdot \frac{\Delta n}{(n-1)^2 \cdot \varepsilon \cdot a \cdot c (-2b^2 + ah\varepsilon) \cdot (a-c)^2 \cdot h} \cdot z^2, \quad (5)$$

$$\Delta a = \frac{\varepsilon \cdot \Delta n \cdot z^2}{(n-1)^2 \varepsilon \left[-4(b^2 c - ah\varepsilon \cdot c)z + (4ab^2 c - 2a^2 ch\varepsilon) \left[3A^2 c - 2h\varepsilon c A - 2ah\varepsilon \cdot c + 8 \left(L - \frac{R}{n} \right) Ah \right] \right]}, \quad (6)$$

где a, b, c, h - геометрические параметры подвески;

$z=4b^2 c^2 + (a-c)^3 c - 2ah\varepsilon c(a-c) + 4M(a-c)^2 h$ – знаменатель формулы K_m [3]; ε -угол наклона прибора; Δn -изменение показателя преломления в зависимости от изменения температуры окружающей среды; $A=(a-c)$; M -центр инерции системы подвеса.

Рассмотрим возможность практической реализации поставленной задачи. Как отмечается в [3], конструктивно наиболее удобно менять геометрические параметры подвески a , или L , которые являются наиболее чувствительными к изменению коэффициента K_m . Однако, не равномерное изменение параметра a в точках подвеса на верхней базе, может привести к образованию жидкостного клина и к не допустимому отклонению луча, направленного вверх, к тому же реализация механизма коррекции по параметру a , требует разработки доста-

точно сложной и высокоточной, кинематической связи и электронной системы слежения за температурой [4].

Поэтому, для практической реализации задачи коррекции, выбран параметр L , изменение которого не приводит к упомянутому выше эффекту и позволит упростить решение поставленной задачи, сохраняя при этом равенство основного условия стабилизации и взаимо- компенсирующих коэффициентов:

$$\Delta K_n^t = \Delta K_L, \quad (7)$$

$$\Delta K_n^t = \Delta K_a, \quad (8)$$

Для определения предельных отклонений ΔL , вычислим границы изменения Δn_t в рабочем диапазоне температур $\pm 30^\circ\text{C}$. Учитывая среднее изменение величины термического коэффициента жидкостей $\Delta n_t = 0.0006$, из простых расчётов получаем $\Delta n_t = \pm 0.018$. Построенные по уравнениям (5,6), графики предельных отклонений функций $\Delta L = f(\Delta n)$, $\Delta a = f(\Delta n)$, (рис. 1,2) показывают, что для коэффициентов подвески близких к единице ($K_M \approx 1$), $\Delta L_{\text{пр}} \approx \pm 1.0$ см, для ($K_M \approx 2$), $\Delta L_{\text{пр}} \approx \pm 0.5$ см.

В работе [3] отмечено, что для ручной коррекции ЦТ, можно использовать кольцо-ползунок 2 (см.рис.3), имеющий возможность вертикально перемещаться вдоль стенок сосуда, относительно базы c . Положение кольца относительно базы c можно проградуировать на дополнительной шкале, установленной рядом с температурной. Можно совместить показания термометра с величиной перемещения кольца, предварительно рассчитав необходимый диаметр капиллярной трубки термометра с коэффициентом температурного расширения показывающей жидкости.

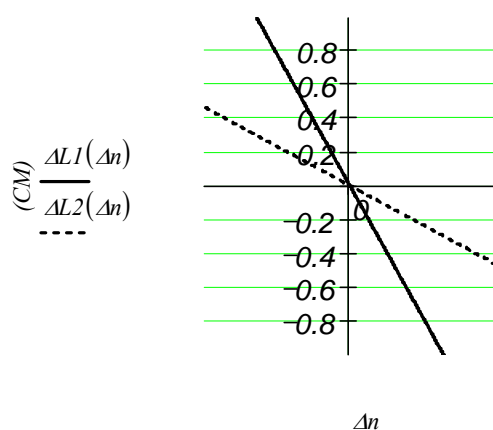


Рис. 1. Графики предельных отклонений ЦТ для подвесок с $K_M \approx 1$ и $K_M \approx 2$.

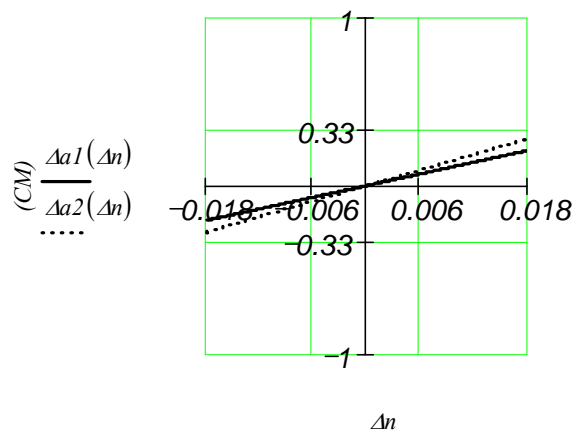


Рис. 2. Графики предельных отклонений базы a подвесок с $K_M \approx 1$ и $K_M \approx 2$.

При автоматической коррекции, положения ползунка (не усложняя конструкцию компенсатора), предлагается использовать биметаллические пружины 3, выполненные в самых разнообразных исполнениях [5]. По предварительным

расчётам, отклонение величины Δh , для различных конструктивных форм пружин (полоса, скоба, плоская спираль, цилиндрическая пружина) колеблется от 0.5 см до 1.2 см, что вполне соответствует предельным отклонениям, полученным на графиках рис.1 и рис.2.

Наиболее приемлемая форма чувствительного элемента (биметаллической пружины), в виду его большого отклонения Δh , может быть выполнена в виде скобы, или плоской и цилиндрической пружины. Для скобы, величина перемещения Δh свободного конца пружины в результате воздействия на неё температуры ΔT будет равна:

$$\Delta h = \alpha \cdot \frac{l^2}{2 \cdot s} \cdot \Delta T, \quad (9)$$

для пружины:

$$\Delta h \approx n \cdot \alpha \cdot \frac{l^2}{2 \cdot s} \cdot \Delta T, \quad (10)$$

здесь α – коэффициент линейного температурного расширения материала пружины, стержня, м/мК; l – длина витка; s – сечение биметаллической пружины, стержня; n – число витков в пружине.

Для сохранения основного условия стабилизации $\alpha = -(n - 1) \cdot K_m \cdot \varepsilon$, необходимо, при увеличении температуры, увеличить коэффициент механической компенсации, а при понижении температуры относительно условного нуля (например, 20°C)-уменьшить K_m .

Для автоматического выполнения данного условия, необходимо, изменить параметр L_t на величину $\pm \Delta L_t$ (см.рис.3), приподняв, или опустив кольцо относительно базы c (смещение вверх ЦТ, определяется знаком -, смещение вниз знаком +). Изменение параметра ΔL_t , осуществляется в результате распрямления или сжатия биметаллической пружины 3, на которой закреплено кольцо 2. Величина $-\Delta L_t = \Delta h$, определяется весом кольца-ползунка, упругостью самой пружины и коэффициентом температурного расширения материала пружины.

Крепление биметаллической пружины 3 с кольцом 2 к корпусу сосуда 1, необходимо выполнить так, чтобы перемещение кольца 2 сохраняло условие (7), во всём диапазоне рабочих температур.

На рис.3 показан один из вариантов механизма автоматической коррекции. Здесь нижний конец пружины 3 закреплен в основании ёмкости с жидкостью, а верхний с кольцом 2, имеющий свободный ход вдоль подвешенного сосуда. Небольшой вес кольца в ($P \approx 20-30$ г), позволит осуществить необходимое изменение коэффициента подвески K_m , заранее уравновешенного относительно (линии крепления сосуда с подвеской) нижней базы c сосуда с жидкостью.

Равновесие сосуда, по нижней базе, выполняется дополнительными довесками 5, выполненными в виде колец различной толщины и расположенные выше базы подвеса c . Регулировка начального положения кольца, производится передвижной площадкой 4, расположенной в основании сосуда 1.

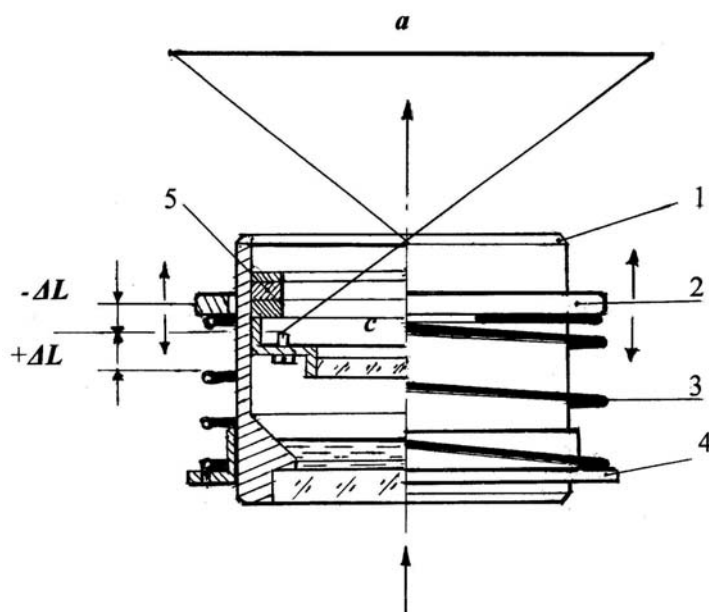


Рис. 3. Конструкция сосуда с механизмом автоматической коррекции ЦТ

Выводы

Таким образом, погрешности компенсации, возникающие в результате термического изменения показателя преломления применяемой, оптически активной жидкости, налитой в сосуд, можно практически исключить, с помощью ручной и автоматической коррекцией геометрических параметров подвески компенсатора, положением ЦТ сосуда с жидкостью. Для ручной коррекции, предлагается использовать кольцо-ползунок, позволяющий изменять своё положение относительно базы подвеса в соответствии с температурой окружающей среды.

При автоматической коррекции, целесообразным является использование смещение ЦТ сосуда $\pm L$ относительно нижней базы c . Для этого, сосуд необходимо снабдить дополнительно, подвижным грузом в виде металлического кольца, установленного на термически чувствительной пружине, закреплённый в основании сосуда.

Для температуры окружающей среды в $\pm 30^\circ\text{C}$, точность перемещения кольца составляет от ± 1 до $\pm 3\%$. Неблагоприятное влияние, может оказать нелинейная зависимость удельного прогиба пружины a от температуры. Ожидаемая угловая ошибка стабилизации в зоне низкой чувствительности подвески, при перепадах температуры от $+30$ до -30°C и наклоне прибора до $\pm 10'$, может составить $0.5 - 3.0''$.

Предложенный механизм корректировки, позволит использовать его не только в жидкостных компенсаторах, но и в оптических системах компенсации, в том числе и в датчиках угла наклона и горизонта, имеющие оптико-механические и электронные системы подвеса. Исследование этих систем на температурную стабильность, может быть предметом дальнейших работ.

Литература

1. Кочетов.Ф.Г. Нівеліри з компенсаторами. -М.: Недра, 1985. - 150 с.
2. Ямбаев.Х.К. Специальные приборы для инженерно-геодезических работ. -М.: Недра, 1990.
3. Сафарян.В.А, Гераимчук.М.Д. Теоретические аспекты стабилизации визирной линии жидкостным компенсатором подвесного типа // Вісник НТУУ «КПІ». Серія приладобудування. – 2004. – Вип. 28. - С.5-12.
4. Сафарян.В.А. Патент України №78089. МПК(2007) G01C9/18. Стабілізатор вертикального напрямку візирної лінії. Опубл. 15.02.2007. Бюл. №2.
5. П.Профос. Измерения в промышленности. Справочник. –М.: Металлургия, .1990. –С.301, 302.

<p>Сафарян.В.А, Гераимчук.М.Д. Аналіз механізму ручної і автоматичної корекції параметрів підвіски в рідинному компенсаторі. Стаття присвячена розробці конструкції, механізмів ручної і автоматичної корекції параметрів підвіски компенсатора, що дозволяє виключити помилки стабілізації візирної (лазерної) лінії, в результаті впливу температури навколишньої середовища.</p>	<p>Safarian V, Geraimchuk M. Analysis of the mechanism manual And automatic correction of parameters of a suspension bracket In liquid the equaliser. Clause is devoted to development of a design, the mechanism of manual and automatic correction of parameters of a suspension bracket of the equaliser, allowing to exclude mistakes of stabilization laser line, as a result of influence of an ambient temperature.</p>
--	---

Надійшла до редакції
4 березня 2007 року

ТЕОРІЯ ТА ПРАКТИКА НАВІГАЦІЙНИХ ПРИЛАДІВ І СИСТЕМ

УДК 629.7.054

ОКРЕСЛЕННЯ ФУНКЦІЙ $\varphi_k^S(z), \psi_k^S(z), \gamma_k^S(z)$ ЗА ВІДСУТНОСТІ ПРУЖНОГО ПЕРЕХРЕСНОГО ВПЛИВУ КООРДИНАТ ПОПЛАВЦЯ ГІРОСКОПА

Мельник В.М., Карачун В.В., Національний технічний університет України „Київський політехнічний інститут”, м. Київ, Україна

Проводиться чисельний аналіз безрозмірних частот пружних коливань поверхні поплавця гіроскопа під впливом зовнішнього збурення просторового характеру. Обґрунтовується вибір *partialis* частот для однієї з модифікацій промислового зразка поплавкового приладу

Вступ

Досягнення наукової думки вітчизняних вчених та дослідників змусили суттєво переглянути сталі уявлення щодо природи виникнення похибок гіроскопічних приладів за натурних умов [1, 2, 3, 4]. Отже, - і щодо універсальності розрахункових моделей, коли гіроскоп уявлявся як система із зосередженими параметрами.