

ПРОГРАММНО-АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАВИГАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА НА БАЗЕ ФОТОИЗОБРАЖЕНИЯ

Наталья Владимировна ПАВЛОВА родилась в городе Москве. Профессор МАИ. Доктор технических наук, профессор. Основные научные интересы — в области проектирования сложных измерительно-вычислительных комплексов на базе методов оптимизации, искусственного интеллекта и компьютерного моделирования. Автор более 150 научных работ. E-mail: pavlova@biosoft-m.ru

Natalia V. PAVLOVA, D.Sci., was born in Moscow. She is a Professor at the MAI. Her research interests are in design of complex measuring and computing systems based on optimization, artificial intelligence and computer simulation techniques. She has published over 150 technical papers. E-mail: pavlova@biosoft-m.ru

Евгений Маркович ЛУНЕВ родился в 1984 г. в городе Москве. Аспирант МАИ. Основные научные интересы — в области проектирования бортовых измерительно-вычислительных комплексов и компьютерного моделирования. Автор 3 научных работ. E-mail: e.m.lunev@gmail.com

Evgeny M. LUNEV, was born in 1984, in Moscow. He is working toward Ph.D. degree at the MAI. His research interests include design techniques for embedded measuring and computing systems and computer simulation. He has published 3 technical papers. E-mail: e.m.lunev@gmail.com

Исследуется возможность определения навигационных параметров беспилотного летательного аппарата на базе фотоизображения наземных объектов. Предложен алгоритм расчета навигационных параметров по известным координатам отображенных наземных объектов на снимке. Приведены результаты моделирования, подтвердившие возможность использования метода.

This article examines the possibility of definition of navigation parameters for an unmanned aerial vehicle on the basis of the ground-based objects photographic image. The algorithm of calculation of navigation parameters based on known coordinates of the displayed ground-based objects on image is presented. The modeling results which have confirmed the possibility of use of this method are provided.

Ключевые слова: БПЛА, фотоориентация, навигация, посадка, определение координат.

Key words: uav, photoorientation, navigation, landing, definition of coordinates.

Введение

Беспилотная авиация — одно из самых перспективных направлений в авиации на сегодняшний день. Удешевление электронных компонентов, рост производительности бортовых вычислительных

систем и уменьшение их весогабаритных характеристик привело к практической возможности создания малых беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) не только военного, но и общегражданского назначения [1].

Можно выделить следующие основные требования к таким БПЛА:

- низкая себестоимость (один из ключевых факторов в принятии в эксплуатацию подобных систем для гражданского применения, например, в геологоразведке, в поисково-спасательных операциях, в обеспечении безопасности на дорогах, в различных задачах в сфере поиска труднодоступных аварийных участков нефте- и газопроводов, линий электропередач);
- особый навигационно-пилотажный интерфейс (пилотажно-навигационный комплекс таких систем должен разрабатываться с учетом его эксплуатации неподготовленным или подготовленным за короткое время оператором);
- модульная архитектура оборудования, входящего в полезную нагрузку (каждый комплекс должен выполнять те, и только те задачи, которые ему следует решать для конкретного применения; таким образом, можно выделить универсальный носитель с заданной тяговооруженностью и модифицируемый набор полезной нагрузки);
- максимальная автономность в штатном режиме работы (на сегодняшний день такие комплексы выполняют в основном повторяющиеся задачи, предварительно спланированные на земле: облет некоторой территории, пролет по заданному маршруту, автоматический поиск цели; прослеживается потребность в автоматическом выполнении поставленных задач и максимальном исключении необходимости работы оператора);
- всепогодность, круглосуточность и возможность взлета/посадки с неподготовленных площадок (такие комплексы могут быть эффективны только в случае возможности их применения при любых условиях, так как поставленные задачи имеют ежедневный и круглосуточный характер; возможность их применения напрямую связана с условиями базирования).

Эти факторы оказывают существенное влияние на стремление производителей создавать недорогие многофункциональные, легко модифицируемые БПЛА, которые могут быть предложены для различных отраслей.

Проектирование таких комплексов связано с целым рядом проблем на всех направлениях разработки — аэродинамики, двигателестроения, технологии производства, материаловедения и, в особенности, систем управления и другого бортового оборудования. Построение бортового оборудования для такого класса летательных аппаратов требует при некотором упрощении существующих традиционных бортовых измерительно-вычислительных комплексов (ИВК) обеспечения не меньших точ-

ности и надежности всей системы управления. Одним из путей повышения точности и надежности здесь является использование дополнительной информации в расчетах.

К традиционным источникам информации для решения пилотажно-навигационных задач относятся [2]:

- магнитные компасы,
- гироскопические приборы и системы,
- баровысотомеры,
- датчики угловых скоростей и линейных ускорений (ДУС и ДЛУ),
- системы воздушных сигналов (СВС),
- радиовысотомеры,
- бесплатформенные инерциальные системы (БИНС),
- спутниковые навигационные системы (СНС).

Одним из возможных источников информации для БПЛА являются многообразные оптические системы, такие, как лазерные дальномеры, видеокамеры, тепловизионные системы.

Можно выделить два основных принципа построения таких систем [3]:

- непосредственное измерение излучаемого сигнала, а именно его мощности, длины волны, фазового смещения, времени прохождения сигнала (способ характерен для лазерных дальномеров и лидаров);
- относительные измерения в формирующемся общем изображении наблюдаемого объекта, в частности, геометрических размеров, контрастности, цветности (способ характерен для систем синтетического зрения — видеокамер, тепловизоров; для обработки получаемых данных используются приемы фотограмметрии).

Первый способ не требует дополнительных вычислений после получения информации с датчиков, однако сам вид получаемой информации не позволяет непосредственно построить полную картину окружающей обстановки. Кроме того, нет возможности оценить достоверность полученных данных, поскольку оптические свойства среды во время полета непостоянны и зависят от метеословий, времени суток, подстилающего рельефа и других источников освещения. Оптические датчики и системы, построенные по этому принципу, в основном используются как дополнительные источники информации и в строго ограниченных условиях применения [4]. Главными достоинствами таких систем является высокая точность и быстродействие.

Второй способ реализуется с постобработкой полученных данных — изображений наблюдаемых объектов. Результатом обработки являются как ча-

стичный, так и полный набор навигационных параметров, которые могут быть непосредственно использованы в решении пилотажно-навигационных задач. Физические ограничения их применения такие же, как и у первого типа систем, но здесь есть возможность расширить условия применения за счет введения избыточности и интеллектуальной обработки результатов измерений.

В основном, благодаря появлению цифровых фото- и видеокамер высокого разрешения, существенно упростился и ускорился процесс получения первичной информации для последующей сложной обработки [5]. Быстродействие и высокое разрешение современной фото- и видеотехники вкупе с мощностью вычислительной среды сделало возможным построение на их основе бортовых комплексов обработки фото- и видеоизображений с последующей выдачей уже рассчитанных навигационных данных с допустимыми временными задержками. Наличие на борту БПЛА видеокамеры, фотокамеры или тепловизора с высокими оптическими характеристиками на сегодняшний день стало практически обязательным [6]. Однако оптика на борту БПЛА используется в основном как полезная нагрузка, а как источник информации для управления самим летательным аппаратом она пока не применяется. Представляется целесообразным использовать эти данные и для управления, так как то, что нужно для получения информации, уже находится на борту, требуется только доукомплектовать систему вычислителем.

В статье и предлагается программно-алгоритмическое обеспечение для определения навигационных параметров на базе получаемого изображения на камере БПЛА.

Расчет навигационных параметров по фотоизображению

Требуется по имеющемуся изображению некоторого объекта или группы объектов и их известным свойствам (геометрическим размерам, положению относительно земли) определить относительное положение БПЛА в пространстве и его ориентацию. Основной сложностью в решении этой задачи является тот факт, что получаемое изображение — плоское. Это приводит к необходимости дополнить измерения другими данными, например, использовать несколько объектов наблюдения (точек) с известными относительными положениями. В основном измеряются координаты отображенных на плоскости проекции точек, и эта информация сравнивается с априорно известными координатами проецируемых точек. Если точки лежат на подстилающем рельефе, то, решая задачу определения

относительного положения БПЛА к наблюдаемым точкам, по сути определяем положение БПЛА относительно земли.

Ограничим задачу вычислением положения БПЛА в пространстве относительно заданных точек на плоскости. Такая задача особенно актуальна при заходе на посадку, когда нужна высокая точность и быстродействие и есть возможность разместить возле посадочной полосы источники света, которые могут служить теми самыми наблюдаемыми точками.

Пусть дана плоскость, относительно которой необходимо определить ориентацию и положение БПЛА. На самом БПЛА установлена и жестко с ним связана оптическая система, наблюдающая подстилающий рельеф. На этой плоскости размещены источники света. Объектив камеры, её подвес к БПЛА и наземные источники света выбраны так, что:

- все источники света наблюдаемы в объектив камеры на протяжении всего хода измерения;
- источники света различимы на протяжении всего хода измерений и могут быть вырождены в точку на плоскости проекции.

Тогда можно интерпретировать поставленную задачу следующим образом.

Задана неподвижная левая система координат $OXYZ$ (рис. 1), связанная с горизонтальной плоскостью. По проекции точек с известными координатами в этой системе на плоскость проекции (снимка), жестко связанную с БПЛА, найти углы рыскания, крена и тангажа, а также наклонную дальность, высоту и боковое отклонение БПЛА от начала системы координат.

Обозначим через $SXYZ$ систему координат снимка, где S — точка фотографирования. Плоскость XU выберем параллельно плоскости снимка. Тогда проекцией некоторой точки M на плоскость снимка будет точка m , находящаяся на пересечении луча MS с плоскостью снимка. Введем плоскую систему координат снимка $o'x'u$, тогда положение точки m на снимке будет определяться координатами x и y . Координатные оси x , y этой системы расположим параллельно соответствующим осям на снимке, а ось z совместим с главным лучом связи So' . Координаты x , y любой точки снимка в пространственной системе имеют те же значения, что и в плоской, а координата z для всех точек постоянна и равна фокусному расстоянию f снимка ($z = -f$).

Для восстановления связи между плоскими и пространственными координатами точки m необходимо определить внешние и внутренние элементы ориентирования снимка.

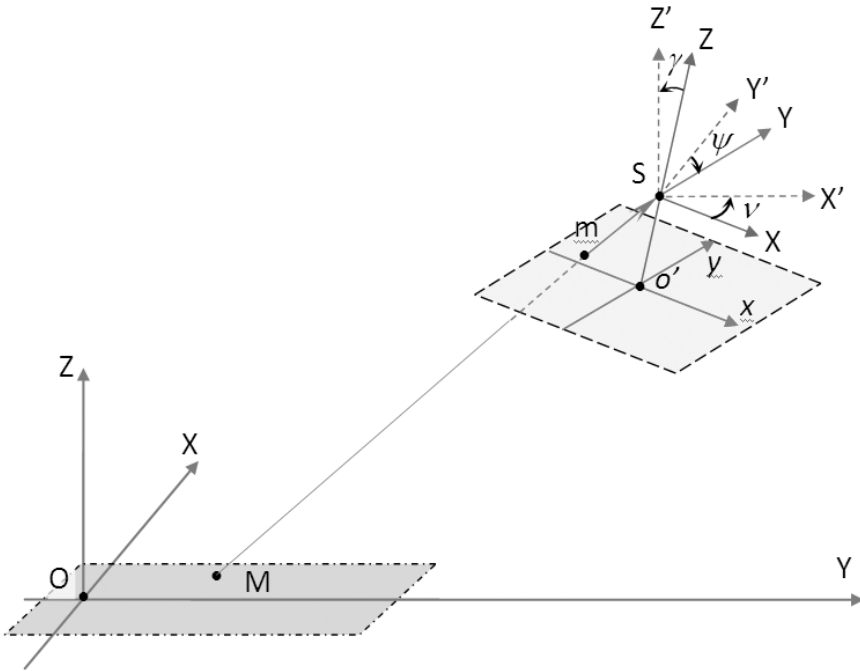


Рис. 1. Элементы ориентирования снимка

Элементами внутреннего ориентирования снимка являются координаты главной точки (точка пересечения перпендикулярного луча, проходящего через точку S и плоскости снимка) и фокусное расстояние камеры. Элементами внешнего ориентирования являются пространственные координаты точки S , а также углы поворота снимка γ , ψ и ν .

Для перехода от системы координат $SXYZ$ к системе $SX'Y'Z'$ используется матрица направляющих косинусов A , каждый элемент которой образован направляющими косинусами между соответствующими осями систем координат, участвующих в преобразовании:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{21} & a_{31} \\ a_{12} & a_{22} & a_{32} \\ a_{13} & a_{23} & a_{33} \end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix} \cos(X^\wedge, X') & \cos(X^\wedge, Y') & \cos(X^\wedge, Z') \\ \cos(Y^\wedge, X') & \cos(Y^\wedge, Y') & \cos(Y^\wedge, Z') \\ \cos(Z^\wedge, X') & \cos(Z^\wedge, Y') & \cos(Z^\wedge, Z') \end{bmatrix}.$$

В силу ортогональности направляющие косинусы матрицы связаны между собой шестью независимыми уравнениями:

$$a_{11}^2 + a_{21}^2 + a_{31}^2 = 1;$$

$$a_{12}^2 + a_{22}^2 + a_{32}^2 = 1;$$

$$a_{13}^2 + a_{23}^2 + a_{33}^2 = 1;$$

$$a_{11} \cdot a_{12} + a_{21} \cdot a_{22} + a_{31} \cdot a_{32} = 0;$$

$$a_{12} \cdot a_{13} + a_{22} \cdot a_{23} + a_{32} \cdot a_{33} = 0;$$

$$a_{13} \cdot a_{11} + a_{23} \cdot a_{21} + a_{33} \cdot a_{31} = 0.$$

Один поворот в пространстве можно заменить тремя последовательными поворотами в плоскости (рис. 2). Им будут соответствовать матрицы

A_ν, A_ψ, A_γ :

$$A_\nu = \begin{bmatrix} \cos \nu & -\sin \nu & 0 \\ \sin \nu & \cos \nu & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad A_\gamma = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \gamma & -\sin \gamma \\ 0 & \sin \gamma & \cos \gamma \end{bmatrix};$$

$$A_\psi = \begin{bmatrix} \cos \psi & 0 & \sin \psi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \psi & 0 & \cos \psi \end{bmatrix}.$$

Тогда

$$A = A_\psi \cdot A_\gamma \cdot A_\nu;$$

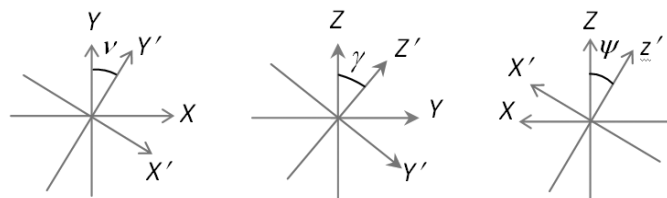


Рис. 2. Преобразование координат

$$A = \begin{pmatrix} \cos \psi \cos v + \sin \psi \sin \gamma \cos v - & \sin \psi \sin \gamma \cos v - & \sin \psi \cos \gamma \\ + \sin \psi \sin \gamma \sin v & - \cos \psi \sin v & \\ \cos \gamma \sin v & \cos \gamma \cos v & - \sin \gamma \\ \cos \psi \sin \gamma \sin v - & \sin \psi \sin v + & \cos \psi \cos \gamma \\ - \sin \psi \cos v & + \cos \psi \sin \gamma \cos v & \end{pmatrix};$$

$$\begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{pmatrix} = A \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}.$$

Ортогональная матрица A (матрица преобразования координат) имеет третий порядок. Ее элементами являются девять направляющих косинусов, поэтому вышеприведенное соотношение можно записать и так:

$$\begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Точка местности M и её изображение на снимке m находятся на одном проектирующем луче (рис. 3). Положение точек S и M в системе координат местности $X Y Z$ определяется векторами \bar{R}_S и \bar{R}_M соответственно, а положение точек m и M в системе координат $S X' Y' Z'$ — векторами \bar{r} и \bar{R} .

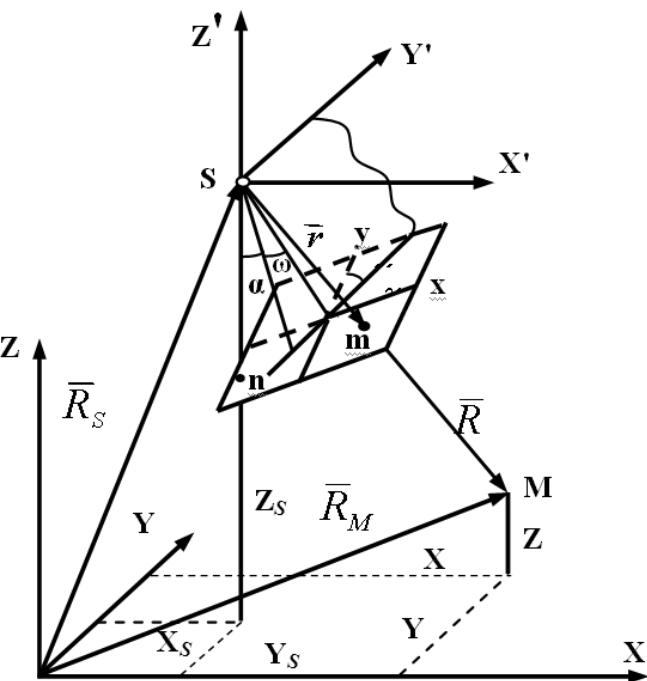


Рис. 3. Схемы связи координат точки местности и снимка

Векторы \bar{r} и \bar{R} коллинеарны, поэтому

$$\bar{R} = \lambda \bar{r}, \quad (2)$$

где λ — скаляр; $\bar{R} = \bar{R}_M - \bar{R}_S$.

Спроектируем векторы \bar{r} и \bar{R} на координатные оси X, Y, Z . Тогда

$$\begin{pmatrix} R_X \\ R_Y \\ R_Z \end{pmatrix} = \lambda \begin{pmatrix} r_X \\ r_Y \\ r_Z \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Из равенства (3) найдем λ и подставим его в выражения (1) и (2). Тогда

$$R_X = R_Z \frac{r_X}{r_Z}; \quad R_Y = R_Z \frac{r_Y}{r_Z}. \quad (4)$$

Так как

$$R_X = X - X_S, \quad R_Y = Y - Y_S, \quad R_Z = Z - Z_S,$$

$$r_{X'} = X', \quad r_{Y'} = Y', \quad r_{Z'} = Z',$$

то

$$X = X_S + (Z - Z_S) \frac{X'}{Z'}, \quad Y = Y_S + (Z - Z_S) \frac{Y'}{Z'} \quad (5)$$

или, с учётом равенства (1),

$$\begin{aligned} X &= X_S + (Z - Z_S) \frac{a_1(x - x_0) + a_2(y - y_0) + a_3z}{c_1(x - x_0) + c_2(y - y_0) + c_3z}, \\ Y &= Y_S + (Z - Z_S) \frac{b_1(x - x_0) + b_2(y - y_0) + b_3z}{c_1(x - x_0) + c_2(y - y_0) + c_3z}. \end{aligned} \quad (6)$$

Итак, если элементы ориентирования снимка даны, то два уравнения (6) имеют три неизвестных. Отсюда следует, что пространственные координаты точки местности по одиночному снимку не определить. Можно получить лишь плановое положение точки, но надо знать высоту фотографирования $H = -(Z - Z_S)$.

В фотограмметрии часто используются обратные зависимости (между координатами точки снимка и координатами соответствующей точки местности). Для их получения спроектируем векторы \bar{r} и \bar{R} равенства (2) на координатные оси системы координат $Sxyz$ (рис. 3), в результате получим

где f_1, f_2, \dots, f_n — заданные нелинейные (среди них могут быть и линейные) вещественнозначные функции n вещественных переменных x_1, x_2, \dots, x_n .

Обозначив

$$\bar{x} := \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \dots \\ x_n \end{pmatrix}, F(x) := \begin{pmatrix} f_1(\bar{x}) \\ f_2(\bar{x}) \\ \dots \\ f_n(\bar{x}) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_1(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ f_2(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ \dots \\ f_n(x_1, x_2, \dots, x_n) \end{pmatrix},$$

$$\bar{0} := \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \dots \\ 0 \end{pmatrix},$$

систему (13) можно записать одним уравнением

$$F(\bar{x}) = 0. \quad (14)$$

Пусть (A_k) — некоторая последовательность невырожденных вещественных $n \times n$ -матриц. Тогда, очевидно, последовательность задач

$$x = x - A_k F(x), \quad k = 0, 1, 2, \dots,$$

имеет те же решения, что и исходное уравнение (14), и для приближенного нахождения этих решений можно формально записать итерационный процесс

$$x^{(k+1)} = x^{(k)} - A_k F(x^{(k)}), \quad k = 0, 1, 2, \dots, \quad (15)$$

имеющий вид метода простых итераций.

Положим

$$A_k := [F'(x^{(k)})]^{-1},$$

где

$$F'(x) = J(x) = \begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_2}{\partial x_n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \frac{\partial f_n}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{pmatrix}$$

— матрица Якоби вектор-функции $F(x)$. Подставив A_k в (15), получим формулу метода Ньютона

$$x^{(k+1)} = x^{(k)} - [F'(x^{(k)})]^{-1} F(x^{(k)}), \quad (16)$$

обобщающего на многомерный случай скалярный метод. Эту формулу, требующую обращения матриц

на каждой итерации, можно переписать в неявном виде:

$$F'(x^{(k)})(x^{(k+1)} - x^{(k)}) = -F(x^{(k)}). \quad (17)$$

Применение (17) предполагает при каждом $k = 0, 1, 2, \dots$ решение линейной алгебраической системы

$$F'(x^{(k)})p^{(k)} = -F(x^{(k)})$$

относительно векторной поправки

$$p^{(k)} = (p_1^{(k)}, p_2^{(k)}, \dots, p_n^{(k)})^T,$$

а затем прибавление этой поправки к текущему приближению для получения следующего приближения:

$$x^{(k+1)} = x^{(k)} + p^{(k)}.$$

К решению таких линейных систем можно привлекать самые разные методы, как прямые, так и итерационные в зависимости от размерности n решаемой задачи и специфики матриц Якоби.

Сравнивая (17) с формальным разложением $F(x)$ в ряд Тейлора

$$F(x) = F(x^{(k)}) + F'(x^{(k)})(x - x^{(k)}) + \frac{1}{2!} F''(x^{(k)})(x - x^{(k)})^2 + \dots,$$

видим, что последовательность (x_k) в методе Ньютона получается в результате подмены при каждом $k = 0, 1, 2, \dots$ нелинейного уравнения $F(x) = 0$ или, что то же (при достаточной гладкости $F(x)$), уравнения

$$F(x^{(k)}) + F'(x^{(k)})(x - x^{(k)}) + \frac{1}{2!} F''(x^{(k)})(x - x^{(k)})^2 + \dots = 0$$

линейным уравнением

$$F(x^{(k)}) + F'(x^{(k)})(x - x^{(k)}) = 0,$$

т. е. с пошаговой линеаризацией. Как следствие этого факта, можно рассчитывать, что при достаточной гладкости $F(x)$ и достаточно хорошем начальном приближении $x^{(0)}$ сходимость порождаемой методом Ньютона последовательности (x_k) к решению x^* будет квадратичной и в многомерном случае. Новым, по сравнению со скалярным случаем, фактором, осложняющим применение метода Ньютона к решению n -мерных систем, является необ-

сходимость решения n -мерных линейных задач на каждой итерации (обращения матриц в (16) или решения системы линейных уравнений в (17)), вычислительные затраты на которые растут с ростом n , вообще говоря, непропорционально быстро. Уменьшение таких затрат — одно из направлений модификации метода Ньютона.

Если матрицу Якоби $F'(x)$ вычислить и обратиться лишь один раз — в начальной точке $x^{(0)}$, то от метода Ньютона (16) приходим к модифицированному методу Ньютона

$$x^{(k+1)} = x^{(k)} - [F'(x^{(0)})]^{-1} F(x^{(k)}). \quad (18)$$

Этот метод требует значительно меньших вычислительных затрат на один итерационный шаг, но итераций при этом может потребоваться значительно больше для достижения заданной точности по сравнению с основным методом Ньютона (16), поскольку, являясь частным случаем метода простых итераций ($A := [F'(x^{(0)})]^{-1}$), он имеет лишь скорость сходимости геометрической прогрессии.

Компромиссный вариант — это вычисление и обращение матриц Якоби не на каждом итерационном шаге, а через несколько шагов (иногда такие методы называют рекурсивными).

Например, простое чередование основного (16) и модифицированного (18) методов Ньютона приводит к итерационной формуле

$$x^{(k+1)} = x^{(k)} - [F'(x^{(k)})]^{-1} F(x^{(k)}), \quad (19)$$

где $A := [F'(x^{(0)})]^{-1}$, $k = 0, 1, 2, \dots$. За $x^{(k)}$ здесь принимается результат последовательного применения одного шага основного, а затем одного шага модифицированного метода, т.е. двухступенчатого процесса

$$\begin{aligned} z^{(k)} &= x^{(k)} - A_k F(x^{(k)}); \\ x^{(k+1)} &= z^{(k)} - A_k F(z^{(k)}). \end{aligned} \quad (20)$$

Доказано, что такой процесс при определенных условиях порождает кубически сходящуюся последовательность $(x^{(k)})$ [9].

Запишем систему (12) в виде вектор-функции:

$$F(\psi, v, \gamma, X_S, Y_S, Z_S) =$$

$$= \begin{bmatrix} x_k - f \frac{a_1(K_x - X_S) + b_1(K_y - Y_S) + c_1(K_Z - Z_S)}{a_3(K_x - X_S) + b_3(K_y - Y_S) + c_3(K_Z - Z_S)} \\ y_k - f \frac{a_2(K_x - X_S) + b_2(K_y - Y_S) + c_2(K_Z - Z_S)}{a_3(K_x - X_S) + b_3(K_y - Y_S) + c_3(K_Z - Z_S)} \\ x_l - f \frac{a_1(L_x - X_S) + b_1(L_y - Y_S) + c_1(L_Z - Z_S)}{a_3(L_x - X_S) + b_3(L_y - Y_S) + c_3(L_Z - Z_S)} \\ y_l - f \frac{a_2(L_x - X_S) + b_2(L_y - Y_S) + c_2(L_Z - Z_S)}{a_3(L_x - X_S) + b_3(L_y - Y_S) + c_3(L_Z - Z_S)} \\ x_m - f \frac{a_1(M_x - X_S) + b_1(M_y - Y_S) + c_1(M_Z - Z_S)}{a_3(M_x - X_S) + b_3(M_y - Y_S) + c_3(M_Z - Z_S)} \\ y_m - f \frac{a_2(M_x - X_S) + b_2(M_y - Y_S) + c_2(M_Z - Z_S)}{a_3(M_x - X_S) + b_3(M_y - Y_S) + c_3(M_Z - Z_S)} \end{bmatrix}.$$

Матрица Якоби вектор-функции:

$$F'(Z) = J(Z) =$$

$$= \begin{bmatrix} \frac{\partial F_1(\psi, v, \gamma, X_S, Y_S, Z_S)}{\partial \psi} & \dots & \frac{\partial F_1(\psi, v, \gamma, X_S, Y_S, Z_S)}{\partial Z_S} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial F_6(\psi, v, \gamma, X_S, Y_S, Z_S)}{\partial \psi} & \dots & \frac{\partial F_6(\psi, v, \gamma, X_S, Y_S, Z_S)}{\partial Z_S} \end{bmatrix}.$$

Теперь опишем итерационный процесс:

$$Z^{(k+1)} = Z^{(k)} - [F'(Z^{(k)})]^{-1} \cdot F(Z^{(k)}).$$

Условием окончания выполнения приближений является шаг, на котором k -норма

$$\sqrt{\sum_i (Z_i^{(k+1)} - Z_i^{(k)})^2}$$

меньше определенной заданной погрешности ϵ :

$$\sqrt{\sum_i (Z_i^{(k+1)} - Z_i^{(k)})^2} < \epsilon.$$

Проведенное моделирование в среде MathCAD доказало работоспособность выбранного метода, но лишь в ограниченных областях значений и при ограниченном выборе начальных условий. Это связано главным образом с несходимостью метода на всем пространстве определяемых значений и начальных условий.

Выводы

Полученные результаты показали возможность применения численных методов, в частности, модифицированного метода Ньютона для вычисления элементов внешнего ориентирования снимка на борту БПЛА по полученному изображению точек местности в ограниченных областях определяемых значений и начальных условий. Метод не позволяет решать задачу отыскания навигационных параметров на всем множестве возможных значений. Требуется дальнейшее исследование путей решения проблем сходимости метода, выбора начальных условий, а также оценки его быстродействия и применимости на борту БПЛА.

Библиографический список

1. Щербаков В. Зеленый свет беспилотникам // UAV.RU Беспилотная Авиация. 2009. С.1-6.
2. Алёшин Б.С., Афонин А.А., Веремеенко К.К. и др. Ориентация и навигация подвижных объектов: современные информационные технологии. — М.: Физматлит, 2006.
3. Урмаев М.С. Космическая фотограмметрия. — М.: Недра, 1989.

4. Костюков В.В., Кутаранов А.Х., Павлова Н.В., Фролов М.Д. Метод определения высоты с помощью оптикоэлектронной системы // Труды XII международного научно-технического семинара «Современные технологии в задачах управления, автоматизации и обработки информации». Ч. III. — М.: Изд-во МГУ, 2004. С. 429-431.

5. Безменов В.М. Фотограмметрия. Построение и уравнивание аналитической фототриангуляции. — Казань, 2009.

6. UAS: The Global Perspective. Yearbook 2008/2009.

7. Безменов В.М. Структура системы нормальных уравнений при построении и уравнивании фототриангуляции // Известия вузов. Сер. Геодезия и аэрофотосъемка. 2002. №4.

8. Бахвалов Н.С., Жидков Н.П., Кобельков Г.М. Численные методы. — М.: Наука, 1987.

9. Вержбицкий В.М. Численные методы. Математический анализ и обыкновенные дифференциальные уравнения: Учебное пособие. — М.: ОНИКС-21 век, 2005.

Московский авиационный институт

Статья поступила в редакцию 23.11.2009