

УДК 681.586.57

## ВИДЕОНАВИГАЦИЯ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

В.Г. БОНДАРЕВ

**Статья представлена доктором технических наук, профессором Халютиным С.П.**

Представлены алгоритмы счисления координат летательного аппарата относительно земной поверхности посредством цифровой фотокамеры либо системы технического зрения (СТЗ), а также алгоритм начальной выставки навигационной системы.

**Ключевые слова:** система технического зрения, цифровая фотокамера, система навигации, счисление координат, начальная выставка.

### Введение

Определение координат летательных аппаратов (ЛА) является чрезвычайно важной задачей, которую решают с применением различных систем навигации. Наиболее распространенными системами навигации являются инерциальные навигационные системы (ИНС), среди их особенностей следует выделить нарастающие со временем ошибки измерения координат, значительные масса и стоимость. Последние особенности обуславливают использование их преимущественно в авиации и морском транспорте. Особенности их погрешностей требуют применения дополнительных средств навигации, обеспечивающих коррекцию и начальную выставку ИНС. В последние годы все большее распространение получают спутниковые навигационные системы (СНС), которые обладают рядом преимуществ, таких как неограниченная зона применения, малые габариты и стоимость, высокая точность. Однако имеются и недостатки, которые связаны с дискретностью во времени навигационной информации, зависимостью от помеховой обстановки и неавтономностью. На основе платформенных ИНС (БИНС) и СНС разработаны новые системы навигации, в которых используются волоконно-оптические гироскопы (БИНС–500) либо системы на основе триад микромеханических гироскопов и акселерометров, а также барометрический высотомер и трехосный магнитометр (МИНС). Комплексование сигналов этих датчиков с данными приемника СНС позволяет формировать полное навигационное решение по координатам и углам ориентации. Системы имеют малый вес и высокую точность и могут быть установлены даже на сверхмалые беспилотные ЛА. Однако и эти ИНС не устранили в полной мере недостатки используемых датчиков первичной навигационной информации. Очень наглядно недостатки МИНС проявились при угоне американского БЛА RQ-170 иранскими военными, когда посредством внешнего сигнала были сформированы ложные координаты и обеспечена посадка.

Даже этот краткий экскурс в проблемы навигации ЛА показывает, что разработка новых средств навигации является актуальной.

### Счисление координат летательного аппарата посредством СТЗ

Бурное развитие оптоэлектроники и вычислительной техники обусловило появление нового средства навигации, основанного на таких датчиках первичной навигационной информации, как цифровые фотокамеры, которые обеспечивают поток видеоданных – изображений земной поверхности. Обработка изображений и вычисление координат ЛА по результатам этой обработки составляют суть задачи, решаемой достаточно производительным цифровым вычислителем. К настоящему времени известно четыре подхода к получению навигационной информации [1; 2]:

- счисление координат;
- использование цифровой модели рельефа местности;

использование цифровых снимков местности;

использование характерных ориентиров с известными координатами.

Особенностями этого навигационного средства являются малая масса, габариты и стоимость, высокая точность, неавтономность, зависимость от атмосферных условий.

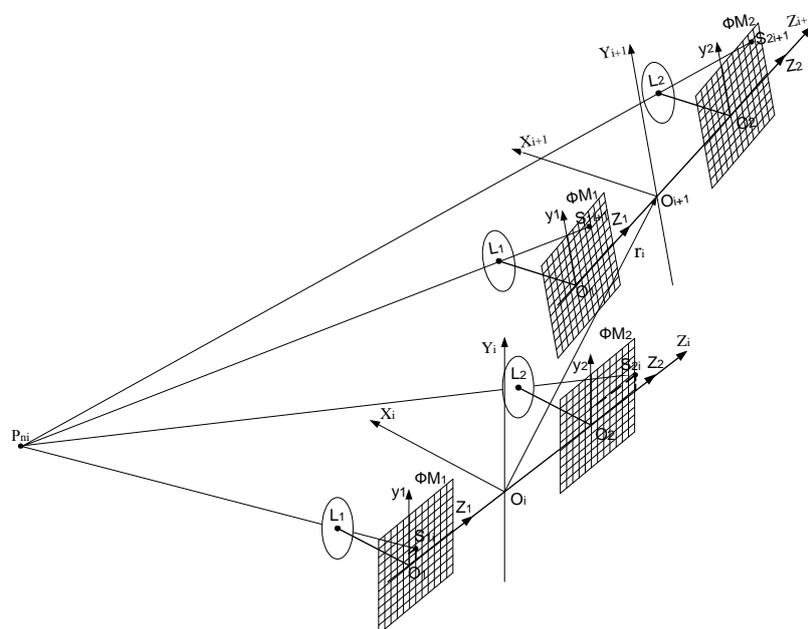
Сочетание этих особенностей показывает, что эти системы целесообразно комплексировать с другими навигационными системами, а в отдельных обоснованных случаях – применять автономно.

Рассмотрим возможность применения системы технического зрения для решения такой важной задачи навигации, как счисление координат ЛА по изображениям земной поверхности, получаемым посредством цифровых фотокамер [3]. Этот режим работы СТЗ может найти применение для маловысотных полетов авиации и на автомобильном транспорте, когда обеспечивается видимость земной поверхности.

Пусть прямоугольная система координат  $O_i X_i Y_i Z_i$ , (рис. 1) связана с  $i$ -м положением ЛА (в момент  $i$ -й фотоэкспозиции), а фотоматрицы цифровых фотокамер расположены в плоскости  $O_i Y_i Z_i$ , тогда оптическая ось объектива параллельна оси  $O_i X_i$ . Центры фотоматриц расположены симметрично относительно начала координат  $O_i$  на расстояниях  $B/2$ .

В точках  $L_1$  и  $L_2$  располагаются геометрические центры объективов левой и правой цифровых фотокамер, формирующих оптические изображения  $S_{1i}$  и  $S_{2i}$  особой точки земной поверхности  $P_{ni}$  ( $n = \overline{1,3}$ ), а в следующий момент времени  $S_{1i+1}$  и  $S_{2i+1}$ . Фотоматрицы системы технического зрения расположены в плоскости  $O_i Y_i Z_i$ , а оптические оси объективов параллельны оси  $O_i X_i$ .

Фотоэкспонирование изображений земной поверхности на фотоматрицах системы технического зрения производится из последовательных положений ЛА, которые пронумеруем индексом  $i = 0, 1, 2, \dots$ . После обработки изображений, определения на нем трех особых точек  $P_{ni}$  и их стереоотождествления определяются координаты их изображений на фотоматрицах.



**Рис. 1.** Расположение элементов СТЗ в  $i$ -й и  $i+1$ -й моменты экспозиции

Положение системы координат  $O_{i+1} X_{i+1} Y_{i+1} Z_{i+1}$ , связанной с ЛА, относительно ее предыдущего положения  $O_i X_i Y_i Z_i$  задается вектором смещения начала координат  $r_i$ , обусловленного движением ЛА, а изменение углового положения системы  $O_i X_i Y_i Z_i$  – матрицей направляющих косинусов ( $A_i$ )

$$(A_i) = \begin{pmatrix} \cos \beta_i \cos \phi_i & \sin \phi_i & -\sin \beta_i \cos \phi_i \\ \sin \beta_i \sin \alpha_i - \sin \phi_i \cos \beta \cos \alpha_i & \cos \alpha_i \cos \phi_i & \cos \beta_i \sin \alpha_i + \sin \beta \sin \phi_i \cos \alpha_i \\ \sin \beta_i \cos \alpha_i + \cos \beta \sin \phi_i \sin \alpha_i & -\cos \phi_i \sin \alpha_i & \cos \beta_i \cos \alpha_i - \sin \beta_i \sin \phi_i \sin \alpha_i \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где  $\beta_i, \phi_i, \alpha_i$  – углы последовательных разворотов транспортного средства вокруг осей  $O_i Y_i, O_i Z_i, O_i X_i$  соответственно.

Координаты  $X_{P_{ni}}, Y_{P_{ni}}, Z_{P_{ni}}$  n-й особой точки  $P_{ni}$  относительно транспортного средства вычисляются по следующим формулам:

$$X_{P_{ni}} = F \left( 1 + \frac{B}{Z_{2ni} - Z_{1ni}} \right); \quad Y_{P_{ni}} = Y_{1ni} \frac{B}{Z_{1ni} - Z_{2ni}}; \quad Z_{P_{ni}} = \frac{B(Z_{1ni} + Z_{2ni})}{2(Z_{1ni} - Z_{2ni})}, \quad (2)$$

где  $Y_{1ni}, Z_{1ni}, Y_{2ni}, Z_{2ni}$  – координаты изображений идентичных точек, первый индекс обозначает номер фоточувствительной матрицы системы технического зрения,  $m$ ;  $F$  – фокусное расстояние фотообъектива,  $m$ ;  $B$  – расстояние между первой и второй цифровыми фотокамерами,  $m$ .

Запишем соотношение, связывающее измеряемые вектора  $(X_{P_{n,i+1}}, Y_{P_{n,i+1}}, Z_{P_{n,i+1}})$  и  $(X_{P_{n,i}}, Y_{P_{n,i}}, Z_{P_{n,i}})$  в  $i$ -й и  $i+1$ -й последовательные фотоэкспозиции

$$\begin{pmatrix} X_{r_i} & Y_{r_i} & Z_{r_i} \end{pmatrix}^T = (A_i)^T \begin{pmatrix} X_{P_{n,i+1}} & Y_{P_{n,i+1}} & Z_{P_{n,i+1}} \end{pmatrix}^T - \begin{pmatrix} X_{P_{n,i}} & Y_{P_{n,i}} & Z_{P_{n,i}} \end{pmatrix}^T, \quad (3)$$

где матрица  $(A_i) = \begin{pmatrix} X_{T_{i+1}} & X_{G_{i+1}} & Y_{T_{i+1}} Z_{G_{i+1}} - Y_{G_{i+1}} Z_{T_{i+1}} \\ Y_{T_{i+1}} & Y_{G_{i+1}} & X_{G_{i+1}} Z_{T_{i+1}} - X_{T_{i+1}} Z_{G_{i+1}} \\ Z_{T_{i+1}} & Z_{G_{i+1}} & X_{T_{i+1}} Y_{G_{i+1}} - X_{G_{i+1}} Y_{T_{i+1}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_{T_i} & X_{G_i} & Y_{T_i} Z_{G_i} - Y_{G_i} Z_{T_i} \\ Y_{T_i} & Y_{G_i} & X_{G_i} Z_{T_i} - X_{T_i} Z_{G_i} \\ Z_{T_i} & Z_{G_i} & X_{T_i} Y_{G_i} - X_{G_i} Y_{T_i} \end{pmatrix}^{-1}; \quad (4)$

$X_{T_i} = X_{P_{2,i}} - X_{P_{1,i}}, \quad Y_{T_i} = Y_{P_{2,i}} - Y_{P_{1,i}}, \quad Z_{T_i} = Z_{P_{2,i}} - Z_{P_{1,i}}, \quad X_{T_{i+1}} = X_{P_{2,i+1}} - X_{P_{1,i+1}}, \quad Y_{T_{i+1}} = Y_{P_{2,i+1}} - Y_{P_{1,i+1}},$   
 $Z_{T_{i+1}} = Z_{P_{2,i+1}} - Z_{P_{1,i+1}}$  – координаты вектора  $\overline{P_{2i}P_{1i}}$  в  $i$ -й и  $i+1$ -й моменты соответственно;  
 $X_{G_i} = X_{P_{2,i}} - X_{P_{3,i}}, \quad Y_{G_i} = Y_{P_{2,i}} - Y_{P_{3,i}}, \quad Z_{G_i} = Z_{P_{2,i}} - Z_{P_{3,i}}, \quad X_{G_{i+1}} = X_{P_{2,i+1}} - X_{P_{3,i+1}}, \quad Y_{G_{i+1}} = Y_{P_{2,i+1}} - Y_{P_{3,i+1}},$   
 $Z_{G_{i+1}} = Z_{P_{2,i+1}} - Z_{P_{3,i+1}}$  – координаты вектора  $\overline{P_{2i}P_{3i}}$  в  $i$ -й и  $i+1$ -й моменты соответственно.

Полученное соотношение содержит шесть неизвестных величин  $\alpha_i, \beta_i, \phi_i$  и  $X_{r_i}, Y_{r_i}, Z_{r_i}$  – координаты вектора перемещения из  $i$ -го в  $i+1$ -е положение.

Определим теперь угловое и линейное перемещение между двумя положениями транспортного средства, соответствующими моментам времени, пронумерованными  $i=1$  (начальное положение) и  $i=m$  (конечное положение). Это искоемое перемещение выразим в системе координат  $O_m X_m Y_m Z_m$ , для этого используем соотношение (3). Умножением слева обеих частей этого равенства на матрицу  $(A_m)(A_{m-1}) \dots (A_{i+1})(A_i)$  выполним проецирование на оси системы координат  $O_m X_m Y_m Z_m$ , а суммируя обе части этого равенства по  $i=1 \dots m$ , получим

$$\begin{pmatrix} X_{R_m} & Y_{R_m} & Z_{R_m} \end{pmatrix}^T = \sum_{i=1}^m \left\{ \left[ \prod_{k=i+1}^m (A_k) \right] \begin{pmatrix} X_{P_{1,i+1}} & Y_{P_{1,i+1}} & Z_{P_{1,i+1}} \end{pmatrix}^T - \left[ \prod_{k=i}^m (A_k) \right] \begin{pmatrix} X_{P_{1,i}} & Y_{P_{1,i}} & Z_{P_{1,i}} \end{pmatrix}^T \right\}, \quad (5)$$

где  $X_{R_m}, Y_{R_m}, Z_{R_m}$  – координаты вектора перемещения транспортного средства из начального в конечное положение ( $i=m$ ).

Матрица, описывающая вращательное движение транспортного средства из начального в конечное положение, записывается в виде произведения матриц, описывающих вращения на этапах между двумя фотоэкспозициями

$$(A) = \prod_{k=1}^m (A_k). \quad (6)$$

Найдем текущие географические координаты летательного аппарата в  $m$ -й момент

$$\left. \begin{aligned} R_m &= R_0 + X_{r_m} a_{12} + Y_{r_m} a_{22} + Z_{r_m} a_{32} \\ \varphi_m &= \varphi_{m-1} + (X_{r_m} a_{11} + Y_{r_m} a_{21} + Z_{r_m} a_{31}) / R_m \\ \lambda_m &= \lambda_{m-1} + (X_{r_m} a_{13} + Y_{r_m} a_{23} + Z_{r_m} a_{33}) / R_m \end{aligned} \right\}, \quad (7)$$

где  $a_{ij}$  – элементы матрицы направляющих косинусов вида (6), определяемой текущими углами крена, курса и тангажа подвижного объекта.

Поскольку изображения земной поверхности содержат значительное число особых точек, то целесообразно обеспечить многократные измерения координат подвижного объекта с обработкой их результатов. Это обеспечит снижение погрешностей измерений, а также текущий контроль уровня этих ошибок.

Второй подход к снижению погрешностей счисления координат – это использование субпиксельной обработки изображений при определении особых точек.

Таким образом, решение задачи об определении поступательного и углового перемещения подвижного объекта относительно земли основано на измерении координат изображений множества особых точек земной поверхности, фотоэкспозиция которых осуществляется из последовательных точек траектории, и вычислении на основе этих измерений его пространственного перемещения.

### Счисление координат летательного аппарата посредством фотокамеры

Задача по определению перемещения ЛА относительно земной поверхности может быть решена при наличии только одной цифровой фотокамеры, что может рассматриваться как резервный вариант, применяемый при отказе одной из камер, либо как самостоятельный вариант применения. При этом недостаток измерительных средств компенсируется использованием шести точек земной поверхности (вместо трех в предыдущей задаче), а также существенно большим числом вычислений.

На рис. 2 показаны схема размещения двух положений фотоматрицы в процессе определения пространственного перемещения ЛА и одна из шести особых точек  $P^l$  (индекс  $l=1\dots6$  обозначает принадлежность параметров соответствующей особой точке земной поверхности).

Пусть прямоугольная система координат  $O_i X_i Y_i Z_i$  (рис. 2) связана с положением ЛА в момент  $i$ -й фотоэкспозиции, фотоматрица расположена в плоскости  $O_i X_i Y_i$ , а оптическая ось объектива совпадает с осью  $O_i X_i$ . Система координат  $O_{i+1} X_{i+1} Y_{i+1} Z_{i+1}$  связана с вторым положением ЛА (в момент  $i+1$ -й фотоэкспозиции). Центр фотоматрицы расположен в начале координат  $O_i$  ( $O_{i+1}$  – его следующее положение). В точке  $F_i$  ( $F_{i+1}$ ) располагается геометрический центр объектива, формирующего оптическое изображение  $S_i$  ( $S_{i+1}$ ) особой точки земной поверхности  $P^l$ .

Производится фотоэкспонирование изображений земной поверхности на фотоматрице из двух положений ЛА. Обработка оцифрованного изображения земной поверхности с целью нахождения особых точек может осуществляться методами, описанными в работе [4]. Применение цветного изображения позволяет решать эту задачу еще более достоверно, что обусловлено большей его информативностью.

Для решения поставленной задачи по определению приращений координат ЛА за время между двумя последовательными фотоэкспозициями необходимо иметь, по крайней мере, шесть уравнений, поэтому используем шесть особых точек на земной поверхности, любые три из которых не лежат на одной прямой. Примером такой фигуры может быть шестиугольник, вершины которого лежат на окружности или в ее окрестности. Для каждой из шести точек получено уравнение, связывающее искомые приращения, измеряемые величины и известные константы

$$\frac{\mu'_{yi} - \mu'_{yi}(v_{xi} + \alpha_{i21}\mu'_{yi+1} + \alpha_{i31}\mu'_{zi+1}) - (v_{yi} + \alpha_{i22}\mu'_{yi+1} + \alpha_{i32}\mu'_{zi+1})}{\alpha_{i12} - \alpha_{i22}\mu'_{yi+1} - \alpha_{i32}\mu'_{zi+1} - \mu'_{yi}(\alpha_{i11} - \alpha_{i21}\mu'_{yi+1} - \alpha_{i31}\mu'_{zi+1})} = \frac{\mu'_{zi} - \mu'_{zi}(v_{xi} + \alpha_{i21}\mu'_{yi+1} + \alpha_{i31}\mu'_{zi+1}) - (v_{zi} + \alpha_{i23}\mu'_{yi+1} + \alpha_{i33}\mu'_{zi+1})}{\alpha_{i13} - \alpha_{i23}\mu'_{yi+1} - \alpha_{i33}\mu'_{zi+1} - \mu'_{zi}(\alpha_{i11} - \alpha_{i21}\mu'_{yi+1} - \alpha_{i31}\mu'_{zi+1})}, \quad (8)$$

где  $\mu_{yi} = \frac{y_{ni}}{F}$ ,  $\mu_{yi+1} = \frac{y_{ni+1}}{F}$ ,  $\mu_{zi} = \frac{z_{ni}}{F}$ ,  $\mu_{zi+1} = \frac{z_{ni+1}}{F}$  – величины, измеряемые посредством фотоматрицы;  $F$  – фокусное расстояние объектива фотокамеры;  $v_{xi} = \frac{x_{0i}}{F}$ ,  $v_{yi} = \frac{y_{0i}}{F}$ ,  $v_{zi} = \frac{z_{0i}}{F}$  – неизвестные величины;  $\alpha_{imn}$  ( $n, m = 1 \dots 3$ ) – неизвестные коэффициенты матрицы направляющих косинусов ( $A_i$ ), связанные с тремя угловыми величинами  $\alpha_i, \beta_i, \phi_i$  (1).

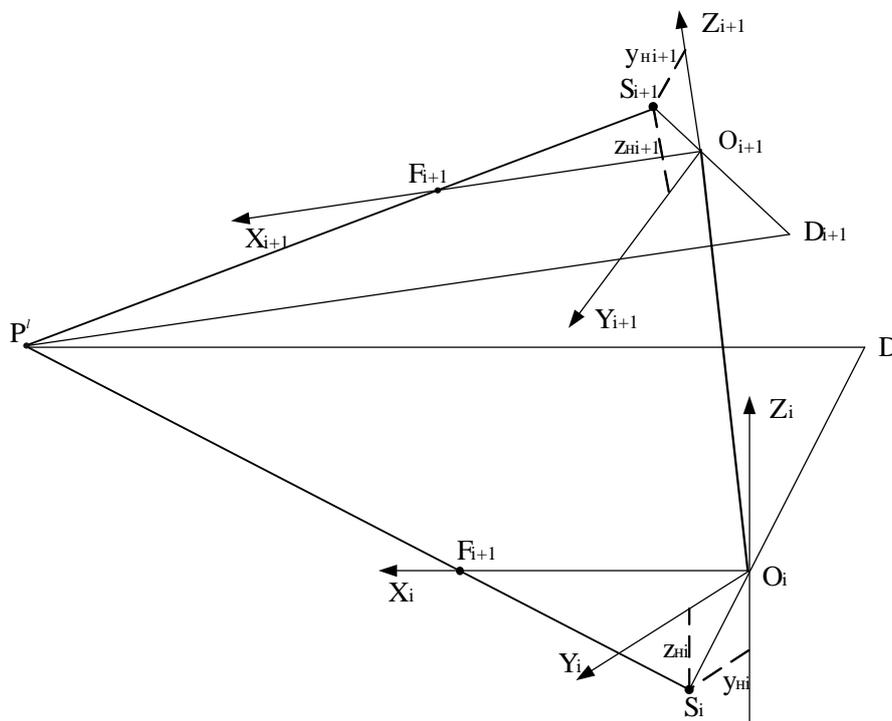


Рис. 2. Положения фотоматрицы при определении координат ЛА относительно земной поверхности

Решение системы уравнений (8) относительно неизвестных осуществляют одним из численных методов, например, методом простых итераций, Ньютона, Брауна или последовательных приближений, что несколько увеличивает объем вычислительной процедуры по сравнению с предыдущим алгоритмом. Программное обеспечение численных методов решения систем нелинейных уравнений известно на многих языках программирования, в том числе для пакета Mathcad (например, функция **minerr**). В остальном алгоритм подобен описанному выше, поэтому должен быть дополнен соотношениями (3), (4), (6) и (7).

Таким образом, решение задачи об определении поступательного и углового перемещения ЛА относительно земли основано на измерении координат изображений шести особых точек земной поверхности, фотоэкспозиция которых осуществляется из двух точек траектории транспортного средства, и вычисления на основе этих измерений его пространственного перемещения. Эта задача показывает, что СТЗ может приобрести еще одну «профессию» и стать еще одним источником навигационной информации для комплексирования с ИНС, СНС и другими средствами навигации.

### Начальная выставка систем навигации

Задача начальной выставки навигационных систем состоит в определении координат местоположения и углового положения ЛА и возникает при каждом включении системы в работу. Эта задача решается для систем навигации, использующих режим счисления координат, таких как ИНС или видеонавигационная система. При реализации начальной выставки в ИНС традиционно используются гирокомпасирование, выставка по магнитному курсу, по запомненному курсу и др., однако все известные способы имеют те или иные недостатки. Например, гирокомпасирование требует значительного времени не менее 10 мин, а магнитный курс определяется с погрешностью по меньшей мере 1 градус. Во всех случаях начальная выставка должна выполняться либо быстрее, либо с большей точностью, поэтому новые подходы к решению этой задачи актуальны.

Рассмотрим способ определения линейных и угловых координат ЛА, основанный на использовании бортовой системы технического зрения и наземного созвездия из трех наземных лазерных маяков [3]. Определение координат ЛА целесообразно выполнять на стартовой позиции перед взлетом, когда в чувствительных элементах навигационной системы тепловые переходные процессы близки к завершению после ее включения.

Принцип работы СТЗ в режиме измерения положения ЛА основан на формировании изображений трех лазерных наземных маяков на фоточувствительных матрицах (ФМ) цифровых фотокамер, обработке оцифрованных изображений с целью определения координат изображений маяков, вычисления линейных и угловых координат подвижного объекта относительно неподвижной системы координат, связанной с маяками.

Вывод соотношений, составляющих основу вычислительного алгоритма СТЗ, осуществляется с использованием положений геометрической оптики.

Рассмотрим оптическую схему измерения (рис. 3). Пусть горизонтальная система координат  $O^{(1)}X^{(1)}Y^{(1)}Z^{(1)}$  связана с ВПП, точка  $O^{(1)}$  расположена на оси ВПП, ось  $O^{(1)}X^{(1)}$  совпадает с осью ВПП, ось  $O^{(1)}Y^{(1)}$  – нормаль к поверхности ВПП. Рядом с ВПП установлены три лазерных маяка  $M_1$ ,  $M_2$  и  $M_3$ , координаты которых  $X_{M_1}^{(1)}, Y_{M_1}^{(1)}, Z_{M_1}^{(1)}, X_{M_2}^{(1)}, Y_{M_2}^{(1)}, Z_{M_2}^{(1)}, X_{M_3}^{(1)}, Y_{M_3}^{(1)}, Z_{M_3}^{(1)}$  в системе  $O^{(1)}X^{(1)}Y^{(1)}Z^{(1)}$  известны.

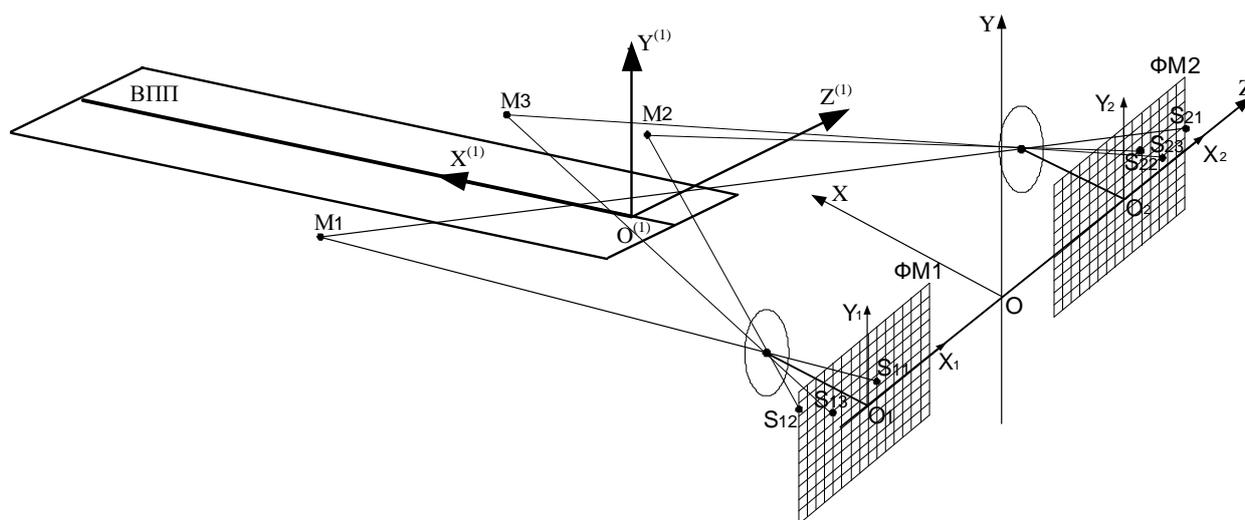


Рис. 3. Оптическая схема измерения

Система координат  $OXYZ$  связана с СТЗ, которая в свою очередь установлена на ЛА, точка  $O$  совпадает с центром отрезка, соединяющего геометрические центры ФМ, ось  $OX$  (продольная ось ЛА) направлена параллельно оптическим осям фотообъективов, а ось  $OZ$  (поперечная ось ЛА) совпадает с линией, проходящей через геометрические центры ФМ, ось  $OY$  добавляет дру-

гие оси до правой системы координат. Известны расстояние  $B$  между центрами ФМ и фокусные расстояния фотообъективов  $F_1 = F_2 = F$ .

Работа бортовой системы технического зрения сводится к определению координат маяков в системе координат  $OXYZ$ , которые вычисляются следующим образом:

$$X_{OM_i} = F \left( \frac{B}{Z_{2i} - Z_{1i}} + 1 \right); \quad Y_{OM_i} = \frac{Y_{1i} B}{Z_{1i} - Z_{2i}}; \quad Z_{OM_i} = \frac{B Z_{1i} + Z_{2i}}{2 Z_{1i} - Z_{2i}}, \quad (9)$$

где  $Y_{1i}, Z_{1i}, Y_{2i}, Z_{2i}$  – координаты изображений  $S_{1i}, S_{2i}$  маяков  $M_i$  на ФМ, первый индекс обозначает номер ФМ, второй индекс  $i=1 \dots 3$  – номер маяка.

Тогда координаты ЛА в системе координат  $O^{(1)}X^{(1)}Y^{(1)}Z^{(1)}$  вычисляются следующим образом

$$\begin{pmatrix} X_0^{(1)} & Y_0^{(1)} & Z_0^{(1)} \end{pmatrix}^T = \begin{pmatrix} X_{O^{(1)}M_i}^{(1)} & Y_{O^{(1)}M_i}^{(1)} & Z_{O^{(1)}M_i}^{(1)} \end{pmatrix}^T - (A) \begin{pmatrix} X_{OM_i} & Y_{OM_i} & Z_{OM_i} \end{pmatrix}^T, \quad (10)$$

где  $\begin{pmatrix} X_0^{(1)} & Y_0^{(1)} & Z_0^{(1)} \end{pmatrix}^T$  – вектор, характеризующий положение ЛА в системе координат

$O^{(1)}X^{(1)}Y^{(1)}Z^{(1)}$ ;  $X_{O^{(1)}M_i}^{(1)} \ Y_{O^{(1)}M_i}^{(1)} \ Z_{O^{(1)}M_i}^{(1)}$  – координаты вектора  $\overrightarrow{O^{(1)}M_i}$  в системе  $OXYZ$ ;

$X_{OM_i} \ Y_{OM_i} \ Z_{OM_i}$  – координаты вектора  $\overrightarrow{M_i O}$ ; матрица направляющих косинусов

$$(A) = \begin{pmatrix} \cos \psi \cos \nu & \sin \nu & -\sin \psi \cos \nu \\ \sin \psi \sin \gamma - \sin \nu \cos \psi \cos \gamma & \cos \gamma \cos \nu & \cos \psi \sin \gamma + \sin \psi \sin \nu \cos \gamma \\ \sin \psi \cos \gamma + \cos \psi \sin \nu \sin \gamma & -\cos \nu \sin \gamma & \cos \psi_{\text{Л}} \cos \gamma - \sin \psi \sin \nu \sin \gamma \end{pmatrix};$$

$\psi, \gamma, \nu$  – углы рыскания, крена и тангажа ЛА соответственно.

$$(A) = \begin{pmatrix} X_{O^{(1)}M_2}^{(1)} - X_{O^{(1)}M_1}^{(1)} & X_{O^{(1)}M_3}^{(1)} - X_{O^{(1)}M_2}^{(1)} & (Y_{O^{(1)}M_2}^{(1)} - Y_{O^{(1)}M_1}^{(1)})(Z_{O^{(1)}M_3}^{(1)} - Z_{O^{(1)}M_2}^{(1)}) - \\ & & -(Y_{O^{(1)}M_3}^{(1)} - Y_{O^{(1)}M_2}^{(1)})(Z_{O^{(1)}M_2}^{(1)} - Z_{O^{(1)}M_1}^{(1)}) \\ Y_{O^{(1)}M_2}^{(1)} - Y_{O^{(1)}M_1}^{(1)} & Y_{O^{(1)}M_3}^{(1)} - Y_{O^{(1)}M_2}^{(1)} & (X_{O^{(1)}M_3}^{(1)} - X_{O^{(1)}M_2}^{(1)})(Z_{O^{(1)}M_2}^{(1)} - Z_{O^{(1)}M_1}^{(1)}) - \\ & & -(X_{O^{(1)}M_2}^{(1)} - X_{O^{(1)}M_1}^{(1)})(Z_{O^{(1)}M_3}^{(1)} - Z_{O^{(1)}M_2}^{(1)}) \\ Z_{O^{(1)}M_2}^{(1)} - Z_{O^{(1)}M_1}^{(1)} & Z_{O^{(1)}M_3}^{(1)} - Z_{O^{(1)}M_2}^{(1)} & (X_{O^{(1)}M_2}^{(1)} - X_{O^{(1)}M_1}^{(1)})(Y_{O^{(1)}M_3}^{(1)} - Y_{O^{(1)}M_2}^{(1)}) - \\ & & -(X_{O^{(1)}M_3}^{(1)} - X_{O^{(1)}M_2}^{(1)})(Y_{O^{(1)}M_2}^{(1)} - Y_{O^{(1)}M_1}^{(1)}) \end{pmatrix} \times$$

$$\times \begin{pmatrix} X_{OM_2} - X_{OM_1} & X_{OM_3} - X_{OM_2} & (Y_{OM_2} - Y_{OM_1})(Z_{OM_3} - Z_{OM_2}) - \\ & & -(Y_{OM_3} - Y_{OM_2})(Z_{OM_3} - Z_{OM_2}) \\ Y_{OM_2} - Y_{OM_1} & Y_{OM_3} - Y_{OM_2} & (X_{OM_3} - X_{OM_2})(Z_{OM_2} - Z_{OM_1}) - \\ & & -(X_{OM_2} - X_{OM_1})(Z_{OM_3} - Z_{OM_2}) \\ Z_{OM_2} - Z_{OM_1} & Z_{OM_3} - Z_{OM_2} & (X_{OM_2} - X_{OM_1})(Y_{OM_3} - Y_{OM_2}) - \\ & & -(X_{OM_3} - X_{OM_2})(Y_{OM_2} - Y_{OM_1}) \end{pmatrix}^{-1}. \quad (11)$$

Поскольку векторы  $\overrightarrow{OM_i} (X_{OM_i}, Y_{OM_i}, Z_{OM_i})^T$  в системе координат  $OXYZ$  непосредственно измеряются с помощью СТЗ, а вектор положения маяков в системе координат  $O^{(1)}X^{(1)}Y^{(1)}Z^{(1)}$   $\begin{pmatrix} X_{O^{(1)}M_i}^{(1)} & Y_{O^{(1)}M_i}^{(1)} & Z_{O^{(1)}M_i}^{(1)} \end{pmatrix}^T$  известен по условию задачи, то соотношение (10) можно использовать для вычисления координат ЛА относительно ВПП, предварительно вычислив матрицу  $(A)$  посредством соотношения (11).

Последнее выражение дает возможность вычислить углы рыскания, тангажа и крена:

$$\psi = -\arctg(\alpha_{13} / \alpha_{11}); \quad (12)$$

$$\nu = \arcsin \alpha_{12}; \quad (13)$$

$$\gamma = -\arctg(\alpha_{32} / \alpha_{22}), \quad (14)$$

где  $\alpha_{nm}$  – коэффициенты матрицы (A) (n, m = 1...3 - номера строк и столбцов).

Таким образом, задача об определении координат ЛА  $X_0^{(1)}, Y_0^{(1)}, Z_0^{(1)}, \psi, \gamma, \nu$  решается путем применения совокупности трех наземных маяков и бортовой системы технического зрения, при этом алгоритм вычисления основан на аналитическом решении переопределенной системы уравнений (10) и состоит в последовательном применении соотношений (9), (11), (10), (12), (13) и (14).

### Заключение

Оптико-электронная измерительная система на базе одной либо двух цифровых фотокамер обеспечивает счисление координат ЛА относительно земной поверхности.

Совместно с группой из трех разнесенных наземных лазерных маяков оптико-электронная измерительная система обеспечивает начальную выставку навигационной системы, при этом может быть использована для обеспечения автоматической посадки.

Оптико-электронная система навигации при комплексировании с современной БИНС позволяет улучшить ее характеристики (снизить погрешности определения координат до 30 см [1], уменьшить время начальной выставки < 1 с, а погрешность начальной выставки до 1°).

### ЛИТЕРАТУРА

1. Гришин В.А. Системы технического зрения в решении задач управления беспилотными летательными аппаратами // *Датчики и системы*. 2009. № 2.
2. Купервассер О., Рубинштейн А. Система навигации беспилотных летательных аппаратов с помощью видео / 4 конференция «ТРИЗ. Практика применения методических инструментов в бизнесе». [Электронный ресурс]. URL: <http://www.metodolog.ru/node/1525>.
3. Патент РФ 2383032 МПК7 G 01s 11/00. Способ измерения координат мерцающей точки земной поверхности и устройство для его осуществления / Бондарев В.Г., Бондарев В.В., Бондарев М.В., Лейбич А.А., Степанянц А.З., Смалюк О.В. // Заявл. 02.06.08. Опубл. 27.02.10. Бюл. № 6. 18 с.

### VIDEONAVIGATION OF AN AIRCRAFT

Bondarev V.G.

Algorithms coordinate value of the aircraft relative to the earth's surface by means of a digital camera or vision systems, as well as the initial alignment algorithm for the navigation system are presented.

**Keywords:** computer vision system, digital camera, navigation system, reckoning coordinates, initial alignment.

### REFERENCES

1. Grishin V.A. Sistemy tekhnicheskogo zreniya v reshenii zadach upravleniya bespilotnymi letatel'nymi apparatami. *Datchiki i sistemy*. 2009. № 2. (In Russian).
2. Kupervasser O., Rubinshteyn A. Sistema navigatsii bespilotnykh letatel'nykh apparatov s pomoshch'yu video. 4 konferentsiya «TRIZ. Praktika primeneniya metodicheskikh instrumentov v biznese». URL: <http://www.metodolog.ru/node/1525>. (In Russian).
3. Patent RF 2383032 MPK7 G 01s 11/00. *Sposob izmereniya koordinat mertsayushchey tochki zemnoy poverkhnosti i ustroystvo dlya yego osushchestvleniya*. Bondarev V.G., Bondarev V.V., Bondarev M.V., Leybich A.A., Stepanyants A.Z., Smalyuk O.V. Declared 02.06.08. Published 27.02.10. Bulletin № 6. 18 p. (In Russian).

### Сведения об авторе

**Бондарев Валерий Георгиевич**, 1952 г.р., окончил Рижское ВВАИУ им. Я. Алксниса (1978), доцент, кандидат технических наук, доцент кафедры информационных технологий и электроники СТИС, автор более 100 научных работ, область научных интересов – техническое зрение управляемых объектов.