

УДК 004.932

СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УТОЧНЕНИЯ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ ОПОРНЫХ ТОЧЕК ВЗАИМНО СОВМЕЩАЕМЫХ СПУТНИКОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ СТОХАСТИЧЕСКОЙ ГЕОМЕТРИИ

А.Н. КОЗЛОВСКИЙ, Л.П. ПОДЕНОК

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь*

*Объединенный институт проблем информатики НАН Беларуси
Сурганова, 6, Минск, 220012, Беларусь*

Поступила в редакцию 20 марта 2009

Представлена система автоматического уточнения местоположения опорных точек (ОТ) взаимно совмещаемых спутниковых изображений на основе методов стохастической геометрии. Совмещение осуществляется в ручном режиме. Оператор производит традиционные операции по выбору ОТ на изображениях. Уточнение местоположения ОТ осуществляется с помощью предлагаемой системы, которая представляет собой систему распознавания локальных областей изображений на основе Тгасе-преобразования. Тестирование представленной системы подтвердило ее эффективность — процесс задания ОТ оператором существенно облегчается.

Ключевые слова: изображение, взаимное совмещение изображений, опорные точки, стохастическая геометрия, тройной признак, Тгасе-преобразования.

Введение

Проблема взаимного совмещения изображений возникает в тех случаях, когда два изображения представляют один и тот же объект, но размеры и местоположение рассматриваемого объекта на представленных изображениях отличны. Тогда говорят о том, что рассматриваемые изображения являются пространственно не совмещенными. Обычно такая проблема возникает, если изображения получены в разное время, с помощью различной съемочной аппаратуры или с различных направлений.

Основная идея, лежащая в основе методов взаимного совмещения изображений, основанных на конечном наборе элементов изображений, заключается в нахождении такого пространственного преобразования, что каждый элемент базового изображения отображается в соответствующий ему элемент на совмещаемом [1].

Для описания местоположения соответствующих элементов на совмещаемом и базовом изображениях применяется концепция опорных точек (ОТ), позволяющая гибко, эффективно и экономично с точки зрения хранения, обработки и обмена информацией описывать взаимные геометрические искажения изображений [2]. Опорная точка есть не что иное, как координаты местоположения того или иного элемента изображения.

При применении на практике ручном совмещении изображений оператору зачастую довольно тяжело сразу определить местоположение ОТ с требуемой точностью как на базовом, так и на совмещаемом изображениях. Получение точного местоположения ОТ является очень трудоемким процессом, требующим зачастую привлечения большого количества операторов, что существенно увеличивает затраты на обработку полученных спутниковых изображений. Поэтому автоматизация процесса совмещения является весьма актуальной задачей.

Система автоматического уточнения местоположения опорных точек взаимно совмещаемых спутниковых изображений

Пространственные искажения взаимно совмещаемых спутниковых изображений, получаемых различной съемочной аппаратурой в разных спектральных зонах и в разное время, имеют довольно сложное математическое описание, однако в некоторой окрестности точки можно считать, что они описываются проективной группой преобразований. Так как аффинная группа преобразований является подгруппой проективной группы преобразований, то задача автоматического уточнения местоположения ОТ взаимно совмещаемых спутниковых изображений представляет собой распознавание и локализацию (определение координат) некоторой окрестности D_1 опорной точки $R(x, y)$ базового изображения в некоторой окрестности D_2 опорной точки $T(\psi, z)$ совмещаемого с ним изображения независимо от их аффинных (проективных) преобразований. Результатом решения поставленной задачи является новое, уточненное местоположение (координаты (ψ_1, z_1)) опорной точки $T(\psi, z)$.

Представленная задача отличается чрезвычайной сложностью решения, особенно в случае одновременного действия на изображение всех компонент аффинного преобразования. Удобным инструментом для этой цели являются методы распознавания на основе стохастической геометрии, в частности, Тгасе–преобразования изображений. Характерной особенностью формируемых признаков, названных триплетными, является представление каждого из них в виде последовательной композиции трех функционалов:

$$\Pi F = \Phi \circ P \circ T \quad F \circ l(\varphi, p, t) \quad .$$

Каждый функционал (Φ , P и T) действует на функции одной переменной (φ , p и t) соответственно. Где p и φ — нормальные координаты сканирующей прямой $l(\varphi, p)$, t — связанная с ней естественная система координат, а F — исходное изображение. Такая структура обеспечивает возможность получения большого числа признаков, простоту их генерации, и, что особенно ценно, возможность формировать признаки, обладающие определенными свойствами. В частности, варьируя функционалы, можно добиться описания, инвариантного к сдвигам, вращениям и линейным деформациям изображений объектов или, напротив, чувствительного к ним [3, 4].

Формирование признаков объектов распознавания осуществляется не по всему изображению, а только по ограниченной области — окну обработки D_1 . Следовательно, получение признаков исследуемых объектов будет осуществляться в режиме скользящего окна. Формирование признаков в режиме скользящего окна и их использование в качестве признаков для обнаружения и распознавания объектов имеют следующие особенности, обусловленные спецификой этого режима:

– исчезает необходимость центрирования системы признаков, поскольку при обработке всегда надеться положение окна, для которого геометрический центр будет близок к центру тяжести объекта;

– возникает ситуация, когда окно захватывает только часть объекта, и эта часть постепенно увеличивается при "наползании" окна на объект, при этом центр тяжести изображения в окне смещается от края окна к его центру [5].

Схема алгоритма автоматического уточнения местоположения ОТ взаимно совмещаемых спутниковых изображений показана на рис. 1. Представленный алгоритм имеет два режима работы:

- 1) "захват" распознаваемого объекта;
- 2) локализация распознаваемого объекта.

Первый режим осуществляет обнаружение распознаваемого объекта. Окно обработки размером $M \times M$ пикселей передвигается с шагом s по области распознавания размером $N \times N$ пикселей, где $N = n \times s + M$, а n — это количество областей распознавания в строке и столбце области распознавания. Геометрический центр области распознавания определяет местоположение опорной точки $T(w, z)$ совмещаемого изображения.

Второй режим осуществляет локализацию найденного распознаваемого объекта. Окно обработки размером $M \times M$ пикселей передвигается с шагом s_1 по области распознавания размером $N_1 \times N_1$ пикселей, где $N_1 = n_1 \times s_1 + M$, а n_1 — это количество областей распознавания в строке и столбце области распознавания. Геометрический центр области распознавания определяют координаты, полученные на предыдущем этапе.

Таким образом, для локализации распознаваемого объекта мы должны обработать $n^2 + n_1^2 + 1$ окон D_1 .

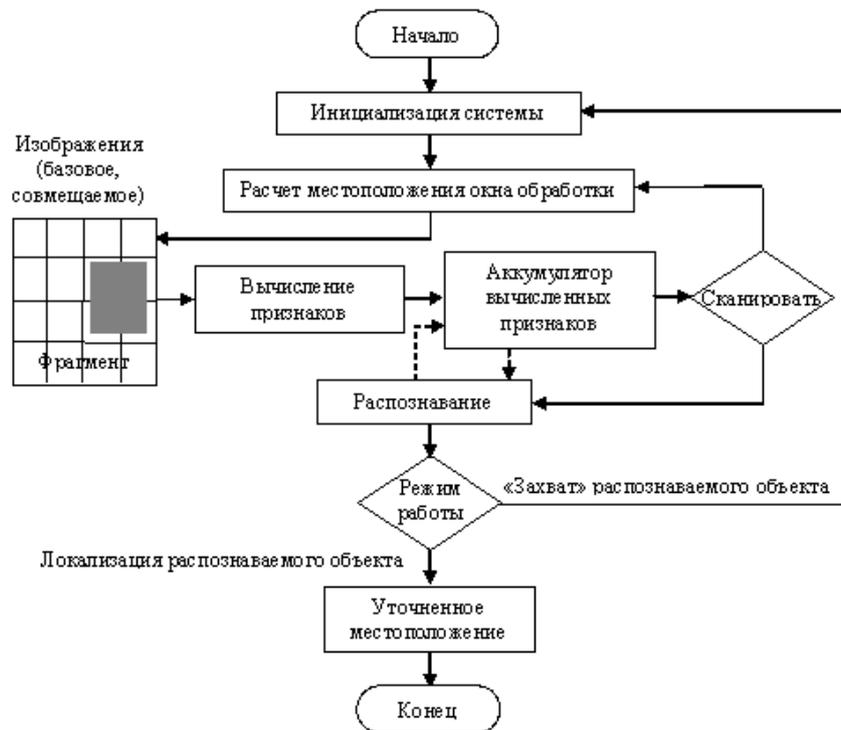


Рис. 1. Схема алгоритма автоматического уточнения местоположения опорных точек взаимно совмещаемых спутниковых изображений

Набор триплетных признаков, характеризующих распознаваемые локальные области совмещаемых спутниковых изображений

Рассмотрим прямую l , описываемую следующим уравнением:

$$x \cos \varphi + y \sin \varphi = p.$$

Направление прямой задается вектором с координатами $-\sin \varphi, \cos \varphi$. Центр декартовой системы координат располагается в центре изображения. Параметр p в отличие от обычно принятой записи может принимать также и отрицательные значения. Это связано с тем, что мы хотим, чтобы каждая прямая считалась дважды: с учетом ее возможных направлений.

На прямой l изображение оставляет след — функцию изображения вдоль прямой. На прямой имеется естественная одномерная система координат, поэтому можно вычислить функционал T (Trace-функционал). Результат вычисления зависит от двух параметров, p и φ . Направим ось $O\varphi$ горизонтально, а ось Op вертикально. В каждой точке p, φ интенсивностью цвета отметим значение функционала T . Получим Trace-трансформанту изображения.

Главное свойство Trace-трансформанты состоит в том, что она "хорошо" реагирует на движение объекта на изображении. Если объект поворачивается, то трансформанта лишь сдвигается вправо или влево. Если объект смещается, то столбцы трансформанты сдвигаются вверх или вниз, т.е. трансформанта получает "волнообразное" возмущение. При изучении движущихся

ся объектов трансформанты гораздо удобнее исходных изображений. Если мы обрабатываем столбцы, то получим периодическую функцию, сдвиг которой пропорционален повороту базового изображения. Эта обработка осуществляется диаметральным оператором. Результатом такой обработки является кривая с периодом 2π . Назовем ее круговой трансформантой.

И, наконец, на последнем шаге по круговой трансформанте с помощью кругового функционала (Φ) определяем число — признак изображения [4].

Представленная система основывается на следующем наборе функционалов, причем используемые функционалы Ξ должны обладать одним из следующих свойств:

– инвариантность к сдвигу, т. е. $\Xi \xi(x+b) = \Xi \xi(x)$, $\forall b \in \mathfrak{R}$;

– существует положительная функция α такая, что $\Xi \xi(ax) = \alpha(a)\Xi \xi(x)$, $\forall a > 0$ из области Dom α задания функции α ;

– существует положительная функция γ такая, что: $\Xi c\xi(x) = \gamma(c)\Xi \xi(x)$, $\forall c > 0$ из области Dom γ задания функции γ .

Trace-функционалы:

1. T_1 : $\int f(t) dt$ — интеграл вдоль прямой;

2. T_2 : дисперсия функции, предварительно нормированная на ее интеграл. Нормирование делается для того, чтобы использовать само понятие дисперсии, которое определено только для не отрицательных функций, интеграл от которых равен единице. Если функция была тождественным нулем, то считается, что дисперсия равна нулю. Это необходимо для непрерывности Trace-преобразования (хотя обычно считают, что дисперсия нулевой функции равна бесконечности);

3. T_3 : дисперсия функции, вычисленная, как указано в предыдущем пункте, затем умноженная на интеграл от функции. Это делается для того, чтобы учесть малость функции и придать малый вес случайному шуму и искажениям.

Диаметральные функционалы:

1. P_1 : мера носителя функции (для таблично заданной функции это число ненулевых компонент, умноженное на шаг дискретизации);

2. P_2 : $\left[\int f^2(p) dp \right]^{1/2}$ — гильбертова норма функции;

3. P_3 : максимум функции;

4. P_4 : вариация функции.

Круговые функционалы:

1. Φ_1 : $\left[\int f^4(\varphi) d\varphi \right]^{1/4}$ евклидова норма (гильбертова норма пространства L^2);

2. Φ_2 : евклидова норма функции, деленная на вариацию функции;

3. Φ_3 : амплитуда второй гармоники Фурье-функции, деленная на максимум функции;

4. Φ_4 : амплитуда четвертой гармоники Фурье-функции, деленная на евклидову норму функции;

5. Φ_5 : минимум функции;

6. Φ_6 : максимум функции;

7. Φ_7 : вариация функции.

Итого мы имеем $3 + 4 + 7 = 14$ разных функционалов, позволяющих сформировать $3 \times 4 \times 7 = 84$ признаков изображения.

Trace-матрица имеет следующие размеры:

– по переменной φ ось горизонтальная, область изменения $0, \dots, 2\pi$, число дискрет 40;

– по переменной p ось направлена вверх, область изменения $-15, \dots, 15$, число дискрет 69.

Каждая локальная область, таким образом, характеризуется вектором из 84 чисел.

Далее для каждого рассчитанного положения окна вычисляется расстояние в 84-мерном пространстве от базового окна. Минимальное расстояние считается результатом процесса распознавания данного изображения.

Результаты экспериментов

Эксперименты проводились с использованием базового изображения I и совмещаемого с ним изображения I_1 . Совмещаемое изображение I_1 было получено путем преобразования базового изображения I используя известное нам проективное преобразование и бикубическую интерполяцию значений яркости. Изображения I , I_1 размером 356×256 и 466×346 пикселей, соответственно, представлены на рис. 2.

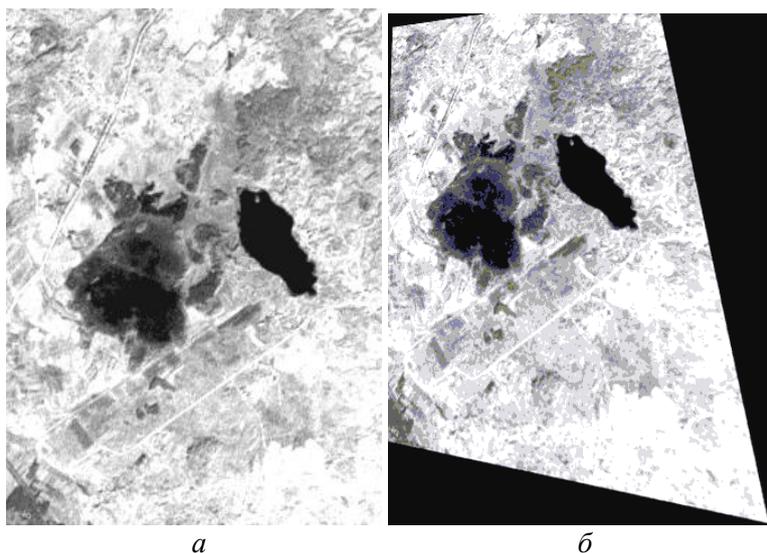


Рис. 2. Исходное (а) и совмещаемое (б) изображения

Зададим ОТ $R(x, y)$ на базовом изображении I и соответствующую ей ОТ $T(w, z)$ на совмещаемом изображении I_1 . Применяв процедуру автоматического уточнения местоположения ОТ, получим новое, уточненное местоположение (координаты w_1, z_1) опорной точки $T(w, z)$. Зная геометрическое преобразование, связывающие изображения I и I_1 , мы можем вычислить идеальное местоположение (координаты w_2, z_2), соответствующие опорной точке $R(x, y)$ базового изображения I на совмещаемом изображении I_1 , и произвести оценку точности системы автоматического уточнения.

Результаты работы системы автоматического уточнения на примере 10 пар опорных точек представлены в таблице. При уточнении местоположения ОТ в процессе распознавания использовалась окрестность опорной точки $R(x, y)$ базового изображения I размером 21×21 пикселей. Распознавание осуществлялось в окрестности опорной точки $T(w, z)$ совмещаемого изображения I_1 размером 91×91 пикселей.

Результаты работы системы автоматического уточнения

Местоположение ОТ базового изображения	местоположение ОТ совмещаемого изображения I_1		
	исходное (w, z)	уточненное (w_1, z_1)	идеальное (w_2, z_2)
(24, 24)	(42, 42)	(25, 29)	(22, 29)
(121, 27)	(78, 11)	(111, 22)	(104, 21)
(230, 39)	(234, 37)	(215, 18)	(215, 18)
(201, 164)	(227, 179)	(203, 155)	(202, 154)
(42, 311)	(12, 354)	(57, 330)	(36, 332)
(120, 342)	(142, 372)	(129, 394)	(127, 394)
(201, 315)	(209, 343)	(241, 370)	(233, 369)
(145, 210)	(181, 231)	(176, 201)	(143, 209)
(125, 180)	(154, 202)	(130, 169)	(118, 173)
(235, 342)	(272, 401)	(305, 419)	(295, 428)

Заключение

На основе полученных результатов можно считать, что представленная система решает поставленную перед ней задачу — процесс задания ОТ оператором существенно облегчается.

SYSTEM OF AUTOMATIC REFINEMENT OF CONTROL POINT LOCATION OF REGISTERED SATELLITE IMAGES BASED ON STOCHASTIC GEOMETRY

A.N. Kozlovsky, L.P. Podenok

Abstract

A system of automatic refinement of control points location for process of registering satellite images based on stochastic geometry is presented. The image registration is performed in manual mode. An operator makes traditional operations selecting control points location on registering images. The refinement of control points location performs according to the introduced system. It represents a pattern recognition system based on stochastic geometry and utilizes the Trace-transform. The experiments have approved it's efficiency.

Литература

1. *Modersitzki J.* Numerical Methods for Image Registration. Oxford University Press, 2004. 199 p.
2. *Василевский А.С.* // Материалы всероссийской конференции “Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса”. Россия, Москва. 10–12 ноября 2003 г., М., 2003. С. 109.
3. *Федотов Н.Г., Кадыров А.А.* // Автометрия. 1996. № 1. С. 88–93.
4. *Федотов Н.Г., Кадыров А.А.* // Автометрия. 1997. № 4. С. 65–79.
5. Методы компьютерной обработки изображений. Под редакцией В.А. Сойфера. М., 2003.