

УДК 629.7.05:681.3.06

Б.В. Костров, Ю.В. Конкин**МЕТОД СОВМЕЩЕНИЯ
РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ МЕСТНОСТИ**

Рассматривается метод совмещения радиолокационного изображения от радиолокационной станции и модели радиолокационного изображения участка местности с помощью инвариантных моментов H_i . Совмещение выполняется с целью определения географических координат точки привязки. Приводятся результаты работы алгоритмов, реализующих данный метод.

Введение. В данной статье рассматривается метод совмещения объектов местности текущего и эталонного изображений для нахождения точки наиболее вероятной привязки их в реальном времени к географическим координатам местонахождения маневренного летательного аппарата (ЛА) в условиях маловысотного полета. Полученные координаты могут быть использованы для коррекции инерциальных навигационных систем (ИНС). Подход к определению координат на основе совмещения изображений широко используется в корреляционно-экстремальных системах навигации (КЭСН) [1].

Цель работы. При рассогласовании координат ЛА в пространстве в моменты формирования текущего и эталонного изображений необходимо выделить набор признаков, характеризующих данные изображения и являющихся инвариантными к преобразованиям сдвига, масштаба и поворота изображений. На основе выделенных признаков необходимо разработать алгоритм совмещения изображений и выполнить его экспериментальную проверку.

В статье поясняется технология реализации метода совмещения и приводятся результаты работы соответствующего алгоритма.

В качестве датчика текущего изображения (РЛИ) используется 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 ЛА. Антенна БРЛС установлена на гиросtabilизатор по углам крена и тангажа, что позволяет упростить предварительную обработку РЛИ, отказавшись от геометрической коррекции изображения.

В качестве эталонного изображения используется модель РЛИ участка местности. Задача синтеза эталонного РЛИ для КЭСН с помощью ГИС "Карта 2005" и с учетом параметров БРЛС рассмотрена в работе [2]. Результатом такого синтеза является РЛИ выбранного участка местности, содержащего наиболее информативные объекты. Алгоритм синтеза требует больших вычислительных затрат, поэтому не рассчитан на использование в реальном времени. Синтез эталонного РЛИ необходимо выполнить на этапе предполетной подготовки ЛА.

Текущее РЛИ является монохромным изображением, содержащим информацию о радиолокационном контрасте участка местности. Оно является полутоновым 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. Интенсивность изображения изменяется в интервале $F_{ТН} = \overline{0, 255}$.

Эталонное изображение радиолокационного контраста участка местности представляет собой полутоновое 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 изображения 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 [2].

За начало системы прямоугольных координат

нат принимается центр масс ЛА. 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 рассмотрено в работе [3]. Предварительная обработка эталонного изображения выполняется на этапе синтеза РЛИ аналогично обработке текущего изображения.

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

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.

Особенность формирования РЛИ заключается еще и 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.

Таким образом, приходится совмещать изображения с взаимными геометрическими и радиометрическими искажениями. Радиометрические искажения сглаживаются на этапе предварительной обработки [3]. Кроме того, распознаваемый эталонный объект должен описываться вектором признаков, инвариантным 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.

Для выделения признаков изображения наиболее широко используется метод инвариантных моментов Ну [4].

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:

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

$$p, q = 0, 1, 2, \dots,$$

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:

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

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

$$\begin{aligned} S_1 &= \eta_{20} + \eta_{02}, \\ S_2 &= (\eta_{20} - \eta_{02})^2 + 4\eta_{11}^2, \\ S_3 &= (\eta_{30} - 3\eta_{12})^2 + (\eta_{03} - 3\eta_{21})^2, \\ S_4 &= (\eta_{30} + \eta_{12})^2 + (\eta_{03} + \eta_{21})^2, \end{aligned}$$

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

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

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

где S_i – i -й момент эталонного изображения, \bar{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.

Для экспериментального исследования описанного выше метода был разработан программный комплекс моделирования навигационной привязки на языке Builder C++ 6.0. Комплекс предназначен для использования в среде Windows 2000/XP и требует не менее 256 мегабайт оперативной памяти. Основные возможности комплекса:

- использование в качестве источника картографических данных цифровых карт местности в форматах SXF и MAP;

- использование для доступа к картографическим данным библиотек функций ГИС “Карта 2005”;

- моделирование по картографическим данным и заданным параметрам БРЛС радиолокационного изображения участка земной поверхности. Полученные изображения представляются в прямоугольной системе координат и в системе координат “азимут-дальность” и сохраняются в файлах специально разработанных форматов [2];

- моделирование шумов РЛИ [2];
- предварительная обработка РЛИ [3];
- расчет инвариантных моментов РЛИ по формулам (4), (5), (6) и совмещение изображений на основе КФ (7).

Кроме задачи синтеза эталонного изображения, программный комплекс можно использовать для моделирования текущего изображения от БРЛС ЛА. Для этого на синтезированное изображение накладывается модель шумов РЛИ [2]. При этом появляется возможность экспериментальной проверки метода совмещения практически при любых координатных рассогласованиях точки нахождения ЛА при формировании эталонного и текущего изображений.

Для проведения эксперимента необходимо выполнить следующие действия:

- на электронной карте местности, представленной в прямоугольных географических координатах, выбирается точка нахождения ЛА с координатами (x_1, y_1) , углом поворота оси антенны БРЛС α_1 и высотой ЛА относительно земной поверхности h . Далее выполняется моделирование РЛИ с заданными параметрами БРЛС. Для модели РЛИ выполняется расчет инвариантных моментов $S_1 - S_7$. Полученное изображение сохраняется в файле специального формата. Пример синтеза эталонного РЛИ, содержащего изображения железнодорожного и шоссе мостов, приведен на рисунке 1;



Рисунок 1

- для синтеза модели текущего изображения задаются координатное рассогласование точки его формирования относительно точки формирования эталонного изображения Δx , Δy и изменение угла поворота оси антенны БРЛС на $\Delta \alpha$. Остальные параметры моделирования не изменяются. На изображение накладывается шум. На рисунке 2 приводится текущее РЛИ, которое было построено при рассогласовании координат точки нахождения ЛА $\Delta x = 1200$ м, $\Delta y = 1000$ м и повороте оси антенны БРЛС на угол 25 градусов;

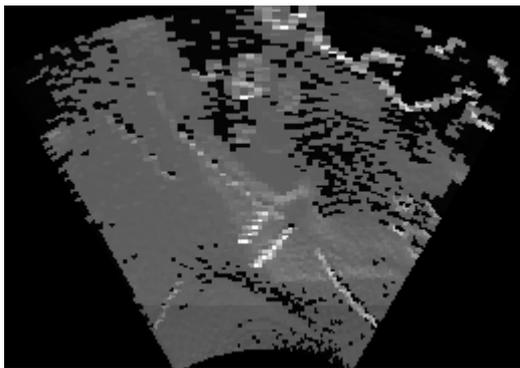


Рисунок 2

– для полученных изображений выполняются фильтрация, расчет инвариантных моментов и совмещение на основе рассмотренной выше КФ (7). На рисунке 3 белым прямоугольником показан результат работы алгоритма совмещения текущего и эталонного изображений на основе инвариантных моментов.

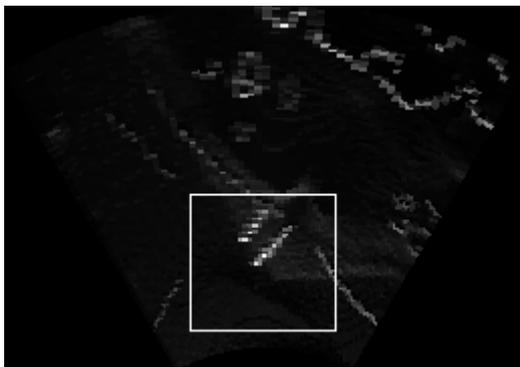


Рисунок 3

Для выполнения синтеза эталонного РЛИ разрешение по дальности моделируемой БРЛС (в метрах) должно быть больше или равно разрешению электронной карты (метров на пиксел). При этом максимально возможная точность привязки определяется разрешением электронной карты. В проводимых экспериментах использовалась электронная карта масштаба 1:100000,

обеспечивающая максимально возможную точность привязки 25м.

Выводы. Разработанный комплекс моделирования навигационной привязки был использован для проведения серии экспериментов по исследованию пределов координатного рассогласования точки нахождения ЛА при формировании текущего и эталонного изображений, а также угла поворота оси антенны БРЛС. Привязка выполнялась для заданных высот полета ЛА (25м, 50м, 100м).

Координаты привязки текущего и эталонного изображений оставались постоянными:

– при изменении угла поворота оси антенны БРЛС на величину ± 25 градусов;

– при изменении точки нахождения ЛА $\Delta x = \pm 1250$ м, $\Delta y = \pm 1200$ м.

Полученные результаты будут использоваться в работах, проводимых ФГУП ГРПЗ.

Библиографический список

1. Андреев Г.А., Потанов А.А. Активные системы ориентации по геофизическим полям // Зарубежная радиоэлектроника. 1988. № 9. С. 62-85.

2. Разработка математического и программного обеспечения методов комплексной навигации на основе совместной обработки радиолокационной и картографической информации: Отчет о НИР / Рязан. гос. радиотехн. акад.; Руководитель В.К.Злобин; Тема № 6-05; № ГР 01200501805. Рязань, 2006. 135с.: Соисполн.: Логинов А.А., Елесина С.И., Конкин Ю.В. и др.

3. 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.

4. Андреев Г.А., Потанов А.А. Алгоритмы обработки навигационной пространственно-временной информации. Часть II // Зарубежная радиоэлектроника. 1989. № 4. С. 3-21.