

УДК 681.513.3

# АЛГОРИТМ ВЫЧИСЛЕНИЯ УГЛОВЫХ КООРДИНАТ ЛИНИИ ВИЗИРОВАНИЯ ОПЕРАТОРА В НАШЛЕМНОЙ СИСТЕМЕ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ

**Б. А. Алпатов,**

доктор техн. наук, профессор

**О. Е. Балашов,**

канд. техн. наук, доцент

**А. И. Степашкин,**

канд. техн. наук, доцент

Рязанский государственный радиотехнический университет

**Д. В. Трофимов,**

начальник сектора НКЦ ВКТ

ОАО «Государственный рязанский приборный завод»

Рассматривается один из возможных вариантов построения нашлемной системы обзора и целеуказания. Приводится алгоритм вычисления угловых координат линии визирования оператора с использованием светочувствительных линеек в качестве видеодатчиков.

**Ключевые слова** — нашлемная система целеуказания, измерение угловых координат, линейный видеодатчик.

## Введение

Нашлемная система позиционирования (НСП) предназначена для измерения угловых и линейных перемещений шлема оператора (или его визирной линии, формируемой с помощью спецочков, жестко закрепленных на шлеме) в заданной системе координат, направление осей которой совпадает с направлением строительных осей носителя (самолета, вертолета и т. п.), привязанной к некоторой точке носителя [1, 2].

## Принцип построения нашлемной системы позиционирования

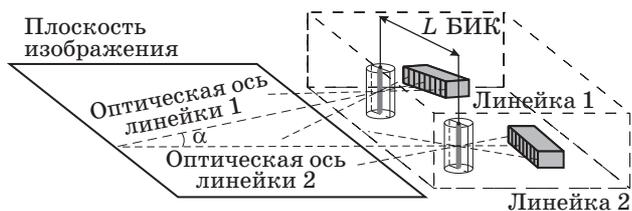
Вариантов построения НСП достаточно много, нередко НСП является составной частью бортовых оптико-механических систем [3]. Рассмотрим НСП, в которой измерение угловых координат линии визирования производится с использованием линеек фотоочувствительных элементов. При этом результатом измерений являются значения углов азимута, места и крена линии визирования. При таком варианте реализации НСП на шлеме пилота крепятся минимум три светодиода (точки *A*, *B* и *C* на рис. 1), кото-

рые образуют реперный треугольник. Измерение координат реперов осуществляется в блоке измерения координат (БИК). По координатам вершин реперного треугольника (с учетом информации о взаимном положении реперов на шлеме и визирной линии оператора) вычисляют текущее направление линии визирования оператора (см. рис. 1).

В рассматриваемой НСП БИК состоит из двух видеодатчиков (ВД), каждый из которых включает диафрагму и линейку фотоочувствительных элементов (рис. 2). При этом оптические оси ВД и линейки фотоочувствительных элементов расположены в одной плоскости (плоскость изображения) под углом  $\alpha$  друг к другу. Каждый ВД снаб-



■ **Рис. 1.** Расположение светодиодов на шлеме пилота

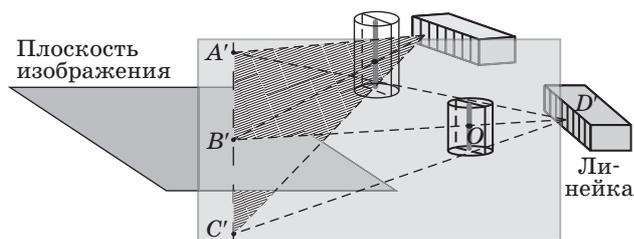


■ Рис. 2. Блок измерения координат

жен объективом, выполненным в виде двух полуполицидрических линз, соединенных плоскими поверхностями, на одну из которых нанесена щелевая диафрагма, продольная ось которой параллельна образующей цилиндра и перпендикулярна плоскости расположения фоточувствительных линеек [4]. Для БИК считаются известными расстояние  $L$  между оптическими центрами ВД, угол пересечения оптических осей  $\alpha$ , количество светочувствительных элементов в линейках, ширина поля зрения ВД.

### Модель изображения

Модель изображения, формируемая линейками светочувствительных элементов, установленными в НСП, может быть представлена следующим образом (рис. 3). В каждый светочувствительный элемент линейки попадают лучи света, проходящие через данный элемент и вертикальную щелевую диафрагму. Рассмотрим формирование сигнала в одном светочувствительном элементе  $D'$ . В  $D'$  попадают луч  $D'B'$ , проходящий через оптический центр  $O$ , лучи  $D'A'$ ,  $D'C'$ , лежащие в вертикальной плоскости (точки  $A'$ ,  $B'$ ,  $C'$  лежат на вертикальной прямой, параллельной продольной оси щелевой диафрагмы). Таким образом, светочувствительный элемент  $D'$  не может различить оптические лучи  $D'A'$ ,  $D'B'$  и  $D'C'$ , можно сказать, что все пространство проецируется на плоскость изображения. В результате по номерам светочувствительных элементов линеек, в которые попадают лучи от реперных точек, вычисляют угловые координаты направлений на точки проекций реперов на плоскость изображения.



■ Рис. 3. Модель формирования изображения

### Алгоритм вычисления угловых координат линии визирования оператора по азимуту

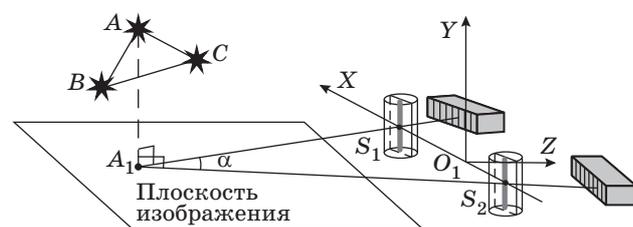
При использовании ВД со светочувствительными линейками и щелевыми диафрагмами можно считать, что ВД измеряют угловые координаты (направления) точек, лежащих в плоскости изображения, которые являются проекциями точек пространства.

На рис. 4 показано измерение координат вершины  $A$  реперного треугольника  $ABC$  в системе координат  $O_1XYZ$ , ось  $O_1X$  которой проходит через оптические центры ВД  $S_1$  и  $S_2$  (центры щелевых диафрагм), центр системы координат  $O_1$  расположен посередине между центрами  $S_1$  и  $S_2$ , ось  $O_1Z$  лежит в одной плоскости с оптическими осями ВД и делит угол пересечения оптических осей  $\alpha$  пополам, ось  $O_1Y$  перпендикулярна плоскости изображения и направлена вверх.

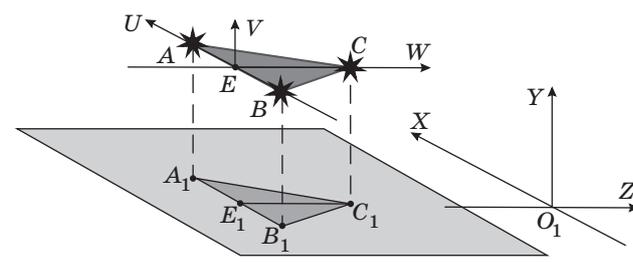
Координаты точки  $A_1(x_{A1}, z_{A1})$  на плоскости изображения могут быть вычислены методом триангуляции по известному расстоянию между оптическими центрами ВД, известному углу между оптическими осями ВД, измеренным первым и вторым ВД угловым координатам точки  $A_1$  (проекция точки  $A$  на плоскость изображения).

В результате измерений угловых координат реперных точек  $A, B, C$  получим координаты проекций реперов  $(x_A, z_A)$ ,  $(x_B, z_B)$ ,  $(x_C, z_C)$  на плоскость изображения  $O_1XZ$ . Координаты проекций реперов по оси  $O_1Y$  равны нулю.

Угловые координаты линии визирования вычисляются по расположению реперного треугольника в пространстве (рис. 5). Введем систе-



■ Рис. 4. Измерение координат реперов



■ Рис. 5. Расположение реперного треугольника в пространстве

му координат  $EUVW$ , жестко связанную с реперным треугольником, точка  $E$  лежит посередине между реперами  $A$  и  $B$ , ось  $EU$  направлена вдоль отрезка  $AB$ , ось  $EW$  направлена вдоль отрезка  $EC$ , ось  $EV$  перпендикулярна осям  $EU$  и  $EW$ . Таким образом, текущие угловые координаты реперного треугольника удобно описать тремя углами Эйлера, определяющими поворот системы координат  $EUVW$  относительно начального положения (угол  $\theta$  — поворот вокруг оси  $EV$ , угол  $\varphi$  — поворот вокруг оси  $EU$ , угол  $\psi$  — поворот вокруг оси  $EW$ ) [5]. Примем за начальную ориентацию реперного треугольника ориентацию, соответствующую нулевым угловым координатам линии визирования ( $\theta = 0, \varphi = 0, \psi = 0$ ) (см. рис. 5). При этом направления соответствующих осей систем координат  $EUVW$  и  $O_1XYZ$  совпадают.

Рассмотрим алгоритм измерения угловых координат реперного треугольника (см. рис. 1). Будем считать, что БИК расположен перед оператором, реперный треугольник — в лобовой части шлема, реперы всегда видны ВД (не заслоняются и находятся в поле зрения ВД), оператор способен поворачивать голову так, что положение реперного треугольника изменяется в следующих пределах:

$$\theta \in \left[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right]; \varphi \in \left(0, \frac{\pi}{2}\right); \psi \in \left(-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right). \quad (1)$$

Диапазоны измерения углов могут быть легко изменены корректировкой положения реперов на шлеме и блока БИК в кабине оператора. Расширить диапазоны можно путем добавления реперов и выбора реперного треугольника для измерения угловых координат линии визирования.

При изменении углов поворота головы оператора в пределах ограничений (1) угол поворота системы координат  $EUVW$  по азимуту  $\theta$  совпадает с углом между проекцией оси  $EW$  на плоскость  $O_1XZ$  и осью  $O_1Z$ . Угол  $\theta$  можно вычислить как угол между вектором  $\overline{E_1C_1}$  (проекция вектора  $\overline{EC}$  на плоскость  $O_1XZ$ ) и осью  $O_1Z$ , направление которой можно описать единичным базисным вектором  $\bar{z}$  с координатами  $[0 \ 0 \ 1]$  по выражению

$$\theta = \arccos \frac{(\overline{E_1C_1}, \bar{z})}{|\overline{E_1C_1}| |\bar{z}|}, \quad (2)$$

где вектор  $\overline{E_1C_1}$  вычисляется по известным координатам точек  $E_1$  и  $C_1$ .

По выражению (2) можно вычислить только абсолютное значение угла поворота, направление поворота можно определить, анализируя ко-

ординату  $x_{E_1C_1}$  вектора  $\overline{E_1C_1}$ . В результате для вычисления азимута получим следующее выражение:

$$\theta = \begin{cases} \arccos \frac{(\overline{E_1C_1}, \bar{z})}{|\overline{E_1C_1}| |\bar{z}|}, & \text{если } x_{E_1C_1} \geq 0; \\ -\arccos \frac{(\overline{E_1C_1}, \bar{z})}{|\overline{E_1C_1}| |\bar{z}|}, & \text{иначе.} \end{cases} \quad (3)$$

### Алгоритм вычисления угловых координат линии визирования оператора по углу места

Для вычисления угла места  $\varphi$  осуществим параллельный перенос вектора  $\overline{EC}$  вдоль оси  $O_1Y$  на  $-y_E$  ( $y_E$  — координата точки  $E$  по оси  $O_1Y$ ), в результате получим вектор  $\overline{E_1C'}$ , отличающийся от вектора  $\overline{EC}$  только точкой приложения. Из образовавшегося треугольника  $E_1C'C_1$  угол места вычисляется как угол между прилежащим катетом и гипотенузой в прямоугольном треугольнике (угол  $E_1C_1C'$  прямой, так как точка  $C_1$  является проекцией точки  $C'$  на плоскость  $O_1XZ$ ) по выражению

$$\varphi = \arccos \frac{|\overline{E_1C_1}|}{|\overline{E_1C'}|}. \quad (4)$$

Длина вектора  $|\overline{E_1C'}|$  считается известной и измеряется на этапе изготовления НСП.

Для вычисления угла крена  $\psi$  рассмотрим систему координат реперного треугольника  $EUVW$ , описывающую текущее положение реперов в пространстве. Обозначим начальное положение системы координат реперного треугольника, соответствующего нулевым углам поворота (см. рис. 5), как  $EU_0V_0W_0$ . Организуя последовательный поворот системы координат  $EU_0V_0W_0$  на углы Эйлера  $\theta, \varphi, \psi$ , перейдем в систему координат  $EUVW$ . Угол поворота реперного треугольника по крену удобно вычислять в системе координат  $EU_1V_0W_1$ , повернутой относительно  $EU_0V_0W_0$  на угол  $\theta$  (повернув  $EU_1V_0W_1$  на углы  $\varphi, \psi$ , перейдем в  $EUVW$ ). Чтобы получить координаты точки (вектора) в системе координат  $EU_1V_0W_1$ , необходимо координаты точки (вектора) в системе координат  $EU_0V_0W_0$  умножить на матрицу преобразования координат  $M_1(\theta)$ , описывающую в данном случае поворот на угол  $\theta$ . Чтобы осуществить перевод координат из системы координат  $EUVW$  в  $EU_1V_0W_1$ , необходимо координаты точки (вектора) в системе координат  $EUVW$  умножить на матрицу преобразования координат  $M_2(\varphi, \psi)$ , описывающую поворот на углы  $\psi$  и  $\varphi$ .

Рассмотрим вектор  $\overline{AB}$ , координаты которого в системе координат  $O_1XYZ$  и  $EU_0V_0W_0$  по осям  $O_1X$  и  $O_1Z$  совпадают с координатами вектора

$$\overline{A_1B_1} = [u_{A_1B_1} \ v_{A_1B_1} \ w_{A_1B_1}]^T,$$

являющегося проекцией вектора  $\overline{AB}$  на плоскость  $O_1XZ$  ( $v_{A_1B_1} = 0$ ). Координаты вектора  $\overline{A_1B_1}$  в системе координат  $O_1XYZ$  и  $EU_0V_0W_0$  определяются по координатам реперов, измеренным ВД. В системе координат  $EU_1V_0W_1$  вектор  $\overline{A_1B_1}$  имеет следующие координаты:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} u'_{A_1B_1} \\ v'_{A_1B_1} \\ w'_{A_1B_1} \end{bmatrix} &= \mathbf{M}_1(\theta) \begin{bmatrix} u_{A_1B_1} \\ v_{A_1B_1} \\ w_{A_1B_1} \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} \cos(\theta) & 0 & \sin(\theta) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\theta) & 0 & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{A_1B_1} \\ v_{A_1B_1} \\ w_{A_1B_1} \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (5)$$

В силу вида матрицы  $\mathbf{M}_1(\theta)$  координаты вектора  $\overline{A_1B_1}$  в системе координат  $EU_1V_0W_1$  по осям  $EU_1$  и  $EW_1$  не зависят от координаты  $v_{A_1B_1}$ , поэтому координаты вектора  $\overline{AB}$  по осям  $EU_1$  и  $EW_1$  в системе координат  $EU_1V_0W_1$  равны соответственно координатам вектора  $\overline{A_1B_1}$ .

Координаты вектора  $\overline{AB}$  в системе координат  $EU_1V_0W_1$  равны  $[u_{AB} \ v_{AB} \ w_{AB}]^T = [D_1 \ 0 \ 0]^T$ , где  $D_1$  — расстояние между реперами  $A$  и  $B$ , измеренное на этапе изготовления НСП. В системе координат  $EU_1V_0W_1$  вектор  $\overline{AB}$  имеет следующие координаты:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} u'_{AB} \\ v'_{AB} \\ w'_{AB} \end{bmatrix} &= \mathbf{M}_2(\varphi, \psi) \begin{bmatrix} u_{AB} \\ v_{AB} \\ w_{AB} \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} \cos(\psi) & -\sin(\psi) & 0 \\ \cos(\varphi)\sin(\psi) & \cos(\varphi)\cos(\psi) & \sin(\varphi) \\ -\sin(\varphi)\sin(\psi) & -\sin(\varphi)\cos(\psi) & \cos(\varphi) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D_1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (6)$$

В системе координат  $EU_1V_0W_1$  координаты вектора  $\overline{AB}$  по осям  $EU_1$  и  $EW_1$ , полученные по выражениям (5) и (6), равны, так как являются координатами одного и того же вектора. В результате получим следующие тождества:

$$\begin{aligned} u'_{A_1B_1} &= u_{A_1B_1} \cos(\theta) + w_{A_1B_1} \sin(\theta) \equiv D_1 \cos(\psi); \\ w'_{A_1B_1} &= -u_{A_1B_1} \sin(\theta) + w_{A_1B_1} \cos(\theta) \equiv \\ &\equiv -D_1 \sin(\varphi)\sin(\psi). \end{aligned} \quad (7)$$

Из (7) угол поворота реперного треугольника по крену  $\psi$  можно вычислить как

$$\psi = \begin{cases} \arccos\left(\frac{u_{A_1B_1} \cos(\theta) + w_{A_1B_1} \sin(\theta)}{D_1}\right), \\ \text{если } u_{A_1B_1} \sin(\theta) - w_{A_1B_1} \cos(\theta) \geq 0; \\ -\arccos\left(\frac{u_{A_1B_1} \cos(\theta) + w_{A_1B_1} \sin(\theta)}{D_1}\right), \text{ иначе.} \end{cases} \quad (8)$$

Выражение (8) справедливо при  $\varphi \in (0, \pi/2)$  [ограничения (1)]. При  $\varphi = 0$  можно найти абсолютное значение угла поворота  $\psi$ , но невозможно определить знак угла поворота вследствие особенностей построения линейных видеодатчиков с целевой диафрагмой.

Для вычисления углов поворота нашлемной системы относительно БИК (носителя), т. е. решения задач, возложенных на НСП, выберем в декартовой системе координат  $O_1XYZ$  единичные векторы  $\bar{i}$ ,  $\bar{j}$ ,  $\bar{k}$  в качестве базиса. По вычисленным углам поворота  $\theta$ ,  $\varphi$  и  $\psi$  системы координат реперного треугольника  $EU_1V_0W_1$ , повернутой относительно системы координат  $O_1XYZ$ , найдем координаты базисных векторов  $\bar{i}$ ,  $\bar{j}$ ,  $\bar{k}$  в системе координат  $EU_1V_0W_1$ . Вычислим координаты полученных базисных векторов в системе координат шлема. Углы поворота системы координат реперного треугольника относительно системы координат шлема считаются известными и измеряются на этапе производства НСП. Таким образом, в системе координат шлема получим координаты единичных векторов  $\bar{i}$ ,  $\bar{j}$ ,  $\bar{k}$ .

Координаты векторов  $\bar{i}$ ,  $\bar{j}$ ,  $\bar{k}$  в системе координат шлема можно вычислить по координатам векторов в системе координат  $O_1XYZ$  и матрице  $\mathbf{M}(\theta_1, \varphi_1, \psi_1)$ , описывающей поворот системы координат шлема относительно системы координат  $O_1XYZ$ :

$$\begin{aligned} \bar{i}_1 &= \mathbf{M}(\theta_1, \varphi_1, \psi_1)\bar{i}; \quad \bar{j}_1 = \mathbf{M}(\theta_1, \varphi_1, \psi_1)\bar{j}; \\ \bar{k}_1 &= \mathbf{M}(\theta_1, \varphi_1, \psi_1)\bar{k}. \end{aligned} \quad (9)$$

Поскольку векторы  $\bar{i}$ ,  $\bar{j}$ ,  $\bar{k}$  единичные, то (9) можно записать в виде [5]

$$\begin{aligned} \bar{i}_1 &= \begin{bmatrix} \cos(\psi_1)\cos(\theta_1) - \sin(\psi_1)\sin(\theta_1)\sin(\varphi_1) \\ -\cos(\varphi_1)\sin(\theta_1) \\ \cos(\theta_1)\sin(\psi_1) + \cos(\psi_1)\sin(\theta_1)\sin(\varphi_1) \end{bmatrix}; \\ \bar{j}_1 &= \begin{bmatrix} \cos(\psi_1)\sin(\theta_1) + \cos(\theta_1)\sin(\psi_1)\sin(\varphi_1) \\ \cos(\varphi_1)\cos(\theta_1) \\ \sin(\theta_1)\sin(\psi_1) - \cos(\psi_1)\cos(\theta_1)\sin(\varphi_1) \end{bmatrix}; \\ \bar{k}_1 &= \begin{bmatrix} -\sin(\psi_1)\cos(\varphi_1) \\ \sin(\varphi_1) \\ \cos(\psi_1)\cos(\theta_1) \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (10)$$

Из (10) легко могут быть найдены углы  $\theta_1$ ,  $\varphi_1$  и  $\psi_1$ , являющиеся искомыми углами поворота шлема оператора относительно носителя.

### Заключение

Таким образом, решена задача измерения угловых координат линии визирования операторо-

ра. Использование НСП в бортовых оптико-электронных комплексах позволяет расширить возможности последних, повысить точность решения задачи автоматического сопровождения объектов, уменьшить нагрузку на оператора.

Исследования выполнены при поддержке Министерства образования и науки, государственный контракт № 14.740.11.1083.

### Литература

1. Балашов О. Е., Степашкин А. И. Нашлемная система обзора и целеуказания // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. Рязань, 2011. Вып. 4 (38). С. 40–44.
2. Алпатов Б. А., Балашов О. Е., Степашкин А. И., Трофимов Д. В. Алгоритм измерения угловых координат линии визирования оператора // Информационно-управляющие системы. 2012. № 3. С. 18–21.
3. Алпатов Б. А., Балашов О. Е., Степашкин А. И. Управление приводами гиросtabilизированной платформы в видеокомпьютерной системе сопровождения объектов // Вестник Рязанской государственной радиотехнической академии. Рязань, 2003. Вып. 12. С. 38–41.
4. Патент Российской Федерации № 2168152, G01C21/00, G01C21/12, G01B11/26, G01S5/16, 2001 г.
5. Бесекерский В. А., Фабрикант Е. А. Динамический синтез систем гироскопической стабилизации. — Л.: Судостроение, 1968. — 351 с.