

УДК. 681.5.01

Исследование сходимости нового алгоритма определения навигационных параметров беспилотного летательного аппарата на базе фотоизображения.

Лунев Е.М.

Аннотация

Исследуется разработанный автором новый алгоритм определения навигационных параметров на базе фотоизображения. Установлено, что этот алгоритм, базирующийся на численном методе Ньютона устойчив с точки зрения сходимости к решению только в определенной области исходных данных (когда точка посадки не очень близка и далека). Для проблемных областей исходных данных предложено два пути модификации разработанного алгоритма, второй из которых обеспечивает сходимость на всем диапазоне исходных данных.

Ключевые слова

беспилотный летательный аппарат; фотоориентация; навигация; посадка; определение координат.

Введение

Создание современного беспилотного летательного аппарата (БПЛА) требует комплексного подхода к проектированию планера, бортовых информационных систем, системе автоматического управления, канала связи и наземного оборудования [1,2]. В настоящее время одним из актуальных вопросов является проектирование системы автоматической посадки такого БПЛА. Это вызвано, с одной стороны, расширением сферы применения (в том числе обеспечением возможности посадки на неподготовленные аэродромы), а с другой – повышением стоимости всего БПЛА и как следствие, повышением требований к безопасности и сохранности.

На сегодняшний день принято выделять типы БПЛА [1], которые приведены в таблице 1.

Таблица 1. БПЛА и их характеристики.

Тип БПЛА	Масса, кг	Дальность, км
Микро- и мини-БПЛА ближнего радиуса действия	до 5	до 25...40
Легкие БПЛА малого радиуса действия	5...50	10...70
Легкие БПЛА среднего радиуса действия	50...100	70...250
Средние БПЛА	300...500	70...300
Тяжелые БПЛА большой продолжительности полета	> 1500	1500
Беспилотные боевые самолеты (ББС)	>500	1500

Из всех перечисленных в табл. 1 типов выделим легкие БПЛА. Комплексы этого класса наиболее востребованы не только для военного применения, но и для решения гражданских задач. Являясь «золотой серединой» между дорогостоящими и энергозатратными тяжелыми БПЛА и малофункциональными и ограниченными в возможности применения малыми комплексами, легкие БПЛА получили наибольшее применение.

Обеспечение работы беспилотного комплекса полностью зависит от возможности стабильной и производительной комплексной обработки информации, поступающей на различные датчики и системы. Частичное или полное выключение человека из каналов управления, перекладывает ответственность за принятие решения в реальном времени на бортовые системы. В связи с этим информации на борту при ограниченных ресурсах должно быть как можно больше, и она должна быть принятой и обработанной как можно быстрее и надежнее. Из всех бортовых систем пилотажно-навигационный комплекс (ПНК) является самым ответственным в этом процессе и требует особого внимания разработчиков.

Одними из ключевых факторов при проектировании ПНК легких БПЛА являются высокие требования по массогабаритным характеристикам и экономичности. Эффективный подход при разработке таких систем - модернизация алгоритмического обеспечения существующего оборудования без существенного изменения его конструкции и аппаратного обеспечения. В этих условиях полезно использовать информацию с нецелевых систем, носимых на борту, таких как видеокамеры, тепловизоры, фотоаппараты. Легкие БПЛА за редким исключением имеют на борту одну или даже несколько оптических систем. Это открывает возможность применения технологий технического зрения при определении ориентации такого БПЛА без установки дополнительного оборудования: информация может быть получена уже с имеющегося аппаратного обеспечения.

Благодаря появлению цифровых фото- и видеокамер высокого разрешения, существенно упростился и ускорился процесс получения первичной информации для последующей сложной обработки. Быстродействие и высокое разрешение современной фото- и видеотехники [3,4] вкупе с мощностью вычислительной среды сделало возможным построение на их основе бортовых комплексов обработки фото- и видеоизображений с последующей выдачей рассчитанных навигационных данных с допустимыми временными задержками.

Исследуемый алгоритм[5] определения навигационных параметров беспилотного летательного аппарата на базе фотоизображения, который был разработан автором работы, предназначен для развития возможностей БПЛА «Дозор 85», выпускаемого компанией ЗАО «Транзас».

Типовая компоновка БПЛА «Дозор 85» приведена на рис. 1.

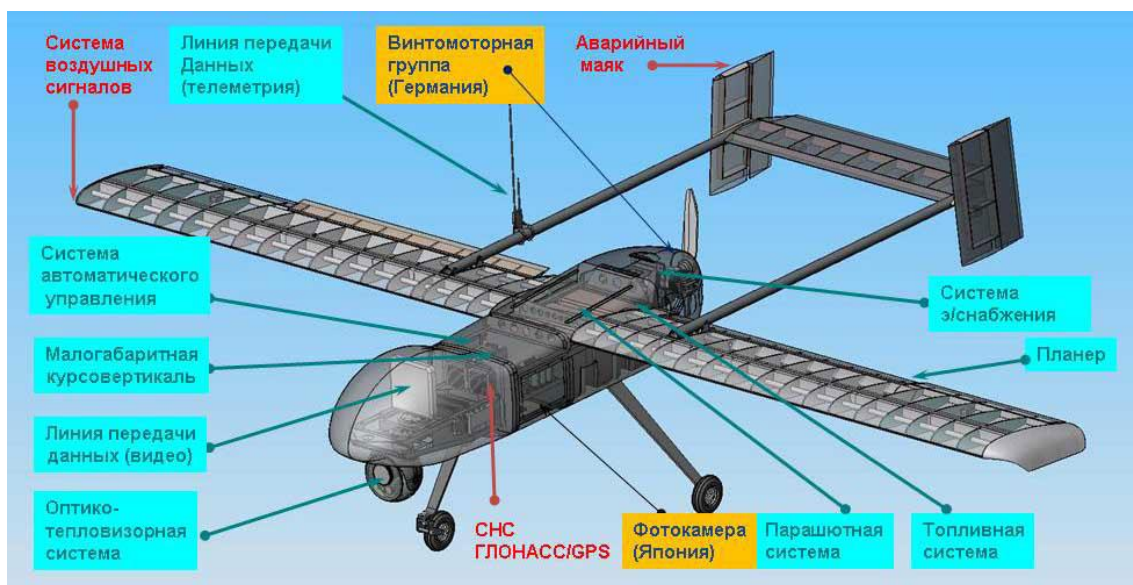


Рисунок 1. Компоновка БПЛА «Дозор 85»

Бортовое оборудование и полезная нагрузка БПЛА «Дозор 85» включают оборудование для навигации и управления и стандартную целевую нагрузку [6].

В состав оборудования для навигации и управления входят:

инерциальная система, интегрированная с приемником спутниковой навигации ГЛОНАСС/GPS и баровысотомером;

система воздушных сигналов;

бортовой компьютер;

радиолинии передачи данных и командная.

Стандартная целевая нагрузка включает:

видеокамеру переднего обзора;

оптико-электронную систему на поворотной управляемой платформе (FLIR);

автоматический цифровой фотоаппарат.

Алгоритм определения навигационных параметров БПЛА на базе фотоизображения, обладает особенностями, которые требуют дополнительных исследований областей его сходимости при применении для решения практических задач. Они и рассматриваются в данной работе.

Метод определения навигационных параметров на базе набора опорных точек

Приведем основные соотношения разработанного в [5] метода, на котором базируется исследуемый алгоритм определения навигационных параметров малого БПЛА.

Координаты произвольной фотографируемой точки на снимке определяются по формулам:

$$P_x = f \frac{a_{11}(P_x - S_x) + a_{12}(P_y - S_y) + a_{13}(P_z - S_z)}{a_{31}(P_x - S_x) + a_{32}(P_y - S_y) + a_{33}(P_z - S_z)},$$
$$P_y = f \frac{a_{21}(P_x - S_x) + a_{22}(P_y - S_y) + a_{23}(P_z - S_z)}{a_{31}(P_x - S_x) + a_{32}(P_y - S_y) + a_{33}(P_z - S_z)},$$

где P_x, P_y, P_z – координаты фотографируемой точки P в декартовой системе координат;

S_x, S_y, S_z – координаты точки фотографирования;

f – фокусное расстояние оптической системы;

a_{11}, \dots, a_{33} – элементы матрицы направляющих косинусов.

Для решения задачи ориентации необходимо определить шесть неизвестных: три угла - курс ψ , тангаж θ , крен γ и три координаты точки фотографирования S_x, S_y, S_z . Для отыскания шести неизвестных составлено шесть независимых уравнений, при этом каждая из трех фотографируемых точек определяет пару из этих уравнений.

Составленная система нелинейных уравнений для точек K, L и M имеет вид:

$$\begin{aligned}
K_x - f \frac{a_{11}(K_x - S_x) + a_{12}(K_y - S_y) + a_{13}(K_z - S_z)}{a_{31}(K_x - S_x) + a_{32}(K_y - S_y) + a_{33}(K_z - S_z)} &= 0; \\
K_y - f \frac{a_{21}(K_x - S_x) + a_{22}(K_y - S_y) + a_{23}(K_z - S_z)}{a_{31}(K_x - S_x) + a_{32}(K_y - S_y) + a_{33}(K_z - S_z)} &= 0; \\
L_x - f \frac{a_{11}(L_x - S_x) + a_{12}(L_y - S_y) + a_{13}(L_z - S_z)}{a_{31}(L_x - S_x) + a_{32}(L_y - S_y) + a_{33}(L_z - S_z)} &= 0; \\
L_y - f \frac{a_{21}(L_x - S_x) + a_{22}(L_y - S_y) + a_{23}(L_z - S_z)}{a_{31}(L_x - S_x) + a_{32}(L_y - S_y) + a_{33}(L_z - S_z)} &= 0; \\
M_x - f \frac{a_{11}(M_x - S_x) + a_{12}(M_y - S_y) + a_{13}(M_z - S_z)}{a_{31}(M_x - S_x) + a_{32}(M_y - S_y) + a_{33}(M_z - S_z)} &= 0; \\
M_y - f \frac{a_{21}(M_x - S_x) + a_{22}(M_y - S_y) + a_{23}(M_z - S_z)}{a_{31}(M_x - S_x) + a_{32}(M_y - S_y) + a_{33}(M_z - S_z)} &= 0.
\end{aligned} \tag{1}$$

Решение системы уравнений (1) ищется алгоритмом, реализующим метод Ньютона [7], который выбран как обладающий наибольшим быстродействием среди известных методов. Это особенно важно при реализации алгоритмов на борту.

Алгоритм поиска навигационных параметров БПЛА на базе фотоизображения

Метод Ньютона является численным и позволяет определить решение системы уравнений с заранее заданной точностью.

Приближенное решение системы уравнений (1) будем искать, составив итерационный процесс:

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

$$Z = \begin{pmatrix} \psi \\ \theta \\ \gamma \\ S_x \\ S_y \\ S_z \end{pmatrix} - \text{вектор состояния};$$

$$F(\psi, \theta, \gamma, S_x, S_y, S_z) = \begin{bmatrix} K_x - f \frac{a_{11}(K_x - S_x) + a_{12}(K_y - S_y) + a_{13}(K_z - S_z)}{a_{31}(K_x - S_x) + a_{32}(K_y - S_y) + a_{33}(K_z - S_z)} \\ K_y - f \frac{a_{21}(K_x - S_x) + a_{22}(K_y - S_y) + a_{23}(K_z - S_z)}{a_{31}(K_x - S_x) + a_{32}(K_y - S_y) + a_{33}(K_z - S_z)} \\ L_x - f \frac{a_{11}(L_x - S_x) + a_{12}(L_y - S_y) + a_{13}(L_z - S_z)}{a_{31}(L_x - S_x) + a_{32}(L_y - S_y) + a_{33}(L_z - S_z)} \\ L_y - f \frac{a_{21}(L_x - S_x) + a_{22}(L_y - S_y) + a_{23}(L_z - S_z)}{a_{31}(L_x - S_x) + a_{32}(L_y - S_y) + a_{33}(L_z - S_z)} \\ M_x - f \frac{a_{11}(M_x - S_x) + a_{12}(M_y - S_y) + a_{13}(M_z - S_z)}{a_{31}(M_x - S_x) + a_{32}(M_y - S_y) + a_{33}(M_z - S_z)} \\ M_y - f \frac{a_{21}(M_x - S_x) + a_{22}(M_y - S_y) + a_{23}(M_z - S_z)}{a_{31}(M_x - S_x) + a_{32}(M_y - S_y) + a_{33}(M_z - S_z)} \end{bmatrix} ;$$

$$F'(Z) = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_1(\psi, \theta, \gamma, S_x, S_y, S_z)}{\partial \psi} & \dots & \frac{\partial F_1(\psi, \theta, \gamma, S_x, S_y, S_z)}{\partial S_z} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial F_6(\psi, \theta, \gamma, S_x, S_y, S_z)}{\partial \psi} & \dots & \frac{\partial F_6(\psi, \theta, \gamma, S_x, S_y, S_z)}{\partial S_z} \end{bmatrix} .$$

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

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

меньше заданной погрешности ε :

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

Исследования показали, что метод сходится к решению не при всех сочетаниях исходных данных. Алгоритм, реализующий метод, должен включать проверку его сходимости и шаги, корректирующие поиск решения в областях исходных данных, где сходимость нарушена.

Для контроля сходимости решения используется условие обеспечения наблюдаемости матрицы ковариации $[F'(Z)]^{-1}$ на каждом шаге:

$$\text{rank}[F'(Z)] = n,$$

где n – количество неизвестных, $n = 6$.

С учетом введенного условия алгоритм поиска решения системы уравнений (1) включает шаги, отраженные на блок-схеме поиска решения, представленной на рисунке 2.

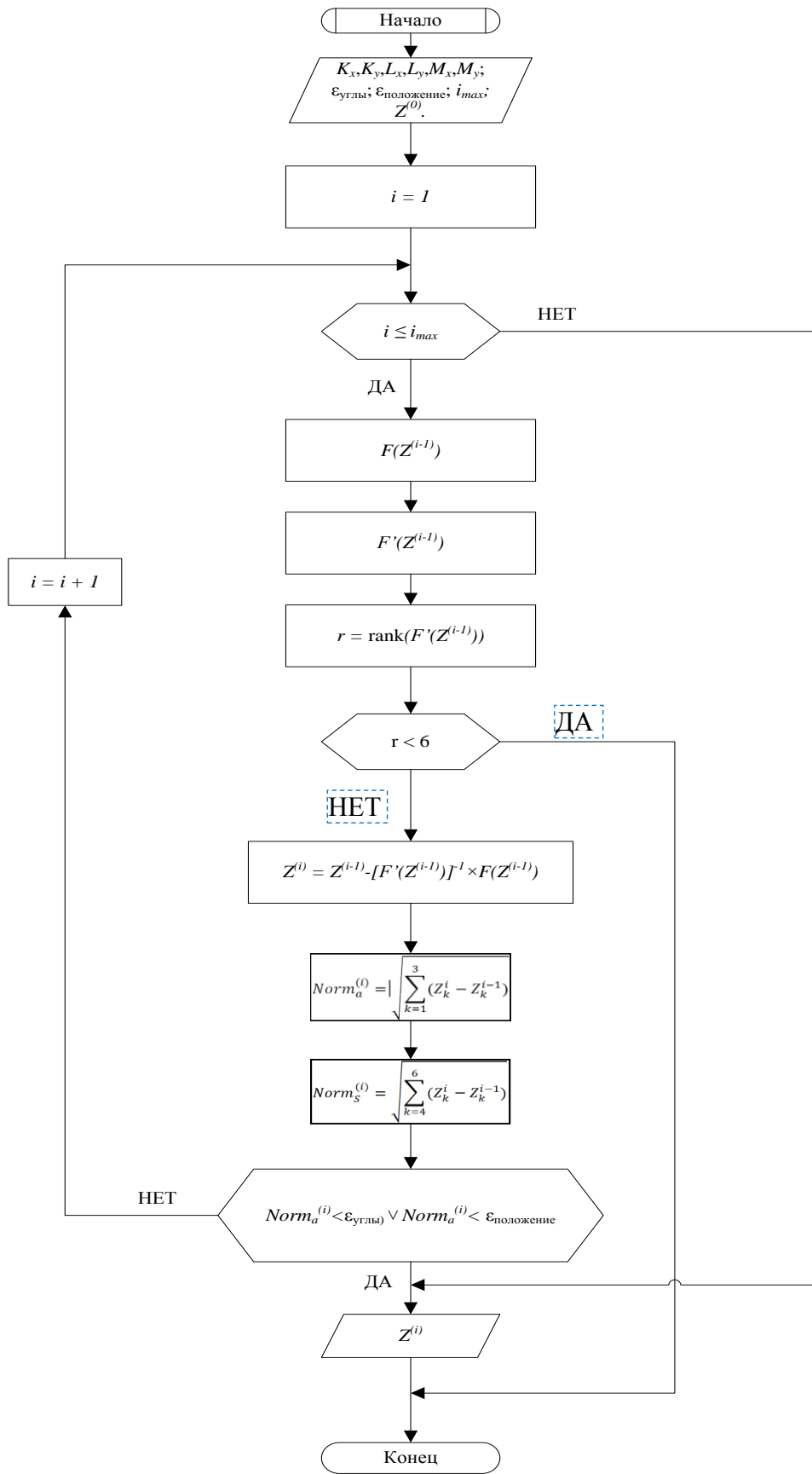


Рисунок 2. Блок-схема поиска решения системы уравнений (1).

Пример 1 работы алгоритма

Рассмотрим работу алгоритма, блок-схема которого представлена на рис. 2 для трех точек, фиксируемых с помощью фотоаппаратуры. Исходными данными являются координаты точек K , L и M и их фотоизображение, представленное на снимке размером в 2048×1536 пикселей. Алгоритм определяет углы ψ , θ , γ и координаты точки фотографирования S_x , S_y , S_z . На рисунке 3 приведено наблюдаемое изображение точек на снимке для следующих данных:

$K(0;0;0)$, $L(-5;-5;0)$, $M(5;-5;0)$; $\psi = 20^\circ$, $\theta = 15^\circ$, $\gamma = 10^\circ$; $S_x=7\text{м}$, $S_y=10\text{м}$, $S_z=50\text{м}$.

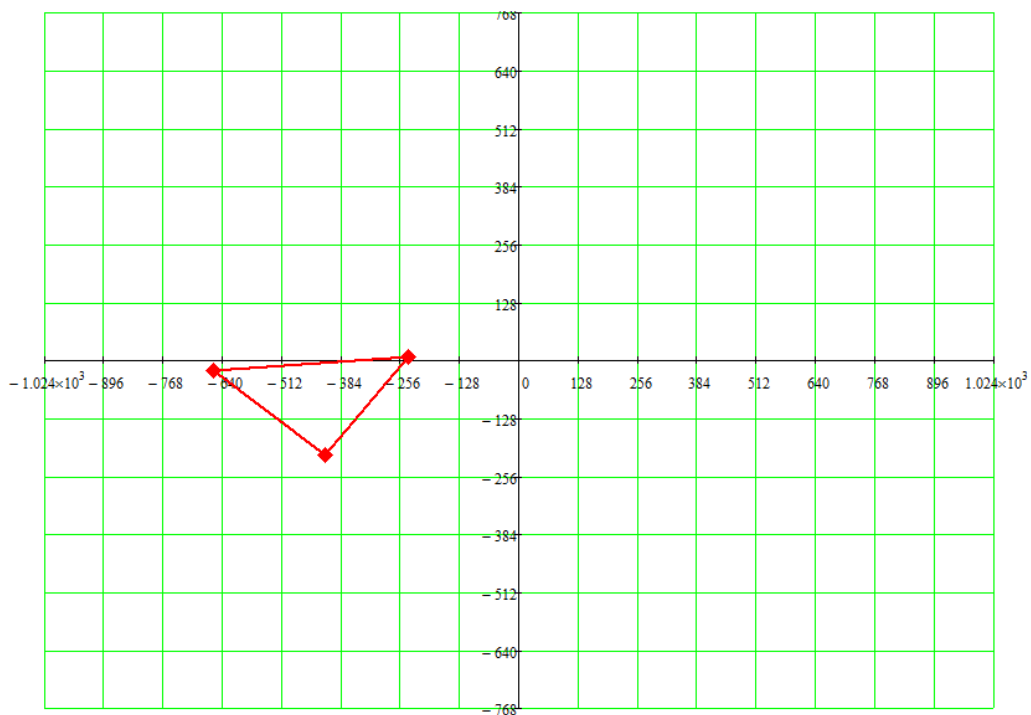


Рисунок 3. Наблюдаемое изображение точек на снимке
(по осям показано разрешение снимка)

В качестве начального приближения приняты следующие значения:

$$\psi^0 = 0^\circ, \theta^0 = 0^\circ, \gamma = 0^\circ; S_x=0\text{м}, S_y=0\text{м}, S_z=1\text{м}.$$

Заданная точность определения составляет:

- для углов $\varepsilon_\gamma = 0,01^\circ$,
- для координат $\varepsilon_K = 0,01\text{м}$.

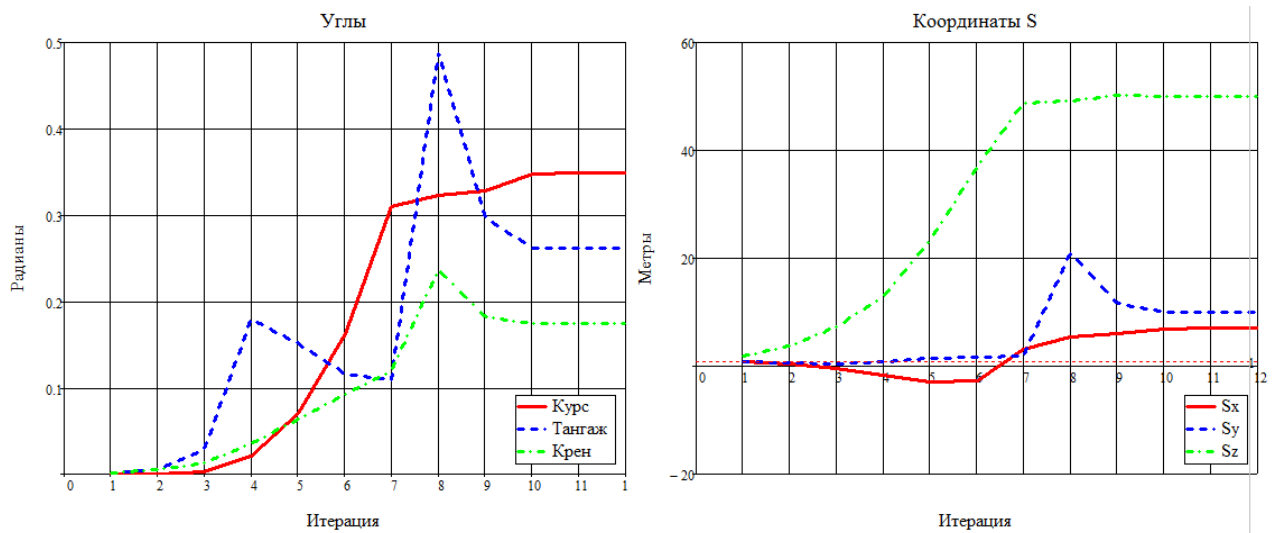


Рисунок 4. Ход поиска решения примера 1

Ход поиска решения представлен на рис. 4. Оно найдено за 12 шагов. Для исходных данных, близких к данным примера 1, алгоритм работает устойчиво.

Модифицированный алгоритм поиска навигационных параметров БПЛА на базе фотоизображения.

На каждом шаге работы алгоритма вычисляется ковариационная матрица $[F'(Z)]^{-1}$, диагональные элементы которой суть дисперсии ошибок оценивания искомых элементов. Отметим, что вектор состояния системы содержит неоднородные величины – углы ψ , θ , γ и координаты S_x , S_y , S_z . При решении системы (1) численно порядок величин последовательных приближений углов и координат может значительно различаться при некоторых исходных данных (на практике при приближении к точке касания и на большом удалении от места посадки), что приводит к вырождению матрицы $F'(Z)$ и, как следствие, расхождению работы алгоритма.

Таким образом, предложенный в [5] алгоритм поиска решения системы уравнений (1) может применяться только при ограниченной области возможных значений и начальных приближений. Для расширения области применения алгоритма необходима его модификация, позволяющая не допустить вырождение матрицы ковариации.

Рассмотрим две возможные модификации разработанного алгоритма.

Путем добавления новых измерений (новых точек) в вектор состояния можно за счет избыточной информации повысить связанность оцениваемых элементов между собой. Для примера добавим еще одну точку в вектор измерений: к точкам K , L и M добавим новую точку N , тогда в системе (1) появятся два новых уравнения:

$$N_x - f \frac{a_{11}(N_x - S_x) + a_{12}(N_y - S_y) + a_{13}(N_z - S_z)}{a_{31}(N_x - S_x) + a_{32}(N_y - S_y) + a_{33}(N_z - S_z)} = 0;$$

$$N_y - f \frac{a_{21}(N_x - S_x) + a_{22}(N_y - S_y) + a_{23}(N_z - S_z)}{a_{31}(N_x - S_x) + a_{32}(N_y - S_y) + a_{33}(N_z - S_z)} = 0.$$

Для решения новой системы уравнений требуется дополнить функцию невязок $F(\psi, \theta, \gamma, S_x, S_y, S_z)$ двумя элементами. Размерность Якобиана $F'(\psi, \theta, \gamma, S_x, S_y, S_z)$ увеличиться до 6×8 . Якобиан имеет не квадратичную форму, поэтому модифицируемый итерационный процесс:

$$Z^{(k+1)} = Z^{(k)} - [F'(Z^{(k)})^T \cdot F'(Z^{(k)})]^{-1} \cdot F'(Z^{(k)})^T \cdot F(Z^{(k)}).$$

Такая модификация справедлива для любого количества точек.

Рассмотрим работу модифицированного алгоритма на примере четырех наблюдаемых на фотоизображении точек.

Пример 2 работы модифицированного алгоритма

Исходными данными являются координаты точек К, L, М и N и их фотоизображение, представленное на снимке размером в 2048×1536 пикселей. Модифицированный алгоритм также определяет углы ψ , θ , γ и координаты точки фотографирования S_x , S_y , S_z . На рисунке 5 приведено наблюдаемое изображение точек на снимке для следующих данных:

$$K(0;0;0), L(-5;-5;0), M(5;-5;0), N(0;-10;0); \psi = 15^\circ, \theta = 25^\circ, \gamma = 20^\circ; S_x=7, S_y=10, S_z=50.$$

В качестве начального приближения, как и для примера 1, приняты значения:

$$\psi^0 = 0^\circ, \theta^0 = 0^\circ, \gamma = 0^\circ; S_x=0\text{м}, S_y=0\text{м}, S_z=1\text{м},$$

и заданная точность определения составляет:

$$\text{для углов } \varepsilon_\gamma = 0,01^\circ,$$

$$\text{для координат } \varepsilon_k = 0,01\text{м}.$$

Ход поиска решения представлен на рис. 6. Оно найдено за 11 шагов. При тех же исходных данных немодифицированный алгоритм к решению не сходится.

Заметим, что добавление измерения в алгоритм увеличивает размерность матрицы ковариации и требует два дополнительных действия с перемножением и обращением матриц, что влечет большие вычислительные затраты по сравнению с немодифицированным алгоритмом. Кроме того, добавление одной точки не гарантирует сходимость алгоритма на всем множестве возможных значений, а лишь повышает её до некоторой степени.

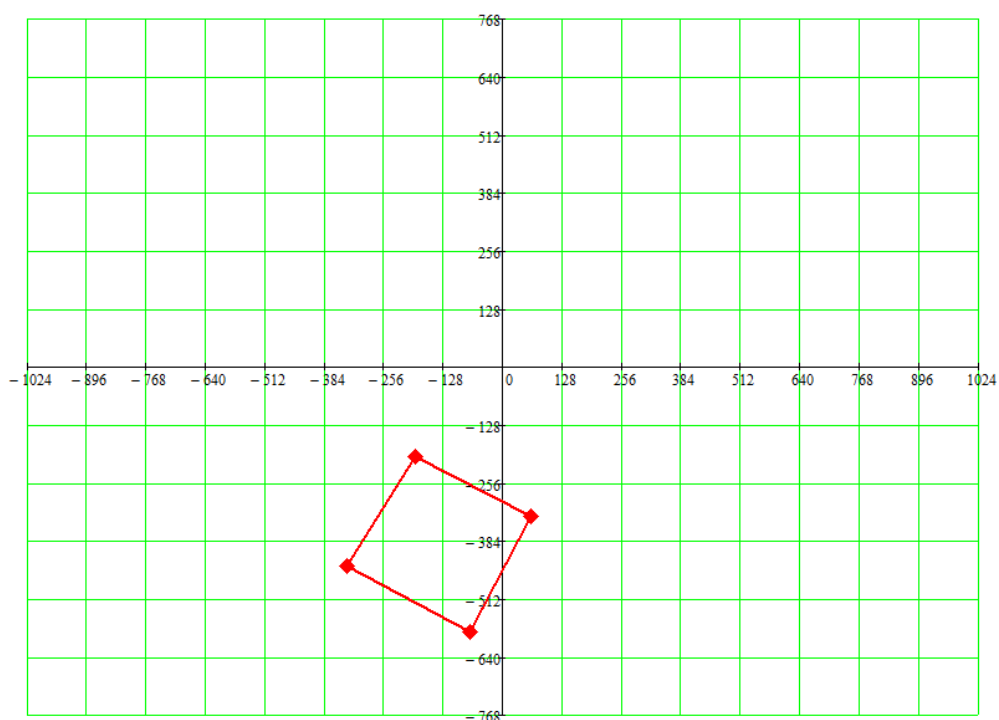


Рисунок 5. Наблюдаемое изображение точек на снимке (по осям показано разрешение снимка)

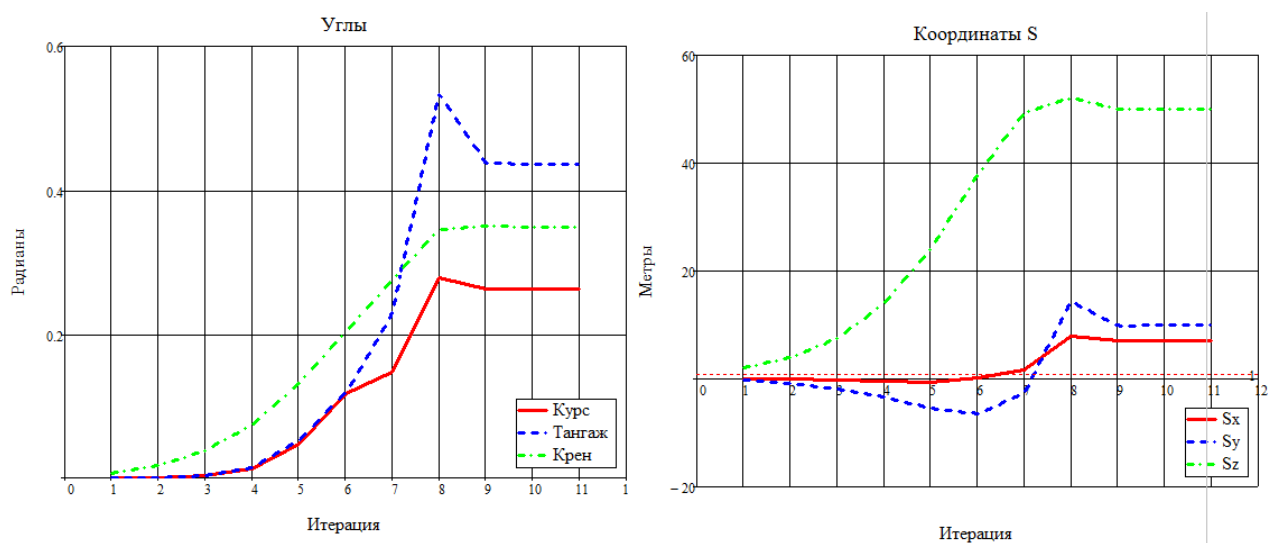


Рисунок 6. Ход поиска решения примера 2

Рассмотрим второй подход к модификации алгоритма.

Проведенное моделирование показало, что сходимость немодифицированного алгоритма зависит от начальных приближений и выбора наблюдаемых точек. Эти параметры при определенной комбинации (при малых и больших удалениях от точки касания) вырождают матрицу ковариации, что и приводит к расхождению итерационного процесса.

Если изменить работу алгоритма так, что ковариационная матрица не будет вырождаться, то возможно отыскание решения и при минимальном наборе из трех точек.

Домножим матрицу Якоби $F'(Z)$ на весовую матрицу W :

$$W = \begin{pmatrix} k_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & k_5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_6 \end{pmatrix},$$

где k_1, \dots, k_6 – коэффициенты пропорциональности. Получим итерационный процесс:

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

Выбирая на каждом шаге алгоритма значения коэффициентов k_1, \dots, k_6 так, чтобы матрица ковариации не вырождалась, можно получить решение при любых начальных условиях и на всем множестве допустимых значений.

Проведенное моделирование на ряде примеров показало, что подбором коэффициентов можно не только решить вопрос сходимости алгоритма, но и уменьшить количество его итераций.

Данная модификация является предпочтительной, так как позволяет не затрачивать дополнительные вычислительные ресурсы при реализации алгоритма на борту, а также дает возможность уменьшить количество циклов просчета при поиске решения. Разработка общей методики выбора таких коэффициентов требует дополнительного исследования, базирующегося на поиске их функциональной зависимости от задаваемых или вычисляемых в ходе работы величин.

Заключение

В работе исследована сходимость нового разработанного автором алгоритма поиска навигационных параметров БПЛА на базе фотоизображения. Результаты проведенного моделирования показали, что алгоритм работает устойчиво только в «средней» области возможных значений, когда удаление от точки касания не очень малы и велики. В двух последних областях исходных данных обеспечение устойчивой работы алгоритма требует его модификации. В работе предложено два способа такой модификации:

за счет введения избыточной информации в виде дополнительных точек, анализируемых на фотоснимке;

за счет введения дополнительной диагональной весовой матрицы в итерационный процесс поиска решения, что позволяет предотвратить расходимость алгоритма на всем диапазоне возможных значений исходных данных.

Работа алгоритмов на разных исходных данных проиллюстрирована наглядными примерами. Полученные результаты продемонстрировали возможность улучшить предложенный в [5] алгоритм с целью обеспечения его сходимости на всем множестве возможных значений. Для реализации предложенного подхода требуются дальнейшие исследования, позволяющие сформировать общую методику выбора коэффициентов диагональной весовой матрицы.

Библиографический список.

- [1] Щербаков В. Зеленый свет беспилотникам// UAV.RUБеспилотная 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] Безменов В.М. Фотограмметрия. Построение и уравнивание аналитической фототриангуляции. Казань, 2009.
- [4] Безменов В.М. Структура системы нормальных уравнений при построении и уравнивании фототриангуляции// Известия ВУЗов. Геодезия и аэрофотосъемка, 2002, №4.
- [5] Павлова Н.В., Лунев Е.М. Программно-алгоритмическое обеспечение для определения навигационных параметров беспилотного летательного аппарата на базе фотоизображения // Вестник МосковскогоАвиационного Института, том 16, №6, 2009.
- [6] Информация с официального сайта БЛА ДОЗОР, разрабатываемого компанией ЗАО «Транзас» // <http://www.uav-dozor.ru>
- [7] Вержбицкий В. М. Численные методы. Математический анализ и обыкновенные дифференциальные уравнения: Учебное пособие - М.:ОНИКС 21 век, 2005.

Сведения об авторе

Лунев Евгений Маркович, аспирант Московского авиационного института (государственного технического университета)

125167, г. Москва, Эльдoradoвский пер., д.7, кв.4.;

тел.: +7-926-248-30-22, e-mail: e.m.lunev@gmail.com