

ПОДХОД К КОРРЕКЦИИ АВТОНОМНОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

Клочко В.К., д.т.н., профессор РГРТУ им. В.Ф. Уткина, e-mail: klochkov@mail.ru

THE APPROACH TO CORRECTION OF AUTONOMOUS NAVIGATION SYSTEM

Klochko V.K.

An approach to correction of an autonomous navigation system when accompanied by a moving object is proposed. The approach is based on the classification of singular points of the reference and current image of the terrain to correct the movement of the object and differs in the presence of a classification criterion for the minimum square of the norm of the error vector of conjugation pairs of singular points. The aim of the work is to develop a method for analyzing singular points obtained on the basis of optical and radar images of the terrain in an autonomous navigation system. An algorithm for correcting the movement of an object is proposed, which allows using fast matrix operations for solving linear algebraic equations instead of the correlation function, taking into account the spatial orientation of the object, determining the vector of the direction of movement of the object to an even position at current moments along an extrapolated trajectory and combining the operation of an onboard radar with the operation of an optical station.

Key words: autonomous navigation, aircraft, reference and current images, singular points, airborne radar, optical station.

Ключевые слова: автономная навигация, летательный аппарат, эталонное и текущее изображения, опорные точки, бортовая РЛС, оптическая станция.

Введение

Последнее десятилетие беспилотные летательные аппараты и их навигация являются объектами повышенного внимания, о чем свидетельствует поток публикаций на эту тему, например [1 – 3]. При разработке современных навигационных систем для беспилотных летательных, наземных, водных и подводных аппаратов стоит задача совершенствования существующих методов навигации [4, 5] для их применения в условиях автономного движения без поддержки спутниковых и радионавигационных данных. Применение в таких условиях инерциальных навигационных систем ограничено, так как они имеют свойство накапливать погрешности. Существует множество научных и практических работ, посвященных системам автономной навигации. Наибольшее распространение на практике получили корреляционно-экстремальные системы навигации (КЭСН), основанные на обработке оптических, тепловых и радиоизображений [6]. Известно большое количество методов решения задач КЭСН: методы анализа оптического потока; методы морфологического анализа изображений; методы, основанные на сопоставлении изображений в целом; методы, основанные на сопоставлении элементов (особых точек) и локальных участков изображений. Преимущество последних методов (анализ особых точек) состоит в использовании инвариантного описания изображений, позволяющего сопровождать объекты в условиях взаимных геометрических преобразований текущего и эталонного изображений, например [7 – 10]. Направлению анализа особых точек для коррекции траектории движения летательных аппаратов (ЛА) в авто-

Предложен подход к коррекции автономной навигационной системы при сопровождении движущегося объекта. Подход основан на классификации особых точек эталонного и текущего изображения местности для коррекции движения объекта и отличается наличием критерия классификации по минимуму квадрата нормы вектора ошибок сопряжения пар особых точек. Целью работы является развитие метода анализа опорных точек, полученных на базе оптических и радиолокационных изображений местности в автономной навигационной системе. Предложен алгоритм коррекции движения объекта, позволяющий использовать вместо корреляционной функции быстрые матричные операции решения линейных алгебраических уравнений, учитывать пространственную ориентацию объекта, определять вектор направления движения объекта к расчетному положению в текущие моменты времени по экстраполированной траектории и совмещать работу бортовой РЛС с работой оптической станции.

номных КЭСН придерживается данная работа.

Целью работы является развитие метода анализа опорных точек, полученных на базе оптических и радиоизображений местности в автономной навигационной системе. Предлагается подход, заключающийся в коррекции траектории движения ЛА на основе сопоставления опорных точек эталонного изображения (ЭИ) и текущего изображения (ТИ) по определенному критерию сопряжения.

Анализ известного подхода

Рассмотрим подход к построению автономной КЭСН, основанный на сравнении текущего и эталонного изображений местности и вычислении поправок горизонтальных смещений ЛА при наличии измерений высоты полета [4]. Эти поправки учитываются при коррекции траектории движения ЛА.

Алгоритмически подход сводится к следующему.

1. По электронной карте местности, представляющей ЭИ в прямоугольной наземной системе координат

$O_1X_1Y_1Z_1$ рассчитывается траектория движения ЛА в виде зависимости координат $x_1(t), y_1(t), z_1(t)$ точки положения ЛА $M_1(x_1, y_1, z_1)$ от времени t , где $z_1(t) = h_1(t)$ – высота полета.

2. Формируется плоское (двумерное) радио-ТИ участка местности с помощью бортовой РЛС или двумерное оптическое ТИ с помощью оптической станции в текущий момент времени t в системе координат ЛА $O_2X_2Y_2$, где точка O_2 совпадает с точкой $M_2(x_2, y_2, z_2)$ положения ЛА в момент времени t в наземной системе координат $O_1X_1Y_1Z_1$.

3. Измеряется высота полета ЛА $h_2(t)$ с помощью бортовой аппаратуры и с учетом $\Delta h = h_2(t) - h_1(t)$ масштабируется ТИ по отношению к ЭИ.

4. Изображения ЭИ и ТИ совмещаются и вычисляется корреляционная функция $f(\Delta x, \Delta y)$, зависящая от горизонтальных смещений $\Delta x(t) = x_2(t) - x_1(t)$ и $\Delta y(t) = y_2(t) - y_1(t)$ ТИ относительно ЭИ в системе координат $O_1X_1Y_1Z_1$.

5. Находятся экстремальные значения $\Delta x^*(t)$ и $\Delta y^*(t)$, на которых достигается наибольшее значение функции $f_{\text{нап}} = f(\Delta x^*, \Delta y^*)$.

6. Осуществляется коррекция движения ЛА путем изменения высоты $h_2(t)$ во времени t до расчетного значения $h_1(t)$ и изменения положения ЛА от точки $O_2(x_2, y_2)$ до расчетной точки $O_1(x_1, y_1)$, совпадающей с $M_1(x_1, y_1, z_1)$, в системе координат $O_1X_1Y_1Z_1$, где $x_1(t) = x_2(t) - \Delta x^*(t)$ и $y_1(t) = y_2(t) - \Delta y^*(t)$.

Отметим недостатки данного подхода.

1. Вычисление корреляционной функции на основе изображений местности требует больших вычислительных затрат.

2. Пространственная ориентация ЛА в системе коорди-

$$Y_k = \begin{bmatrix} M_1(1) \\ \dots \\ M_1(m_k) \end{bmatrix}, \quad M_1(i) = \begin{bmatrix} x_1(i) \\ y_1(i) \\ z_1(i) \end{bmatrix}, \quad X_k = \begin{bmatrix} X_{k1} \\ \dots \\ X_{k,m_k} \end{bmatrix},$$

$$X_{ki} = \begin{bmatrix} x_2(j_i) & y_2(j_i) & z_2(j_i) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & x_2(j_i) & y_2(j_i) & z_2(j_i) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & x_2(j_i) & y_2(j_i) & z_2(j_i) \end{bmatrix},$$

где дополнительно в составе 3×12 -матрицы X_{ki} расположены еще 3 последние столбца $[1 \ 0 \ 0]^T$, $[0 \ 1 \ 0]^T$, $[0 \ 0 \ 1]^T$.

Затем вычисляется 12×1 -вектор P_k параметров ориентации ТИ относительно ЭИ по формуле

$$P_k = (X_k^T X_k)^{-1} X_k^T Y_k, \quad (1)$$

где в составе $P_k = (p_1, p_2, \dots, p_9, b_x, b_y, b_z)^T$ находятся 9 параметров матрицы H_k поворота осей системы

нат $O_1X_1Y_1Z_1$ не учитывается, что не позволяет правильно совмещать ЭИ и ТИ с учетом угловых отклонений системы координат $O_2X_2Y_2Z_2$ относительно $O_1X_1Y_1Z_1$.

3. Отсутствует информация о направлении движения ЛА по результатам коррекции положения ЛА.

4. В случае использования РЛС работа станции ведется непрерывно в активном режиме излучения зондирующего сигнала и подвержена внешним радиопомехам.

Предлагаемый подход

Для устранения указанных недостатков предлагается следующий подход.

1. Рассчитывается траектория движения ЛА по электронной карте местности (ЭИ) в виде зависимости координат $x_1(t), y_1(t), z_1(t)$ положения ЛА $O_1(x_1, y_1, z_1)$ во времени t в наземной системе координат $O_1X_1Y_1Z_1$.

2. Включается периодически бортовая РЛС, формируется радио-ТИ и после этого РЛС временно выключается.

3. По определенному правилу [7 – 10] находятся опорные точки $M_1(i)$, $i = \overline{1, n_1}$, в количестве n_1 в трехмерной системе координат $O_1X_1Y_1Z_1$ ЭИ и по такому же правилу находятся опорные точки $M_2(j) = M_2(x_2, y_2, z_2)$, $j = \overline{1, n_2}$, в количестве n_2 в трехмерной системе координат $O_2X_2Y_2Z_2$ ТИ.

4. Осуществляется перебор k -х вариантов соединения точек $M_1(i)$, $i = \overline{1, n_1}$, и $M_2(j)$, $j = \overline{1, n_2}$, в m_k непересекающихся сопряженных пар $M_1(i)$ и $M_2(j_i)$, где номер j_i поставлен в соответствие номеру i , $i = \overline{1, m_k}$, $m_k \leq \min(n_1, n_2)$, $m_k > 12$.

5. Для каждого k -го варианта соединения сопрягаемых пар координаты точек $M_1(i)$, $i = \overline{1, m_k}$, помещаются в $3m_k \times 1$ – вектор Y_k , а координаты соответствующих им точек $M_2(j_i)$ помещаются в $3m_k \times 12$ -матрицу X_k :

$$O_2X_2Y_2Z_2 \text{ относительно } O_1X_1Y_1Z_1:$$

$$H_k = \begin{bmatrix} p_1 & p_2 & p_3 \\ p_4 & p_5 & p_6 \\ p_7 & p_8 & p_9 \end{bmatrix}$$

и 3 координаты вектора $b_k = (b_x, b_y, b_z)^T$, соединяющего точки O_1 и O_2 .

6. В каждом k -м варианте соединения опорных точек $M_1(i)$ и $M_2(j_i)$ в i -й паре вычисляется показатель сопряжения

$$J_{ik} = (M_1(i) - H_k M_2(j_i) - b_k)^T \times \\ \times (M_1(i) - H_k M_2(j_i) - b_k) \quad (2)$$

и суммарный показатель $J_k = \sum_{i=1}^m J_{ki}$.

7. Выбирается k^* -й вариант соединения опорных точек с наименьшим значением показателя J_{k^*} при условии $J_{k^*} \leq \gamma$, где γ – заданный порог, и запоминаются матрица H_{k^*} и вектор b_{k^*} .

8. Включается оптическая станция и формируется оптическое ТИ. Находятся по определенному правилу на ЭИ опорные точки в трехмерной системе координат ЭИ, а также опорные точки в двумерной системе координат ТИ. Двумерные координаты опорных точек ТИ переводятся в трехмерные координаты ортов векторов направлений в системе координат $O_2 X_2 Y_2 Z_2$.

9. Осуществляется перебор k -х вариантов соединения опорных точек ЭИ и ортов векторов направлений ТИ в m_k сопрягаемых пар ($m_k > 12$), при этом в каждом k -м варианте для каждой сопрягаемой пары вычисляются трехмерные координаты опорной точки ТИ по формуле

$$M_{\text{ТИ}} = \hat{r}a, \quad \hat{r} = a^T H_{k^*}^T \cdot (M_{\text{ЭИ}} - b_{k^*}),$$

где $M_{\text{ЭИ}}$ – опорная точка ЭИ, a – 3×1 -орт вектора направления ТИ; \hat{r} – оценка дальности до опорной точки в системе координат ТИ.

10. Помещаются координаты опорных точек ЭИ в $3m_k \times 1$ -вектор Y_k , а координаты опорных точек ТИ в $3m_k \times 12$ -матрицу X_k , и вычисляется 12×1 -вектор P_k параметров ориентации ТИ относительно ЭИ по формуле (1).

11. Выбирается k^* -й вариант соединения опорных точек с наименьшим значением показателя сопряжения J_{k^*} , после чего последние три элемента матрицы P_k помещаются в базовый вектор b_{k^*} , и движение ЛА направляется по вектору $-b_{k^*}$. Затем по истечении заданного периода времени вновь включается РЛС и все операции пп. 2 – 11 периодически повторяются.

12. Если условия наблюдения не позволяют использовать оптико-электронную станцию, то работу продолжает РЛС с периодическим отключением, за время которого движение ЛА осуществляется по экстраполированной траектории в направлении вектора $-b_k$.

Обоснование подхода

При использовании РЛС, работающей в режиме синтезирования апертуры [11], на земной поверхности формируется сетка с линиями уровня дальности, угла места и азимута. Сферические координаты центров ячеек сетки пересчитываются к прямоугольные координаты системы $O_2 X_2 Y_2 Z_2$ ТИ. На ЭИ также определяются по определенному правилу опорные точки, которые сопрягаются с опорными точками ТИ в системе координат $O_1 X_1 Y_1 Z_1$.

Пусть в k -м варианте сопряжения вектор $M_2(j_i) =$

$= (x_2(j_i), y_2(j_i), z_2(j_i))^T$, определенный в системе координат $O_2 X_2 Y_2 Z_2$, поставлен в соответствие вектору $M_1(i) = (x_1(i), y_1(i), z_1(i))^T$, определенному в системе координат $O_1 X_1 Y_1 Z_1$. Запишем условие линейной зависимости векторов или связи их координат с точностью до случайного вектора ошибок сопряжения $e_{ki} = (e_x, e_y, e_z)^T$ в системе координат $O_1 X_1 Y_1 Z_1$:

$$M_1(i) - H_k M_2(j_i) - b_k = e_{ki}, \quad i = \overline{1, m_k}. \quad (3)$$

Критерием правильного сопряжения i -й пары векторов в k -м варианте возьмем ограничение на квадрат евклидовой нормы вектора ошибок e_{ki} (2):

$$J_{ki} = \|e_{ki}\|^2 = (M_1(i) - H_k M_2(j_i) - b_k)^T \times \\ \times (M_1(i) - H_k M_2(j_i) - b_k) \leq \gamma_i.$$

Критерием сопряжения m_k пар векторов будет суммарный показатель

$$J_k = \sum_{i=1}^{m_k} J_{ki} \leq \gamma,$$

где пороги γ_i и γ можно выбрать статистически по критерию хи-квадрат.

В показателе J_{ki} присутствуют $9 + 3 = 12$ неизвестных параметров ориентации в составе H_k и b_k . Чтобы найти оценки параметров алгебраическим способом, систему уравнений (3) запишем в виде

$$M_1(i) = X_{ki} P_k + e_{ki}, \quad i = \overline{1, m_k}, \quad m_k > 12,$$

или в блочно-матричной форме

$$Y_k = X_k P_k + E_k \Leftrightarrow \dots$$

$$\begin{bmatrix} M_1(1) \\ \dots \\ M_1(m_k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{k1} \\ \dots \\ X_{km_k} \end{bmatrix} \cdot P_k + \begin{bmatrix} e_{k1} \\ \dots \\ e_{km_k} \end{bmatrix},$$

где 3×12 -матрицы X_{ki} определены выше.

Оценка \hat{P} неизвестного 12×1 -вектора P_k находится из условия минимума квадрата евклидовой нормы блочно-вектора ошибок E_k

$$J_k = \|E_k\|^2 = (Y_k - X_k P_k)^T (Y_k - X_k P_k).$$

Из необходимого условия существования экстремума J_k по P_k получается оценка \hat{P}_k в (1):

$$\frac{dJ_k}{P_k} = 2(Y_k - X_k P_k)^T (-X_k) = 0^T \Rightarrow X_k^T (Y_k - X_k P_k) = 0,$$

$$\hat{P}_k = (X_k^T X_k)^{-1} X_k^T Y_k.$$

Невырожденность матрицы $X_k^T X_k$ обеспечивается алгоритмом выбора пар сопряженных опорных точек, в котором предусматривается линейная независимость строк матрицы X_k при выборе этих точек.

При использовании оптической станции в оптическом приемнике пространственное положение точки M в системе координат $O_2 X_2 Y_2 Z_2$, совмещенной по центру с центром оптической линзы, отображается через центр линзы в

плоскости oxy в виде точки m с координатами x, y , которые находятся известными методами обнаружения и оценивания положения точечных объектов или центра тяжести протяженных объектов в видеокадрах [7].

Из геометрических соображений координаты орта a направления на точку M в системе координат $O_2X_2Y_2Z_2$ с учетом фокусного расстояния f линзы находятся как

$$\bar{a} = \overrightarrow{oM} / |\overrightarrow{oM}| = \overrightarrow{oM} / r = (a_x, a_y, a_z),$$

$$a_x = -x / |\overrightarrow{om}| = -x / c,$$

$$a_y = -y / |\overrightarrow{om}| = -y / c, \quad a_z = \sqrt{1 - a_x^2 - a_y^2} = f / c,$$

$$c = \sqrt{x^2 + y^2 + f^2},$$

или в векторно-матричной форме

$$a = (a_x, a_y, a_z)^T = (-x, -y, f)^T / \sqrt{x^2 + y^2 + f^2}.$$

Для i -й пары опорных точек ЭИ и ТИ: $M_1(i)$ и $M_2(j_i)$, поставленных в соответствие друг другу в k -м варианте соединения, уравнение связи координат (сопряжения) запишется как

$$M_1(i) - r_2 H_k a_2(j_i) - b_k = e_{ki}, \quad r_2 a_2(j_i) = M_2(j_i),$$

Оценка дальности \hat{r}_2 до опорной точки в системе координат ТИ находится из условия минимума квадрата нормы вектора ошибок сопряжения e_{ki}

$$J_{ki} = \|e_{ki}\|^2 = (M_1(i) - r_2 H_k a_2(j_i) - b_k)^T \times (M_1(i) - r_2 H_k a_2(j_i) - b_k), \quad (5)$$

$$\text{а именно: } \frac{dJ_{ki}}{dr_2} = 2 \times$$

$$\times (M_1(i) - r_2 H_k a_2(j_i) - b_k)^T (-H_k a_2(j_i)) = 0,$$

$$a_2^T(j_i) H_k^T (M_1(i) - r_2 H_k a_2(j_i) - b_k) = 0,$$

где учитывается, что для ортогональной матрицы H_k : $H_k^T H_k = I$, I – единичная матрица, и для орта $a_2^T(j_i) a_2(j_i) = 1$. Получается следующая оценка дальности:

$$\hat{r}_2 = a_2^T(j_i) H_k^T (M_1(i) - b_k). \quad (6)$$

Оценка (6) подставляется вместо r_2 в выражение показателя (5), который участвует в сопряжении пар векторов.

Заключение

Предложен подход к построению автономной навигационной системы, отличающийся коррекцией движения ЛА на основе классификации пар опорных точек ЭИ и ТИ по определенному критерию сопряжения и позволяющий использовать вместо корреляционной функции быстрые матричные операции решения линейных алгебраических уравнений, учитывать пространственную ориентацию ЛА, определять вектор направления дви-

жения ЛА к расчетному положению в текущие моменты времени по экстраполированной траектории и совмещать работу бортовой РЛС с работой оптической станции при периодическом отключении РЛС, что обеспечивает ее помехозащищенность.

Дальнейшее исследование направлено на разработку программно-алгоритмического обеспечения для реализации предложенного подхода в условиях моделирования автономной навигационной системы.

Подход может найти применение в навигационных системах сопровождения движущихся объектов разной физической природы.

Литература

- Пантенков Д.Г. Результаты анализа наземных испытаний комплекса средств спутниковой радиосвязи для беспилотных летательных аппаратов. Вестник РГРТУ. 2019. Вып. 69. С. 42-51.
- Гальцова М.С., Рябинкин М.С. Навигационно-посадочный комплекс беспилотного летательного аппарата с использованием псевдоспутников. Вестник РГРТУ. 2021. Вып. 77. С. 36-42.
- Ермолов И.А., Сомов И.М., Холопов И.С. Разработка математической модели для принятия решения о факте постановки уводящих помех спутниковым радионавигационным системам. Вестник РГРТУ. 2021. Вып. 78. С. 3-11.
- Бакулов П.А., Сосновский А.А. Радионавигационные системы. Учебник для вузов. М.: Радиотехника, 2005. 224 с.
- Авиационная радионавигация: Справочник / А.А. Сосновский, И.А. Хаймович, Э.А. Лутин, И.Б. Максимов; Под ред. А.А. Сосновского. М.: Транспорт, 1990. 264 с.
- Баклицкий В.К., Бочкарёв А.М. Методы фильтрации сигналов в корреляционно-экстремальных системах навигации. М.: Радио и связь, 1986. 216 с.
- Методы автоматического обнаружения и сопровождения объектов. Обработка изображений и управление / Б.А. Аллатов, П.В. Бабаян, О.Е. Балашов, А.И. Степашкин. М.: Радиотехника, 2008. 176 с.
- Zhou S.B., Li Y. The SIFT image feature matching based on the Plural Differential. Advanced Materials Research (vol. 268-270). 2011, pp. 2172-2184.
- Bastanlar Y., Temizel A., Yardimci Y. Improved SIFT Matching for Image Pairs with a Scale Difference. IET Electronics, vol. 46, no. 5, 2010, pp. 346-352.
- Wu Z., Wang J., Li C., Yan Y., Chu C. Bidirectional Matching Algorithm for Target Tracking Based on SIFT. Advanced Research on Computer Education, Simulation and Modeling Communications in Computer and Information Science, vol. 175, 2011, pp. 253-258.
- Кондратенков Г.С., Фролов А.Ю. Радиовидение. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли: учеб. пособие для вузов / под ред. Г.С. Кондратенкова. М.: Радиотехника, 2005. 368 с.