

## МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ ОПТИЧЕСКОЙ ЧАСТИ СКАНИРУЮЩИХ ПОСТРОИТЕЛЕЙ МЕСТНОЙ ВЕРТИКАЛИ

А.В. Мельников, Е.Н. Михайлов, А.Е. Рабовский

Приведены основные аспекты проектирования оптико-механической части нового типа приборов ориентации КА на местную вертикаль Земли, имеющих малые габариты и отличающихся простотой конструкции. Эти приборы представляют собой инфракрасные построители местной вертикали (ПМВ) высокой точности, принцип действия которых основан на «секущем» сканировании ИК-горизонта Земли. Предложена методика расчёта оптико-механической части ИК-ПМВ, в результате которой определяются форма и угол наклона неподвижных зеркал, а также форма выходных окон корпуса. На основе данного алгоритма создана программа, которая позволяет определить требуемые для конструирования параметры оптико-механической части прибора для заданной высоты полёта космического аппарата.

**Ключевые слова:** оптическая система, проектирование ОЭП, устройство ориентации, ИК-горизонт Земли.

### Габаритный расчёт оптико-механической части прибора

В статье рассматриваются основные аспекты проектирования оптико-механической части нового типа приборов ориентации КА на местную вертикаль Земли, имеющих малые габариты и отличающихся простотой конструкции [1]. Эти приборы (разработки АО «Корпорации «ВНИИЭМ») представляют собой инфракрасные построители местной вертикали (ПМВ) высокой точности, принцип действия которых основан на «секущем» сканировании ИК-горизонта Земли [2]. Поле зрения прибора формируется простым однолинзовым германиевым объективом, сканирование выполняется вращением зеркала и системой из четырёх неподвижных плоских зеркал, образующих четыре радиальных пересечения с ИК-горизонтом Земли.

Для повышения точности прибора используется система автоматической компенсации погрешности из-за переменной яркости Земли с использованием таблицы поправок, заложенной в память вычислительного блока ПМВ. Предельная суммарная погрешность ПМВ составляет не более 3,5' определена теоретически и подтверждена лётными испытаниями [2].

Проектирование оптической части приборов заключается в определении её основных габаритных и оптических параметров. Для решения данной задачи была разработана программа, алгоритм работы которой описан ниже.

Задаётся требуемый диапазон высот и углов отклонения. Отсюда выбирается угол конуса сканирования внутри прибора. Если диапазон высот находится в пределах  $\pm 50$  км, что соответствует  $\approx \pm 1^\circ$  в углах визирования, а требуемые углы отклонения в пределах линейной зоны  $\pm(2 - 3)^\circ$ , то достаточен конус сканирования с углом при вершине  $40^\circ - 48^\circ$ .

Для широкого диапазона высот полёта (400 – 1200 км) угол конуса сканирования увеличивается до  $60^\circ$ . В любом случае угол конуса сканирования выбирается минимальным в целях обеспечения малых габаритов самого прибора и упрощения его размещения на КА.

1. *Определение угла визирования на ИК-горизонт КА «Метеор»* предназначен для работы на круговых орбитах, поэтому примем угол при вершине конуса сканирования равным  $48^\circ$ , тогда наклон сканирующего зеркала к оси вращения составит  $\Psi = 12^\circ$ . В качестве примера рассмотрим проектирование построителя местной вертикали (ПМВ) для КА «Метеор» с высотой полёта  $H = 830$  км:

$$\varphi_{\text{уст}} = \arcsin \frac{R_3 + h}{R_3 + H_{\text{уст}}},$$

где  $R_3 = 6371$  км – средний радиус Земли,  $h = 20$  км – середина высоты атмосферы Земли. Тогда  $\varphi_{\text{уст}} = 62,5^\circ$ .

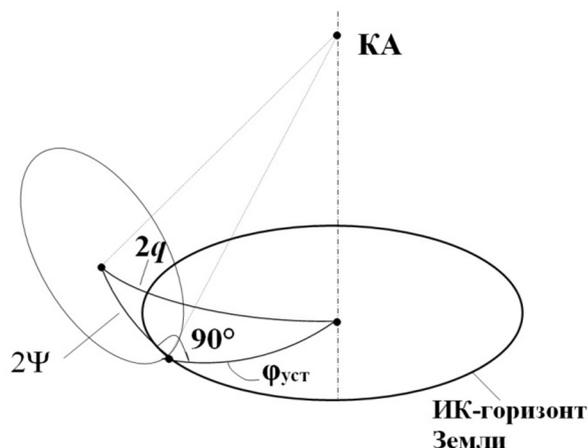


Рис. 1. Определение угла наклонных зеркал  $q$

2. *Определение угла наклона неподвижных плоских зеркал  $q$  (рис. 1).* Угол  $q$  выбирается таким, чтобы сканирующий луч пересекал ИК-горизонт Земли под прямым углом, обеспечивая наибольшую зону постоянства радиальной скорости сканирования (скорость изменения угла визирования  $d\phi/dt$ ). При этом двугранный угол сферического треугольника, противолежащий углу  $2q$ , будет равен  $90^\circ$  и из формулы сферической тригонометрии [3]:

$$\cos(2q) = \cos(2\Psi)\cos(\varphi_{\text{уст}});$$

$$q = \frac{1}{2}\arccos(\cos(\varphi_{\text{уст}})\cos(2\Psi)).$$

Пример: для  $\varphi_{\text{уст}} = 62,5^\circ$ ;  $\Psi = 12^\circ$ ;  $q = 32,525^\circ$ .  
Примем  $q = 32,5^\circ$ .

3. *Определение азимутального положения плоских зеркал.* Приняв за начало координат вершину линзы объектива, построим эскиз конструкции оптической части прибора (рис. 2).

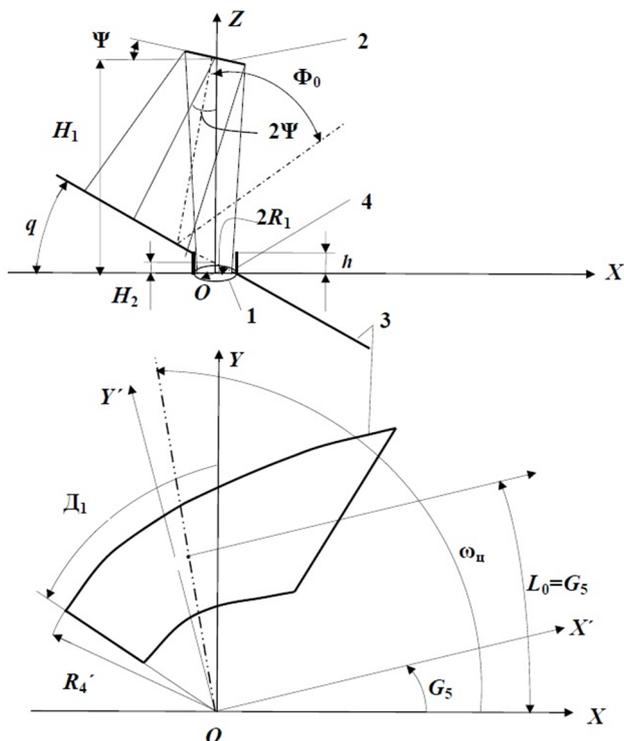


Рис. 2. Схема оптической части прибора

Исходными данными для расчёта являются следующие характеристики реального объектива:  
угол мгновенного поля зрения  $2\gamma = 3,4^\circ$ ;

световой диаметр объектива  $2R_1 = 16$  мм;  
 $\Psi = 12^\circ$ ,  $q = 32,5^\circ$ .

Пример расчёта одного из лучей поля зрения прибора приведён ниже.

3.1. Задаются радиус  $R_1$  и азимут  $\alpha$  для точки входного зрачка и рассчитываются координаты  $X_1$ ,  $Y_1$  для этой точки, из которой под углом  $\gamma$  к оси поля зрения выходит луч с направляющими косинусами  $lp$ ,  $mp$ ,  $np$ . Нормаль сканирующего зеркала поворачивается на угол сканирования  $W$ , который измеряется от оси  $X$  против часовой стрелки, если смотреть с конца оси  $Z$ :

$$X_1 = R_1 \cos(\alpha);$$

$$Y_1 = R_1 \sin(\alpha);$$

$$lp = \sin(\gamma)\cos(\alpha);$$

$$mp = \sin(\gamma)\sin(\alpha);$$

$$np = \cos(\gamma).$$

3.2. Определяется плоскость сканирующего зеркала на расстоянии  $R_0$  от начала координат с направляющими косинусами нормали  $ln$ ,  $mn$ ,  $nn$  [3]:

$$ln = \sin(\Psi)\cos(W);$$

$$mn = \sin(\Psi)\sin(W);$$

$$nn = -\cos(\Psi);$$

$$c_1 = ln lp + mn mp + nn np;$$

$$R_0 = (ln X_1 + mn Y_1 + H_1 \cos(\Psi)) / c_1.$$

3.3. Определяются координаты  $X_2$ ,  $Y_2$ ,  $Z_2$  точки пересечения луча с плоскостью сканирующего зеркала и направляющие косинусы  $lo$ ,  $mo$ ,  $no$  луча, отражённого от этой плоскости. По формулам Гюйгенса для отражённого луча:

$$X_2 = X_1 - lp R_0;$$

$$Y_2 = Y_1 - mp R_0;$$

$$Z_2 = -np R_0;$$

$$lo = lp - 2 ln c_1;$$

$$mo = mp - 2 mn c_1;$$

$$no = np - 2 nn c_1.$$

3.4. Определяется плоскость неподвижного плоского зеркала 3, которое находится на расстоянии  $R_{01}$  от начала координат. Зеркало 3 наклонено на угол  $q$  вокруг оси  $Y$  к плоскости  $XOY$ :

$$R_{01} = \frac{\sin(q) X_2 + \cos(q) (Z_2 - H_2)}{lo \sin(q) + no \cos(q)}$$

Направляющие косинусы нормали зеркала 3 равны:

$$\begin{aligned} ln_1 &= \sin(q); \\ mn_1 &= 0, \\ nn_1 &= \cos(q). \end{aligned}$$

3.5. Рассчитываются координаты  $X_3, Y_3, Z_3$  точки пересечения сканирующего луча с плоскостью зеркала 3 и направляющие косинусы отражённого луча  $ls, ms, ns$ :

$$\begin{aligned} X_3 &= X_2 - lo R_{01}; \\ Y_3 &= Y_2 - mo R_{01}; \\ Z_3 &= Z_2 - no R_{01}; \\ c_2 &= ln_1 lo + mn_1 mo + nn_1 no; \\ ls &= lo - 2ln_1 c_2; \\ ms &= mo; \\ ns &= no - 2nn_1 c_2. \end{aligned}$$

Произведём расчёт угловых координат отражённых от зеркала 3 лучей в пространстве объектов:

$$\begin{aligned} \Phi &= \arccos(ns); \\ L &= \arctg(ms / ls), \end{aligned}$$

где  $\Phi$  – угол визирования, т. е. угол луча с осью «+Z» (направленной на центр Земли);  $L$  – азимутальный угол луча от плоскости  $ZOX$ .

Расстояния  $H_1$  вдоль оси  $Z$  от объектива до сканирующего зеркала 2 и  $H_2$  – до плоского зеркала 3 выбираются так, чтобы внутрприборный конус сканирования охватывал с небольшим запасом объект 1 с блендой 4 длиной 20 мм.

Пример:  $H_1=75$  мм;  $H_2=0$  мм.

3.6. Выберем значение угла сканирования для центра поля зрения  $\omega = \omega_c$ , при котором отражённый центральный луч поля зрения (для которого  $R_1=0; \gamma=0$ ) пересекает ИК-горизонт Земли, т. е. рассчитанный угол визирования для него  $\Phi_0 = \Phi_{уст}$ . Угол  $\omega_c$  соответствует середине зеркала 3.

Азимутальный угол  $Lo$  между проекцией этого луча на плоскость  $XOY$  и осью  $X$  равен углу  $G_5$  поворота оси радиального пересечения горизонта («засечка»), формируемого данным зеркалом 3,

от оси  $X$ . Поэтому, чтобы «засечки» располагались вдоль осей координат, разворачиваем на угол  $G_5$  всю систему координат прибора ( $X'OY'$ ) (см. рис. 2).

Задаём четыре точки по краю линзы 1 (углы  $\alpha$  от  $0^\circ$  до  $270^\circ$ ) и считаем четыре крайних луча мгновенного поля зрения. Найдём угол  $D_1$ , при котором углы  $\omega_{max}$  и  $\omega_{min}$  для пучков, проходящих систему с полной апертурой (т. е. проходят все четыре крайних луча), располагаются симметрично относительно середины зеркала  $\omega_c$  (см. рис. 3).

Пример: угол  $D_1 = 56^\circ$ .

4. Определение параметров  $D_3, R_4$  и  $t_2$ , задающих форму зеркала 3. Рассчитываем координаты  $X_4, Y_4$  точек пересечения лучом, идущим при угле  $\alpha = 180^\circ$  (луч, ближайший к оси  $Z$  прибора) и отражённым от зеркала 3, передней поверхности соседнего зеркала 3':

$$Z_4 = \left( \frac{H_2 \cos(q)}{\sin(q)} - Z_3 \frac{ms}{ns} + Y_3 \right) / \left( \frac{\cos(q)}{\sin(q)} - \frac{ms}{ns} \right);$$

$$Y_4 = (Z_4 - H_2) \cos(q) / \sin(q);$$

$$X_4 = X_3 + (Z_4 - Z_3) ls / ns.$$

Если прямая  $A$ , проведённая через точки с координатами  $X_4, Y_4$ , рассчитанными для углов  $\omega$  от  $\omega_{min}$  до  $\omega_{max}$ , пересекает край зеркала 3', соседнего с рассчитываемым, то этот край срезаем с достаточным запасом ~4 мм (рис. 3, где  $R_4$  – граница, по которой производится срез зеркала 3;  $D_3$  – угол, под которым происходит срез;  $t_2$  – расстояние от начала координат до пересечения с линией среза в плоскости  $XOY$ ). Данное конструктивное решение позволяет возникающее переотражение лучей между зеркалами 3 и 3'.

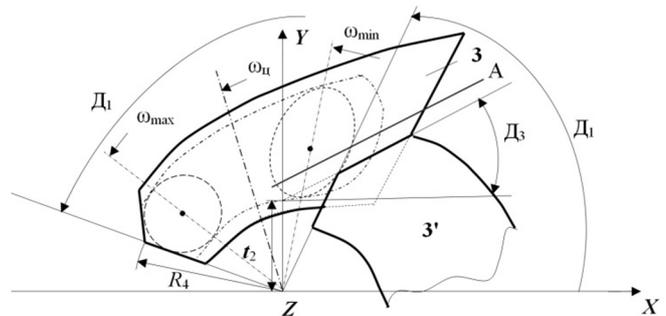


Рис. 3. Определение формы зеркал

Пример:  $R_4=30$  мм;  $D_3=23^\circ$ ;  $t_2=18$  мм.

В проекции на плоскость  $XOY$  построен след краёв поля зрения на зеркале 3 (при этом задаём углы  $\alpha$  от  $0^\circ$  до  $360^\circ$  с интервалом  $30^\circ$ ) во всём диапазоне углов  $\omega$  при прохождении полем зрения данного зеркала 3. Примем края зеркала 3 с запасом, превышающим след поля зрения на  $3\div 4$  мм, как показано на рис. 3.

#### 5. Определение координат входных окон корпуса.

Из конструктивных соображений выбираем параметры внешнего конуса корпуса, охватывающего конструкцию сканирующего узла и неподвижные плоские зеркала 3 – угол  $\beta$  при вершине конуса и высоту конуса  $H_3$  (рис. 4).

Угол  $\gamma$  задаём с большим запасом:  $\gamma = 2,5^\circ$ ; остальные параметры те же, что в пп. 3 и 4.

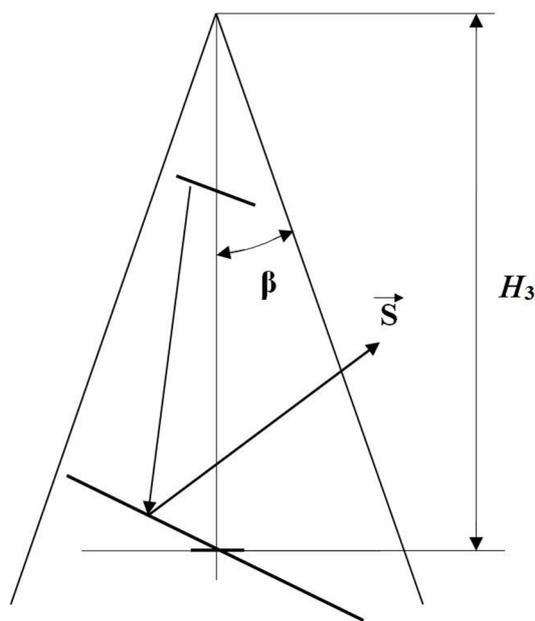


Рис. 4. Определение координат окон в коническом корпусе

Задаём уравнение конуса [3]:

$$X^2 + Y^2 - (Z - H_3)^2 \operatorname{tg}^2 \beta = 0$$

и лучей, отражённых от зеркала 3:

$$(X - X_3) / ls = (Y - Y_3) / ms = (Z - Z_3) / ns,$$

где  $ls$ ,  $ms$  и  $ns$  – направляющие косинусы отражённого луча  $S$  из п. 3.5.

Совместное решение этих уравнений позволяет получить координаты  $X_5$ ,  $Y_5$ ,  $Z_5$  краёв окна на внутренней поверхности конического корпуса прибора:

$$a_1 = \frac{1 - ns^2(1 + \operatorname{tg}^2(\beta))}{ls^2};$$

$$b_1 = \frac{nst \operatorname{tg}^2(\beta) \times (Z_3 - H_3)}{ls} - \frac{msY_3}{ls} - X_3;$$

$$c_1 = X_3^2 + Y_3^2 - (Z_3 - H_3)^2 \operatorname{tg}^2(\beta);$$

$$t = \frac{b_1 + \sqrt{b_1^2 - a_1 c_1}}{a_1};$$

$$X_5 = t + X_3;$$

$$Y_5 = ms t / ls + Y_3;$$

$$Z_5 = ns t / ls + Z_3.$$

Данные координаты позволяют получить форму входных окон корпуса так, чтобы они полностью пропускали поле обзора прибора, не нарушая прочность конструкции конуса.

#### Заключение

Предложена методика расчёта оптико-механической части ИК-ПМВ, в результате которой определяются форма и угол наклона неподвижных зеркал, а также форма выходных окон корпуса.

На основе данного алгоритма создана программа, которая позволяет определить требуемые для конструирования параметры оптико-механической части прибора для заданной высоты полёта космического аппарата.

#### Литература

1. Федосеев В. И., Колосов М. П. Оптико-электронные приборы ориентации и навигации космических аппаратов: учеб. пособие / В. И. Федосеев, М. П. Колосов. – М.: Логос, 2007. – С. 162 – 176.
2. Гандлевский Ю. М., Михайлов Е. Н., Мосолова Ю. С., Рабовский А. Е. Оценка точности инфракрасных построителей местной вертикали по результатам лётных испытаний // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – 2014. – Т. 141. – № 4. – С. 31 – 38.
3. Бронштейн И. П., Семендяев К. А. Справочник по математике. – М., 1957.

Поступила в редакцию 28.12.2016

**Александр Викторович Мельников**, инженер,  
e-mail: melnikov20082009@yandex.ru.

**Евгений Николаевич Михайлов**,  
кандидат технических наук, начальник научно-производственного центра.

**Александр Ефимович Рабовский**,  
кандидат технических наук, старший научный сотрудник.  
Т. (495) 366-33-92. E-mail: Raskiy@mail.ru.  
(АО «Корпорация «ВНИИЭМ»).

## METHODOLOGY for DESIGNING the OPTICAL PART of LOCAL VERTICAL SENSORS

**A.V. Melnikov, E.N. Mikhailov, A.E. Rabovskii**

The basic designing aspects have been provided regarding the design of optomechanical part of the new devices type intended for SC pointing on Earth's local vertical, these devices, in comparison, are small-sized and have a simplified design. This equipment is presented in the form of the infrared high-precision local vertical sensors, which function in accordance to the principles of transversal probing of IR-horizon of Earth. The methodology of calculating the optomechanical part of infrared local vertical sensors has been suggested, that leads to determining the shape and tilt of stationary mirrors as well as the shape of housing exit gate. Based on that algorithm a program has been created that allows determining the required parameters of device optomechanical part for given spacecraft flight altitude.

**Key words:** optical system, designing of optoelectronic devices, pointing device, IR-horizon of Earth.

### References

1. Fedoseev V. I., Kolosov M. P. Optoelectronic devices for spacecraft pointing and navigation: Education manual / V. I. Fedoseev, M. P. Kolosov. – M. : Logos, 2007. – Pp. 162 – 176.
2. Gandlevskii Iu. M., Mikhailov E. N., Mosolova Iu. S., Rabovskii A. E. Evaluation of infrared local vertical sensors precision based on the results of flight tests // Electromechanical Matters. VNIIEEM Studies. – 2014. – T. 141. – No. 4. – Pp. 31 – 38.
3. Bronshtein I. P., Semendiaev K. A. Mathematics reference book. – M., 1957.

**Aleksandr Victorovich Melnikov**, engineer,  
e-mail: melnikov20082009@yandex.ru.

**Evgenii Nikolaevich Mikhailov**,  
Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Head of Research and Production Center.

**Aleksandr Efimovich Rabovskii**,  
Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Senior Researcher.  
tel. (495) 366-33-92. E-mail: Raskiy@mail.ru.  
(JC «VNIIEEM Corporation»).