

УДК 629.7.05:681.3.06

АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СИСТЕМЫ АВТОНОМНОЙ КОРРЕКЦИИ ПОГРЕШНОСТЕЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ МАНЕВРЕННЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Костров Б.В., Конкин Ю.В.

Введение

Для решения задач навигации маневренных летательных аппаратов (МЛА) используется, как правило, географическая система координат, построенная на определении в каждый текущий момент времени широты, долготы и высоты полета. Использование для этой цели инерциальных или инерциально-доплеровских навигационных систем приводит к значительным ошибкам выхода МЛА на навигационную точку, которые могут превышать единицы километров. Таким образом, точность автономного определения координат местоположения летательного аппарата на борту без коррекции погрешностей работы навигационных систем затрудняет действия экипажа по выполнению полетного задания. В качестве источников информации для коррекции текущих координат местоположения МЛА используются спутниковые навигационные системы и радиотехнические системы дальней навигации. Системы подобного уровня нельзя считать абсолютно надежными, особенно в экстремальных ситуациях. Наличие автономного, бортового средства, осуществляющего с приемлемой точностью и быстродействием подстройку системы навигации МЛА, позволяет повысить его живучесть и выполнять поставленные задачи в экстремальных условиях [1].

В статье рассматривается технология реализации метода совмещения текущего радиолокационного изображения, полученного с помощью бортовой радиолокационной станции (РЛС), с эталонным изображением, построенным на основе цифровой карты местности с известными географическими координатами. Это позволяет осуществлять коррекцию текущих координат навигационной системы МЛА без использования внешних источников информации.

Постановка задачи. Источником текущего изображения (РЛИ) является когерентная бортовая радиолокационная станция (БРЛС) миллиметрового диапазона волн. БРЛС осуществляет передний обзор земной поверхности и формирует на выходе РЛИ в прямоугольных координатах, что позволяет использовать полученное изображение в качестве основы для расчета координат местонахождения МЛА. Антенна БРЛС установлена на гиростабилизатор по углам крена и тангажа, что исключает этап геометрической коррекции из предварительной обработки изображений.

В качестве эталонного изображения используется модель РЛИ участка местности, полученная путем предварительного синтеза с помощью геоинформационной системы (ГИС) "Карта 2005" и с учетом парамет-

Рассматривается алгоритм совмещения изображения, полученного от радиолокационной станции, и изображения участка местности, синтезированного по цифровой карте с помощью инвариантных моментов H_i . Совмещение выполняется с целью определения географических координат точки привязки. Приводятся результаты работы алгоритмов, реализующих данный метод.

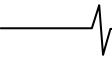
ров БРЛС. Результатом такого синтеза является РЛИ выбранного участка местности, содержащего наиболее информативные объекты. Данные объекты и требуется найти на текущем изображении при совмещении изображений. Алгоритм синтеза требует больших вычислительных затрат, поэтому не рассчитан на использование в реальном времени и не является этапом совмещения изображений. Эта работа выполняется на этапе предполетной подготовки МЛА.

Текущее РЛИ представляет собой монохромное изображение, содержащее в себе информацию о радиолокационном контрасте участка местности. Оно является полутонным дискретизированным изображением, заданным в прямоугольной системе целочисленных координат с функцией яркости $F_{ТН}(x, y)$, где $x = \overline{1, N}$, $y = \overline{1, M}$ - размерность изображения.

Эталонное изображение радиолокационного контраста участка местности представляет собой полутонное дискретизированное изображение в прямоугольной системе целочисленных координат с функцией яркости $F_{ЭИ}(x, y)$, где $x = \overline{1, K}$, $y = \overline{1, L}$ - размерность изображения. Интенсивность текущего и эталонного изображений изменяется в интервале $F_{ЭИ} = \overline{0, 255}$.

Для центрального элемента разложения эталонного изображения $(x_{Ц}, y_{Ц})$ известны прямоугольные географические координаты привязки на местности $(x_{Г}, y_{Г})$. Данные координаты получены по электронной карте местности на этапе синтеза эталонного изображения. Начало системы прямоугольных координат находится на борту МЛА. Для каждого элемента изображения известны размеры сторон участка местности в метрах $\Delta S_x, \Delta S_y$.

Предполагается, что этапу совмещения предшествует этап предварительной обработки изображений, на котором необходимо в максимальной степени подавить шумы в составе РЛИ, обнаружить и подчеркнуть границы полезных сигналов. Решение задач предварительной обработки дано в частности в [2]. Сам этап совмещения выполняется в рамках корреляционно-экстремальной системы навигации (КЭСН).



Отметим основные особенности функционирования КЭСН по полю радиолокационного контраста, влияющие на выбор метода совмещения изображений.

Во-первых, координаты ЛА в пространстве при формировании текущего и эталонного изображений не совпадают. Кроме того, в реальных условиях функционирования КЭСН текущие координаты всегда известны с некоторой ошибкой. Координатное рассогласование неизбежно сопровождается геометрическими искажениями текущего и эталонного РЛИ. Для компенсации указанных искажений необходимо выполнить последовательно операции сдвига, поворота и масштабирования. Эти операции образуют четырехпараметрическую группу аффинных преобразований, которая в декартовой прямоугольной системе координат описывается выражениями:

$$\begin{aligned} x' &= a(x \cos \beta + y \sin \beta) + x_0, \\ y' &= a(x \sin \beta + y \cos \beta) + y_0, \end{aligned} \quad (1)$$

где a - параметр масштабирования; β - угол поворота; x_0, y_0 - параметры сдвига.

Во-вторых, особенность формирования РЛИ заключается в том, что геометрические преобразования изображения обязательно приведут к радиометрическим преобразованиям изображения. Известно, что мощность отраженного радиолокационного сигнала, а, следовательно, и яркость РЛИ сильно зависят от угла падения луча и дальности от источника излучения до отражателя. Выполнить радиометрическую коррекцию эталонного изображения в реальном времени невозможно из-за большого количества вычислительных операций. Радиометрические искажения сглаживаются на этапе предварительной обработки [2].

В-третьих, распознаваемый эталонный объект должен описываться вектором признаков, инвариантных по отношению к его размерам, положению и ориентации. При этом вектор признаков должен обладать малой размерностью, так как количество возможных эталонных изображений может быть большим.

Метод решения поставленной задачи. Критериальные функции для оценки сходства изображений, используемые КЭСН, являются чувствительными к сдвигу, повороту и изменениям масштаба. Поэтому при разработке КЭСН для МЛА, где взаимные искажения изображений являются обычной ситуацией, необходимо использовать критериальные функции, инвариантные к указанным типам искажений. Среди разнообразных алгоритмов выделения признаков изображения лучшие результаты позволяет получить метод моментных инвариантов Ну [3], основанный на выделении статистических закономерностей, описывающих изображение. Математической основой выделения инвариантных признаков является теория алгебраических инвариантов. Эта теория исследует класс алгебраических функций, не изменяющихся при определенных преобразованиях координат.

Сущность метода заключается в следующем. Двумерные степенные моменты $(p+q)$ -го порядка от функции $f(x, y)$ в декартовой прямоугольной системе координат задаются выражениями вида:

$$m_{pq} = \iint_D x^p y^q f(x, y) dx dy, \quad p, q = 0, 1, 2, \dots, \quad (2)$$

где D - область изображения, занятого объектом, для которого вычисляются моменты или некоторый шаблон, если моменты строятся для всего изображения в целом.

Для того чтобы сделать моменты инвариантными относительно сдвига следует использовать центральные моменты:

$$\mu_{pq} = \iint_D (x - \bar{x})^p (y - \bar{y})^q f(x, y) dx dy, \quad p, q = 0, 1, 2, \dots, \quad (3)$$

где $\bar{x} = \frac{m_{10}}{m_{00}}, \bar{y} = \frac{m_{01}}{m_{00}}$ координаты центра тяжести

(центра масс) области D . Инвариантность в этом случае обеспечивается независимостью степенных произведений под знаком интеграла от сдвига.

При обработке дискретных изображений можно записать:

$$\mu_{pq} = \sum_x \sum_y (x - \bar{x})^p (y - \bar{y})^q f(x, y). \quad (4)$$

Для того чтобы сделать эти моменты инвариантными относительно масштабирования следует перейти к безразмерным моментам:

$$\eta_{pq} = \frac{\mu_{pq}}{\mu_{00}^{\frac{p+q}{2}+1}}. \quad (5)$$

И, наконец, для построения инвариантов относительно поворота строятся собственно инварианты Ну:

$$\begin{aligned} S_1 &= \eta_{20} + \eta_{02} \\ S_2 &= (\eta_{20} - \eta_{02})^2 + 4\eta_{11}^2 \\ S_3 &= (\eta_{30} - 3\eta_{12})^2 + (\eta_{03} - 3\eta_{21})^2 \\ S_4 &= (\eta_{30} + \eta_{12})^2 + (\eta_{03} + \eta_{21})^2 \\ S_5 &= (\eta_{30} - 3\eta_{12})(\eta_{30} + \eta_{12}) \\ &+ [(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - 3(\eta_{03} + \eta_{21})^2] + \\ &+ (3\eta_{21} - \eta_{03})(\eta_{03} + \eta_{21}) [3(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - (\eta_{03} + \eta_{21})^2] \\ S_6 &= (\eta_{20} - \eta_{02}) \\ &+ [(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - (\eta_{03} + \eta_{21})^2 + 4\eta_{11}(\eta_{30} + \eta_{12})(\eta_{03} + \eta_{21})] \\ S_7 &= (3\eta_{21} - \eta_{03})(\eta_{30} + \eta_{12}) \\ &+ [(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - 3(\eta_{03} + \eta_{21})^2] - \\ &- (\eta_{30} - 3\eta_{12})(\eta_{21} + \eta_{03}) [3(\eta_{30} + \eta_{21})^2 - (\eta_{03} + \eta_{21})^2] \end{aligned} \quad (6)$$

Таким образом, на основе изложенного выше метода можно выделить вектор инвариантных признаков $P_{ЭИ}$ эталонного РЛИ и вектор $P_{ТИ}$ соответствующей области текущего РЛИ, каждые из которых состоят из значений инвариантных моментов $S_1 - S_7$. На основании данных признаков может быть получена система корреляционной привязки изображений, которая позволит рассматривать не полный растр изображений, а только соответствующий ему вектор признаков, инвариантный к взаимному сдвигу, повороту и масштабированию.

нию изображений в определенных пределах. Малый размер вектора признаков позволит сформировать достаточно большое количество эталонных изображений (ЭИ) под разными углами подхода МЛА и для разных высот.

Для сравнения инвариантных признаков текущего и эталонного изображений в данной работе была использована корреляционная функция (КФ) вида:

$$K(x, y) = \frac{\sum_{i=1}^7 S_i \bar{S}_i(x, y)}{\left[\sum_{i=1}^7 S_i^2 \sum_{i=1}^7 \bar{S}_i^2(x, y) \right]^{1/2}}, \quad (7)$$

где

\bar{S}_i - i -й момент эталонного изображения,

S_i - i -й момент подобласти текущего изображения в положении (x, y) .

КФ вычисляется для всех возможных положений окна эталонного изображения размером $K \times L$ в пределах окна текущего изображения $N \times M$. Точка совмещения (x_m, y_m) определяется максимальным значением КФ.

Корреляционная функция $K(x, y)$ вычисляется для всех взаимных сдвигов окна эталонного изображения относительно текущего изображения в пределах окна (рис. 1). Координаты окна (x_{\max}, y_{\max}) , в которых функция $K(x_{\max}, y_{\max})$ приобретает максимальное значение, и являются координатами точки наилучшего совмещения РЛИ. При размерах изображений $K \times L$ и $N \times M$, $N = M$ количество точек вычисления $K(x, y)$ равно:

$$T_1 = (K - N + 1)(L - N + 1). \quad (8)$$

При больших размерах изображений количество вычислений функции $K(x, y)$ является значительным. В этом случае необходимо искать пути повышения производительности алгоритмов корреляционного совмещения изображений.

Как отмечалось выше, $F_{ЭИ}(n, m)$ в реальном времени сформировать невозможно, поэтому разработка КЭСН выполняется с условием, что ЭИ формируется на этапе предполетной подготовки МЛА. Следовательно, и вектор признаков $P_{ЭИ}$ также формируется заранее.

Таким образом, при корреляционном совмещении будем вычислять только вектор признаков $P_{ТИ}$ соответствующей области ТИ. Моменты можно вычислить как по значениям функции яркости изображения $F_{ТИ}(x, y)$, так и по бинарному изображению $\bar{f}(x, y)$, содержащему границы радиолокационно-контрастных объектов. Значения точек, равные 1, соответствуют границе, а значения точек, равные 0, - области фона. При этом $\bar{f}(x, y)$ содержит только единичные значения и их координаты в изображении, а значения фона исключены, так как в данном случае не несут информации. При этом в несколько раз сокращается размерность изображения, так как количество точек фона превышает количество точек границ. Данную особенность изображения $\bar{f}(x, y)$, прошедшего этап сегментации, можно использовать для вычисления моментов. В этом случае формула для вычисления моментов будет выглядеть следующим образом:

$$\mu_{pq} = \sum_{i=1}^I x_i^p y_i^q, \quad p, q = 0, 1, 2, \dots, \quad (9)$$

где x_i, y_i - координаты единичной точки в $\bar{f}(x, y)$; I - количество единичных точек.

Вычисление моментов по формуле (9) обладает меньшей вычислительной сложностью по сравнению с формулой (3), так как значение I намного меньше общего числа точек изображения (области D). Кроме того, в формуле (9) отсутствует операция умножения на значение функции яркости.

Другим способом повышения производительности алгоритмов совмещения может быть последовательное снижение разрешения большего изображения, с последующим иерархическим вычислением корреляционной функции $K(x, y)$. В обычных алгоритмах совмещения значение $K(x, y)$ вычисляется при всех возможных положениях эталонного изображения относительно текущего. Однако очевидно, что точные вычисления имеет смысл производить только для небольшого числа точек вблизи максимума корреляционной функции. Возможно использование двухэтапного алгоритма получения КФ.

На первом этапе работы алгоритма выполняется снижение разрешения изображения с помощью замены каждого $s \times t$ элементов разложения так называемым блоком, яркость которого вычисляется как средняя яркость $s \times t$ элементов. Для полученного изображения с пониженным разрешением и ЭИ вычисляется корреляционная функция и находятся координаты взаимного положения изображений, соответствующие ее максимуму.

На втором этапе вычисляется корреляционная функция между эталонным и частью текущего изображения, ограниченной областью, смещенной на $\Delta x_1, \Delta y_1$ относительно максимума, найденного на первом этапе в меньшую сторону и $\Delta x_2, \Delta y_2$ в большую сторону. Координаты максимума $K(x, y)$, найденные на втором этапе, и являются координатами точки совмещения изображений.

Объем вычислений J при использовании этого алгоритма можно оценить следующим образом:

$$J = A + P_T B, \quad (10)$$

где A - объем вычислений на первом шаге алгоритма; P_T - вероятность превышения порога на первом этапе (т. е. вероятность нахождения точки, которая будет обрабатываться на втором этапе); B - объем вычислений на втором этапе алгоритма.

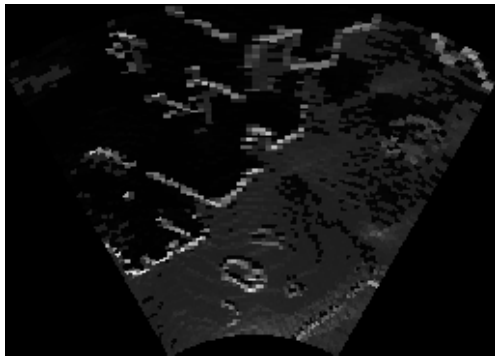
С точки зрения быстродействия данный алгоритм обладает недостатком, связанным с необходимостью вычисления средней яркости блока. Поэтому авторами предлагается модифицировать алгоритм следующим образом.

На первом этапе работы алгоритма выполняется вычисление корреляционной функции $K(x, y)$ с шагом по осям x и y больше единицы: $\Delta x = s$, $\Delta y = t$. Второй этап выполняется аналогично методу, рассмотренному выше.

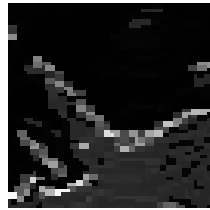
Количество вычислений корреляционной функции в данном алгоритме можно оценить по следующей формуле:

$$T_2 = \left[(K - N + 1) / s \right] \left[(L - N + 1) / t \right] + (\Delta x_1 + \Delta x_2 + 1)(\Delta y_1 + \Delta y_2 + 1), \quad (11)$$

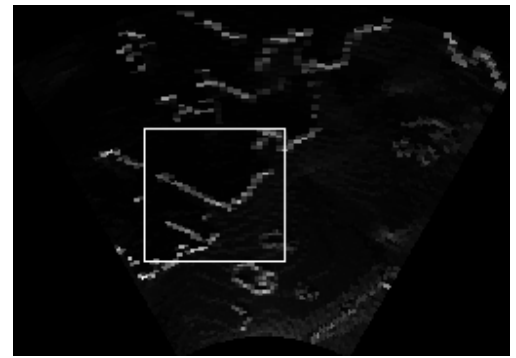
где $K \times L$ - размерность изображения; $s \times t$ - шаг изменения координат для вычисления корреляционной функ-



а) Текущее РЛИ



б) Эталонное РЛИ



в) Результат совмещения

Рис. 1. Корреляционное совмещение изображений

ции первого этапа алгоритма; $\Delta x_1, \Delta x_2, \Delta y_1, \Delta y_2$ - смещение границ окна вычисления корреляционной функции второго этапа относительно максимума первого этапа.

Процент снижения объема вычислений можно вычислить по формуле:

$$k = \left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right) \cdot 100 \quad (12)$$

В ходе практических исследований по совмещению РЛИ с помощью корреляционной функции на основе инвариантных моментов возникла необходимость отбраковки ложных результатов совмещения. Для этого предлагается использовать следующий механизм.

По полученным оценкам корреляционной функции $K(x, y)$ вычисляется среднеквадратическое отклонение σ_k и формируется пороговое значение $\Delta = \alpha \cdot \sigma_k$, где α - коэффициент, значение которого устанавливается экспериментально (в ходе практических исследований определено оптимальное значение коэффициента $\alpha = 1.2$). Решение о ложном совмещении принимается при условии:

$$K(x_{\max}, y_{\max}) < \Delta, \quad (13)$$

где $K(x_{\max}, y_{\max})$ - максимум корреляционной функции.

На рис. 1 приводятся примеры эталонного и текущего изображений (а, б) и результат их корреляционного совмещения (в).

Заключение. Таким образом, разработан алгоритм корреляционного совмещения текущего и эталонного РЛИ на основе моментов, инвариантных к сдвигу, повороту и изменению масштаба изображений.

Для данного алгоритма разработаны процедуры повышения производительности на основе вычисления моментов для контурных изображений и двух-

уровневое вычисление корреляционной функции. Кроме того, разработана процедура повышения надежности совмещения информативных участков на текущем и эталонном РЛИ, представленных векторами инвариантных моментов, за счет отбраковки ложных результатов совмещения.

При этом получены следующие основные результаты:

- значительно повышено быстродействие привязки текущих координат местоположения МЛА к географическим координатам;

- обеспечена корреляционная привязка в условиях координатного рассогласования местоположения МЛА в различных точках пространства, которое неизбежно возникает при формировании текущего и эталонного изображений;

- за счет работы разработанного алгоритма компенсируются погрешности измерений датчиков курса, высоты и географических координат МЛА, что повышает живучесть летательного аппарата в экстремальных условиях.

Литература

1. Андреев Г.А., Потапов А.А. Активные системы ориентации по геофизическим полям // Зарубежная радиоэлектроника. 1988. № 9. С. 62-85.
2. Новиков А.И., Конкин Ю.В., Архипов С.А. Применение операторов с симметричной весовой функцией в задачах обработки радиолокационной информации // Математические методы в научных исследованиях: Межвуз. сб. / Рязан. гос. радиотехн. акад. Рязань, 2006. – С. 46-55.
3. Андреев Г.А., Потапов А.А. Алгоритмы обработки навигационной пространственно-временной информации. Часть II // Зарубежная радиоэлектроника. 1989. № 4. С. 3-21.