

УДК 004.932.2

А. В. Мезенцев, А. Н. Буточнов, В. В. Юзефович
Институт проблем регистрации информации НАН Украины
ул. Н. Шпака, 2, 03113 Киев, Украина

Анализ путей повышения быстродействия алгоритмов совмещения изображений в комбинированных корреляционно-экстремальных системах навигации летательных аппаратов

Проанализированы пути повышения быстродействия алгоритмов совмещения текущего и эталонного изображений в комбинированных корреляционно-экстремальных системах навигации летательных аппаратов за счет поиска возможности сокращения вычислительных затрат. Предложено применение алгоритмов, инвариантных к операциям сдвига, поворота и масштабирования изображений.

Ключевые слова: эталонное изображение, комбинированная корреляционно-экстремальная система навигации, анализ, алгоритм совмещения изображений.

Введение

Процесс функционирования бортовых комбинированных корреляционно-экстремальных систем навигации (КЭСН) летательных аппаратов (ЛА) представляет собой совмещение в реальном масштабе времени двумерных (трехмерных) текущих (ТИ) и универсальных эталонных изображений (ЭИ) наземных объектов — ориентиров навигации, полученных от датчиков различных диапазонов электромагнитных волн (в нашем случае ТИ получается на выходе комплексированной головки самонаведения (радиолокационной + оптической соответственно), и универсальное ЭИ разрабатывается с этим условием), с последующей выработкой сигнала рассогласования и передачей его на рули управления ЛА.

Под совмещением понимается определение пространственного преобразования между координатными сетками двух изображений. Накоплен огромный эмпирический опыт решения задачи совмещения изображений с учетом специфики различных приложений. Алгоритмы совмещения обычно разделяют на два основных класса: основанные на сопоставлении признаков (например, точек, линий, структурных элементов) и основанные на сопоставлении площадей (интенсивнос-

тей пикселей). Площадные методы обеспечивают большую точность совмещения, однако для ряда задач, в частности, при наличии неоднородных яркостных искажений совмещаемых изображений, являются неприменимыми.

Эффективность алгоритма характеризуется вероятностью верного совмещения изображений [1]. Другим важнейшим показателем алгоритмов, использующихся в КЭСН, является быстродействие, которое должно быть не хуже 0,2...0,3 с [2]. Сравнительные характеристики алгоритмов различных типов слабо освещены в литературе.

Анализ литературы и постановка задачи

Обзор методов совмещения приведен в [3]. В [2, 4] приведен сравнительный анализ алгоритмов различных типов, как с точки зрения эффективности, так и быстродействия, а также оценена их устойчивость к воздействию различного рода искажений ТИ.

В частности, рассмотрен корреляционный алгоритм (КА) совмещения изображений, который описывает выражение для получения решающей функции (РФ) в виде коэффициента взаимной корреляции ТИ и ЭИ и является оптимальным при искажениях яркости. В [4] данный алгоритм совмещения изображений сравнивается по эффективности и по быстродействию с алгоритмом обобщенной фазовой корреляции (АОФК). В [2] вышеперечисленные алгоритмы сравниваются с квадратичным разностным алгоритмом (РА). Известно, что РА является оптимальным при отсутствии яркостных искажений изображений.

Под эффективностью такого алгоритма будем понимать вероятность наступления события, называемого верным совмещением изображений и состоящего в том, что оценка сдвига текущего и эталонного изображений (\hat{x}, \hat{y}) , формируемая алгоритмом, попадает в окрестность точки истинного сдвига (x_0, y_0) :

$$I_{x_0 y_0}^{d_1 d_2} = \{(x, y), |x - x_0| < d_1, |y - y_0| < d_2\}.$$

В [2, 4] делается вывод о том, что, с точки зрения быстродействия, многоуровневый КА превосходит АОФК и РА.

В [5] на основании того, что, согласно [2] быстродействие КЭСН должно быть не хуже 0,2–0,3 с, делается вывод о невозможности использования полного ТИ при площадных алгоритмах совмещения и предлагается следующий подход к алгоритмам совмещения: фрагмент ТИ, участвующий в процессе совмещения, обозначим J . Совмещение фрагмента J обычно осуществляется не со всем ЭИ, а только с его участком, называемым зоной поиска (E). Размер E обычно определяется степенью неопределенности положения ЛА в данный момент времени. Размеры J и E обозначим, соответственно, $N \times N$ и $M \times M$ (фрагменты считаются квадратными). Увеличение размера J , участвующего в алгоритме совмещения, приводит к повышению качества совмещения, однако ведет к увеличению вычислительных затрат. В работе [2] сделан вывод, что при использовании нормированного корреляционного алгоритма (НКА), который обладает высоким качеством совмещения, размер $J - N$ не должен превышать 60 пикселей (при $M = 200$). При этом

предполагается использование двухэтапной процедуры «грубого» и «точного» поиска для ускорения вычислений [5].

Для повышения быстродействия в работе предлагается дискретную решающую функцию вычислять, используя фрагмент ЭИ (размером с ТИ). Обозначим область ЭИ, из которой выбирается фрагмент J, J_0 . Определение решающей функции предлагается осуществлять в 2 этапа.

На первом этапе вычисляется локальная дисперсия D для участков размером $N \times N$ по всему J_0 (участки выбираются последовательно с заданным сдвигом вдоль осей X и Y).

На втором этапе вычисляется радиус корреляции для всех фрагментов, имеющих D выше заданного порога D_p . Для выбора совмещаемого фрагмента J выполняется последовательность действий:

— в качестве J выбирается фрагмент, имеющий максимальное значение D среди отобранных на первом этапе фрагментов, имеющих радиус корреляции в пределах 2–3,5 пикселя;

— если среди отобранных на первом этапе нет фрагментов, имеющих радиус корреляции в пределах 2–3,5 пикселя, выбирается фрагмент, имеющий максимальное значение D среди фрагментов, имеющих радиус корреляции в пределах 1,5–4 пикселя;

— если фрагмент J не был выбран в течение двух предыдущих шагов, выбирается фрагмент, имеющий максимальное значение D среди всех фрагментов, отобранных на первом этапе.

Таким образом, данный метод существенно сокращает время на совмещение изображений. Рассмотрим пути повышения быстродействия алгоритмов совмещения ЭИ и ТИ. Необходимо оценить выигрыш в быстродействии предложенного алгоритма совмещения по сравнению с известными при сохранении заданного качества совмещения.

Анализ путей повышения быстродействия алгоритмов совмещения изображений в комбинированных КЭСН ЛА

Известно, что 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 изображений. 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:

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

где α — параметр масштабирования; β — угол поворота; x_0, y_0 — параметры сдвига.

Одной из особенностей формирования радиолокационного изображения (РЛИ) в комбинированной КЭСН является то, 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 [6].

Распознаваемый эталонный объект должен описываться вектором признаков, инвариантных по отношению к его размерам, положению и ориентации. При этом вектор признаков должен обладать малой размерностью для сокращения вычислительных и временных затрат.

Среди разнообразных алгоритмов выделения признаков изображения лучшие результаты позволяет получить метод моментных инвариантов Ху, 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:

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

где D — область изображения, занятого объектом, для которого вычисляются моменты.

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

$$z_{pq} = \iint_D (x - \bar{x})^p (y - \bar{y})^q f(x, y) dx dy,$$

где $\bar{x} = \frac{z_{10}}{z_{00}}$, $\bar{y} = \frac{z_{01}}{z_{00}}$ — координаты центра масс области D .

Инвариантность в этом случае обеспечивается независимостью степенных произведений под знаком интеграла от сдвига. Соответственно, при обработке дискретных изображений:

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

Для инвариантности этих моментов относительно масштабирования следует перейти к безразмерным моментам:

$$\zeta_{pq} = \frac{z_{pq}}{z_{00}^{\frac{p+q}{+1}}}$$

Для инвариантности относительно поворота строятся собственно инварианты Xy :

$$\begin{aligned} G_1 &= \zeta_{20} + \zeta_{02}, \\ G_2 &= (\zeta_{20} - \zeta_{02})^2 + 4\zeta_{11}^2, \\ G_3 &= (\zeta_{30} - 3\zeta_{12})^2 + (\zeta_{03} - 3\zeta_{21})^2, \\ G_4 &= (\zeta_{30} + \zeta_{12})^2 + (\zeta_{03} + \zeta_{21})^2, \\ G_5 &= (\zeta_{30} - 3\zeta_{12})(\zeta_{30} + \zeta_{12}) \left[(\zeta_{30} + \zeta_{12})^2 - 3(\zeta_{03} + \zeta_{21})^2 \right] + \\ &+ (3\zeta_{21} - \zeta_{03})(\zeta_{03} + \zeta_{21}) \left[3(\zeta_{30} + \zeta_{12})^2 - (\zeta_{03} + \zeta_{21})^2 \right], \\ G_6 &= (\zeta_{20} - \zeta_{02}) \left[(\zeta_{30} + \zeta_{12})^2 - (\zeta_{03} + \zeta_{21})^2 + 4\zeta_{11}(\zeta_{30} + \zeta_{12})(\zeta_{03} + \zeta_{21}) \right], \\ G_7 &= (3\zeta_{21} - \zeta_{03})(\zeta_{30} + \zeta_{12}) \left[(\zeta_{30} + \zeta_{12})^2 - 3(\zeta_{03} + \zeta_{21})^2 \right] - \\ &- (\zeta_{30} - 3\zeta_{12})(\zeta_{21} + \zeta_{03}) \left[3(\zeta_{30} + \zeta_{21})^2 - (\zeta_{03} + \zeta_{21})^2 \right]. \end{aligned}$$

В дальнейшем для сравнения инвариантных признаков текущего и эталонного изображений предлагается использовать корреляционную функцию

$$Q(x, y) = \frac{\sum_{i=1}^7 G_i \overline{G}_i(x, y)}{\left(\sum_{i=1}^7 G_i^2 \sum_{i=1}^7 \overline{G}_i^2(x, y) \right)^{1/2}},$$

где G_i — i -й момент ЭИ; \overline{G}_i — i -й момент ТИ в положении (x, y) .

При размерах изображений $K \times L$ и $N \times M$, количество точек для вычисления $Q(x, y)$ равно: $T_x = (K - N + 1)(L - M + 1)$.

При больших размерах изображений количество вычислений функции $Q(x, y)$ является значительным, что обуславливает необходимость повышения производительности алгоритмов корреляционного совмещения изображений.

Так как подготовка ЭИ осуществляется заблаговременно, то, по сути дела, в условиях жесткого лимита времени на борту ЛА вычисляются только моменты для ТИ. Таким образом, при корреляционном совмещении будем вычислять только вектор признаков $P_{ТИ}$ соответствующей области ТИ. Моменты можно вычислить как по значениям функции яркости изображения, так и по бинарному изображению $f(x, y)$, содержащему границы радиолокационно и оптически контрастных объектов. Значения точек, равные 1, соответствуют границе, а значения точек, равные 0 — области фона. При этом $f(x, y)$ содержит только единичные значения и их координаты в изображении, а значения фона исключены, так как в данном случае они не несут информации. Это в значительной степени сокращает

размерность изображения. Данную особенность изображения $f(x, y)$, прошедшего этап сегментации, можно использовать для вычисления моментов. В этом случае

$$z_{pq} = \sum_{i=1}^E x_i^p y_i^q, \quad p, q = 0, 1, 2, \dots,$$

где x_i, y_i — координаты единичной точки в $f(x, y)$; E — количество единичных точек.

Таким образом, вычисление моментов по полученной формуле обладает меньшей вычислительной сложностью по сравнению с исходной формулой. Кроме того, здесь отсутствует операция умножения на значение функции яркости.

Дальнейшее сокращение количества вычислений можно производить по аналогии с [5], так как точные вычисления имеет смысл производить только для небольшого числа точек вблизи максимума корреляционной функции. При этом расчет корреляционной функции реализуется в два этапа.

На первом этапе выполняется снижение разрешения изображения с помощью блоков, яркость которых вычисляется как средняя яркость элементов данного участка изображения. Для полученного изображения с пониженным разрешением вычисляется корреляционная функция и находятся координаты взаимного положения изображений, соответствующие ее максимуму.

На втором этапе вычисляется корреляционная функция между ЭИ и частью ТИ, 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 $Q(x, y)$, найденные на втором этапе, и являются координатами точки совмещения изображений.

Для реализации данного двухэтапного алгоритма необходимо вычислять среднюю яркость блока, что несколько снижает быстродействие алгоритма в целом. Для повышения быстродействия предлагается на первом этапе работы алгоритма выполнять вычисление корреляционной функции $Q(x, y)$ с шагом по осям x и y больше единицы: $\Delta x = b, \Delta y = u$. Второй этап остается без изменений.

В этом случае количество вычислений определяется по формуле

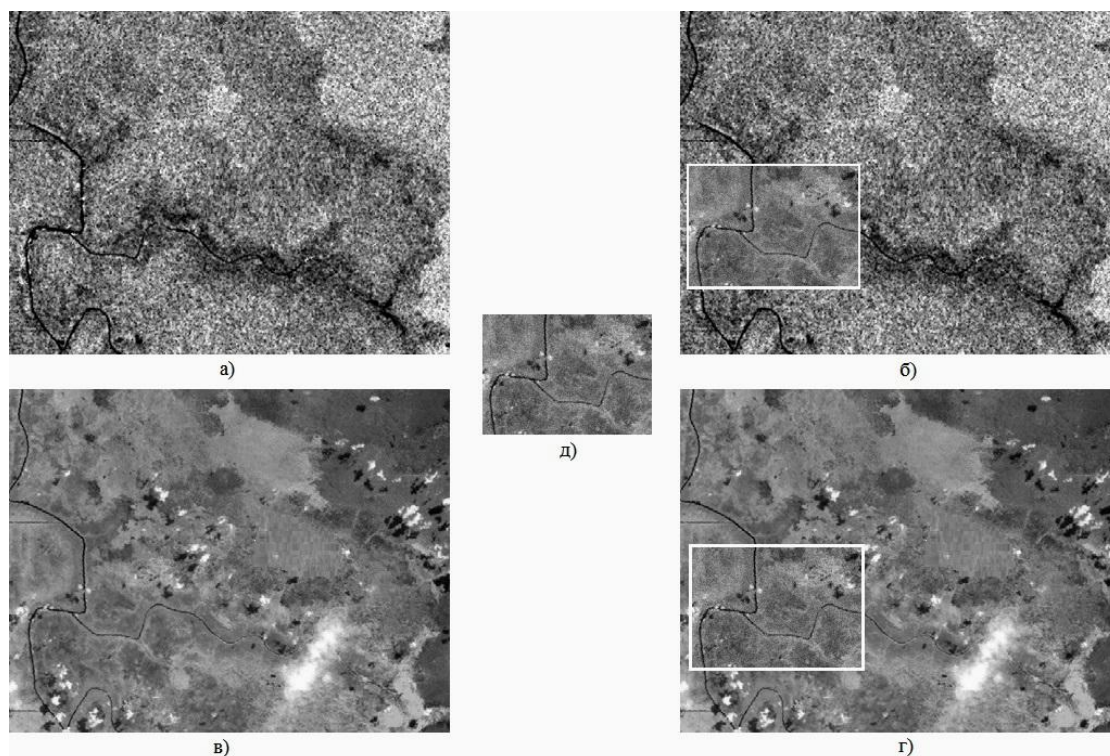
$$T_2 = [(K - N + 1) / b][(L - N + 1) / u] + (\Delta x_1 + \Delta x_2 + 1)(\Delta y_1 + \Delta y_2 + 1),$$

где $K \times L$ — размерность изображения; $b \times u$ — шаг изменения координат для вычисления корреляционной функции первого этапа алгоритма; $\Delta x_1, \Delta y_1, \Delta x_2, \Delta y_2$ — смещение границ окна вычисления корреляционной функции второго этапа относительно максимума первого этапа.

Тогда выигрыш в количестве вычислений (быстродействии) предложенного подхода (V) определяется из соотношения:

$$V = T_x / T_2.$$

На рисунке приведено корреляционное совмещение ЭИ и ТИ в комбинированной КЭСН на примерах радиолокационного и оптического изображений.



Корреляционное совмещение ЭИ и ТИ в комбинированной КЭСН:

- а) текущее радиолокационное изображение; б) результат совмещения текущего радиолокационного изображения с универсальным ЭИ; в) текущее оптическое изображение;
- г) результат совмещения текущего оптического изображения с универсальным ЭИ;
- д) универсальное ЭИ

Выводы

Проанализированы пути повышения быстродействия известных алгоритмов совмещения текущего и эталонного изображений в комбинированных корреляционно-экстремальных системах навигации летательных аппаратов за счет поиска возможности сокращения вычислительных затрат в силу жесткого лимита времени на операцию совмещения. Предложен алгоритм корреляционного совмещения ЭИ и ТИ на основе метода моментных инвариантов Ху. Рассмотрены пути сокращения вычислительных затрат при вычислении моментов для изображений и последующее двухэтапное вычисление корреляционной функции, что позволяет значительно сократить временные затраты на ее вычисление.

1. Мезенцев А.В., Буточнов А.Н., Юзефович В.В., Миронюк С.В. Оценка качества эталонных изображений, создаваемых для корреляционно-экстремальных систем навигации. *Ресстрація, зберігання і оброб. даних*. 2014. Т. 16. № 4. С. 44–53.

2. Антюфеев В.Н., Быков В.Н. Сравнительный анализ алгоритмов совмещения изображений в корреляционно-экстремальных системах навигации летательных аппаратов. *Авиационно-космическая техника и технология*. 2008. № 1(48). С. 70–74.

3. Manjusha P. Deshmukh, Udhav Bhosle. A survey of image registration. *International Journal of Image Processing*. 2011. Vol. 5(3). P. 245–269.

4. Кожушко Я.Н. Алгоритмы совмещения изображений в корреляционно-экстремальных системах навигации летательных аппаратов. Харків: ХУПС: *Обробка інформації в складних технічних системах*. 2008. Вип. 1(68). С. 25–28.

5. Душепа В.А., Усс М.Л. Учет информативности при совмещении оптических изображений в задачах корреляционно-экстремальной навигации. *Радиотехника*. 2013. Вып. 172. С. 72–80.

6. 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.

Поступила в редакцию 13.03.2017