

# Исследование влияния рассинхронизации входных изображений на качество работы алгоритмов поиска структурных различий\*

*Ф. А. Корнилов*

fakornilov@mail.ru

Институт математики и механики им. Н. Н. Красовского Уральского отделения Российской академии наук (ИММ УрО РАН), Екатеринбург, Россия

Рассматривается влияние рассинхронизации входных изображений на качество работы алгоритмов поиска структурных различий, под которыми понимаются появившиеся или исчезнувшие объекты местности, для одновременных космических снимков земной поверхности. Работа алгоритмов оценивается на паре изображений, представляющих собой смещенные относительно друг друга копии одного и того же снимка, что позволяет выяснить степень устойчивости методов к геометрическому несоответствию входных данных с исключением влияния структурных различий или случайного шума. Приводится описание нового метода сравнения структур изображений, использование которого совместно с алгоритмами поиска структурных различий позволяет уменьшить количество ложных тревог при рассинхронизации входных изображений. Эксперименты на данных, подготовленных путем взаимного сдвига пары изначально геометрически выровненных космоснимков, показывают, что предложенная модификация алгоритмов подходит для прикладного применения.

**Ключевые слова:** *обработка изображений; структурные различия; рассинхронизация изображений*

DOI: 10.21469/22233792.1.12.04

## Research of the impact of misregistration of input images on the accuracy of change detection\*

*F. A. Kornilov*

Institute of Mathematics and Mechanics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,  
16 S. Kovalevskaja st., Ekaterinburg, Russia

**Background:** The paper is devoted to studying the impact of misregistration of the input images on the performance of the structural changes detection algorithms for multitemporal Earth's surface satellite images. Here, the structural changes mean appeared or disappeared ground's objects.

**Methods:** Algorithms performance is estimated using a pair of images, where the second image is a geometrically shifted copy of the first image; such kind of testing lets to obtain degree of robustness of the methods to geometrical misregistration of the input data without influence of the structural changes or random noise.

---

\*Работа выполнена при частичной финансовой поддержке госбюджетной темы «Экстремальные задачи и алгоритмы теории приближения функций с приложением к проблемам навигации по геофизическим полям и управления антенными системами» (ГР №01201367475).

**Results:** The new method for comparing images structures is introduced; applied together with other structural changes algorithm, it leads to decrease the number of false alarms in the presence of misregistration of input images.

**Concluding Remarks:** The experiments on the image pairs, obtained by shifting originally aligned satellite images, show that considered algorithms modification is valuable for real applications.

**Keywords:** *image processing; structural differences; misregistration of images*

**DOI:** 10.21469/22233792.1.12.04

## 1 Введение

Задача поиска различий на двух изображениях возникает в различных областях компьютерного зрения, таких как сжатие видеоданных, системы видеонаблюдения и др. В данной работе рассматривается поиск различий на космических снимках земной поверхности. Для их автоматического анализа особый интерес представляет обнаружение не всех изменений, а так называемых *структурных различий*, которые заключаются в существенном изменении наблюдаемой сцены. Таковыми будем считать появление, исчезновение или изменение формы объектов: домов, дорог, участков леса и т.д. При этом изменения освещенности и цвета объектов структурными различиями не считаются.

С точки зрения требований к входным данным в задаче поиска структурных различий рассматриваются два полутоновых разновременных космических снимка одного и того же участка земной поверхности. Предполагается, что они имеют одинаковый размер в пикселях и геометрически выровнены, т.е. каждый элемент  $(x, y)$  на обоих снимках имеет одни и те же координаты на местности. Разумеется, точность такой привязки к местности будет напрямую влиять на качество работы алгоритмов, что привело к появлению статей, исследующих влияние недостаточной геометрической выровненности (рассинхронизации) изображений на результат поиска различий.

В работе [1] приведено описание эксперимента по оценке влияния рассинхронизации для изображения и его копии, благодаря чему исключено влияние структурных различий, и та же оценка для рассинхронизированных разновременных изображений. Рассинхронизация тождественна сдвигу изображения по обеим осям. Для обоих экспериментов построены графики зависимости величины, представляющей собой относительную сумму квадратов попиксельной разности исходного и сдвинутого изображений (некоторый аналог величины структурного различия, называемый полудисперсией), от величины сдвига. Графики в обоих случаях получились похожими на график степенной функции с показателем 0,5. Результаты таковы: ошибка поиска различий, связанная с рассинхронизацией изображений, составляющая 10% от величины собственно структурных различий, может быть вызвана сдвигом в 0,2 пикселя. При сдвиге в 1 пиксель эта ошибка достигает 50%. Этот подход был развит в работе [2], где авторы выбирали разные интервалы длин волн для эксперимента. Результаты аналогичны статье предшественников [1]: ошибка в регистрации 0,1934 пикселя позволяет найти 90% истинных структурных различий среди всех обнаруженных, а ошибка в 1 пиксель приводит к резкому падению точности.

Данная работа состоит из двух частей. В первой будет приведено исследование влияния рассинхронизации входных изображений на качество работы алгоритмов, описанных в [3], на основе подхода, аналогичного используемому в [1], но для более существенных сдвигов в несколько пикселей: подобное исследование интересно с точки зрения несовершенства (или отсутствия) геопривязки входных снимков или, что более вероятно, разного угла

съемки. Во второй части будет предложен специальный алгоритм, позволяющий частично устранить влияние подобной рассинхронизации, и результаты его применения к реальным снимкам.

## 2 Алгоритмы поиска структурных различий

В данном разделе приводится краткое описание разработанных алгоритмов поиска структурных различий изображений и их устойчивость к рассинхронизации входных снимков.

### 2.1 Общая схема алгоритмов

Предлагаемые в данной работе методы опираются на использование функций преобразования яркости — попиксельно действующих операторов относительной радиометрической коррекции исходных изображений, которые строятся для каждого положения сканирующего окна на основе наборов яркостей изображений в нем и применяются для «выравнивания» яркости фрагментов с сохранением их структуры. Такой подход позволяет игнорировать не считающиеся структурными различиями объекты, изменившие свой цвет, но сохранившие форму. Алгоритмы состоят из следующих шагов.

1. Исходные изображения сканируются с шагом 1 локальным окном заданного размера  $d \times d$ ; ограниченные данным окном фрагменты будем обозначать  $f$  и  $g$ . Центральную точку этого окна будем обозначать  $x_c$ .
2. Для каждого положения окна строятся две функции преобразования яркости  $F_{fg}$  и  $F_{gf}$ . Использование схемы с двумя функциями позволяет добиться симметризации результата, т. е. становится неважным, сравнивается первое изображение со вторым или наоборот.
3. С помощью функций  $F_{fg}$  и  $F_{gf}$  строятся преобразованные фрагменты изображений  $f' = F_{fg}(f)$  и  $g' = F_{gf}(g)$ , при этом яркость  $f'$  «выровнена» по яркости фрагмента  $g$  с сохранением структуры  $f$ , и аналогично — для фрагмента  $g'$ .
4. Строится результирующее разностное изображение:

$$R(x_c) = \max(|f'(x_c) - g(x_c)|, |g'(x_c) - f(x_c)|).$$

Для этого изображения яркость точки характеризует величину структурного несоответствия исходных изображений, т. е. чем ярче точка, тем вероятнее, что в ней присутствует структурное различие.

5. Производится пороговая обработка изображения  $R$ . Таким образом, обработка каждого сканирующего окна дает на результирующем изображении одну точку. Далее из этих точек формируются связные области структурных различий — конечный результат. Для борьбы со случайными выбросами можно фильтровать найденные области, отбрасывая те, площадь которых незначительна.

В качестве функций преобразования яркости рассматриваются:

- (1) морфологический проектор [4]:

$$f'(x) = \sum_i \frac{\sum_{x' \in X} g(x') \chi_i^f(x')}{\sum_{x' \in X} \chi_i^f(x')} \chi_i^f(x),$$

где

$$\chi_i^f(x) = \begin{cases} 1, & \text{если } f(x) = i; \\ 0, & \text{иначе,} \end{cases}$$

суммирование ведется по всем уровням яркости  $i$  фрагмента  $f$  первого изображения;

- (2) регуляризованный вариант морфологического проектора, основанный на использовании билатерального фильтра [5]:

$$f'(x) = \sum_i \left( \frac{\sum_{x' \in X} g(x') \tilde{\chi}_i^f(x')}{\sum_{x' \in X} \tilde{\chi}_i^f(x')} \frac{\tilde{\chi}_i^f(x)}{\sum_j \tilde{\chi}_i^f(x)} \right),$$

где  $\tilde{\chi}_i^f$  вычисляется по формуле

$$\tilde{\chi}_i^f(x) = \exp \left( -\frac{(f(x) - i)^2}{\sigma_c^2} \right) \exp \left( -\frac{(x - x_c)^2}{\sigma_d^2} \right);$$

- (3) линейная функция преобразования яркости:

$$f'(x) = kf(x) + b,$$

где коэффициенты находятся с помощью метода наименьших квадратов (МНК) по двум фрагментам изображений, ограниченных сканирующим окном, из соотношения

$$\sum_{x \in S_d} (g(x) - (kf(x) + b))^2 \rightarrow \min_{k,b}.$$

Здесь  $S_d$  — множество точек, ограниченных сканирующим окном;

- (4) квадратичная функция преобразования яркости:

$$f'(x) = af^2(x) + bf(x) + c,$$

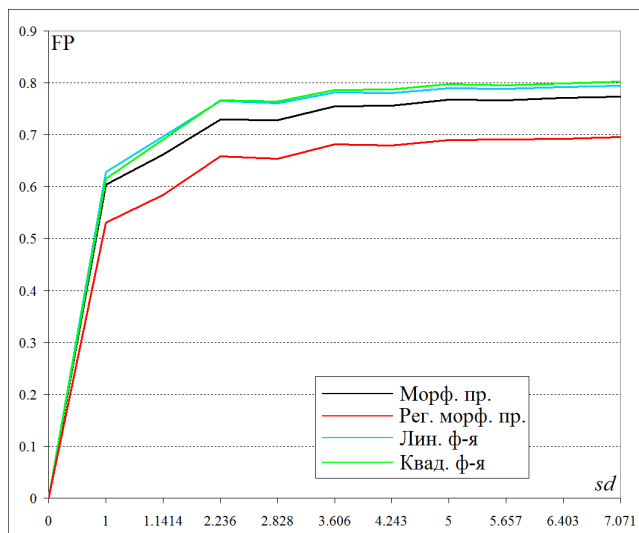
где коэффициенты находятся с помощью МНК по двум фрагментам изображений, ограниченных сканирующим окном, из соотношения

$$\sum_{x \in S_d} (g(x) - (af^2(x) + bf(x) + c))^2 \rightarrow \min_{a,b,c}.$$

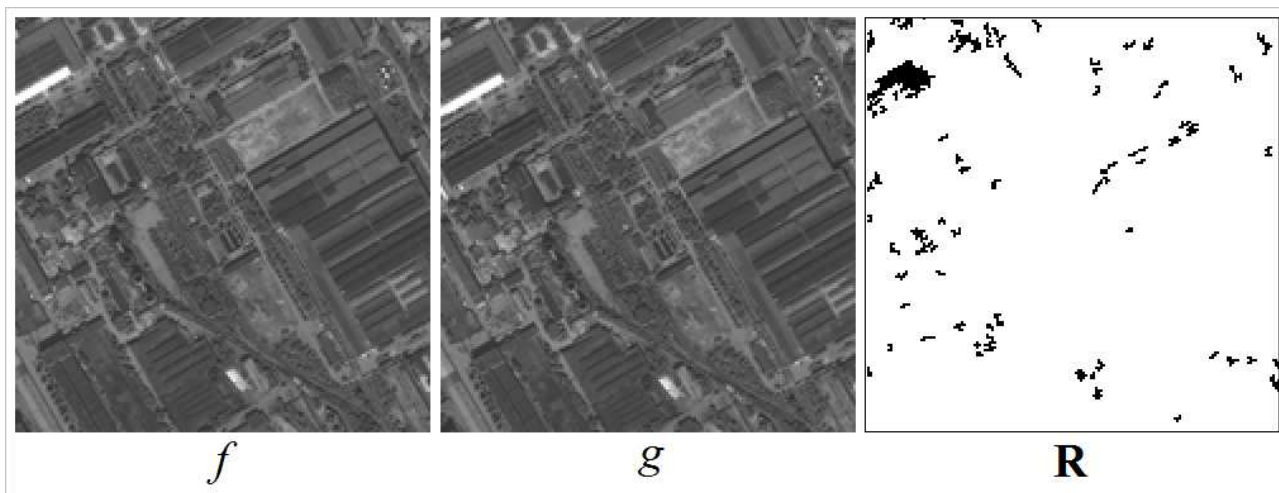
## 2.2 Влияние рассинхронизации изображений на результат работы алгоритмов

Для оценки влияния рассинхронизации входных изображений будет использован подход, аналогичный предложенному в [1]. Для этого будет взят космический снимок земной поверхности (городская застройка), а в качестве второго изображения будет рассмотрена копия первого, сдвинутого на определенную величину по горизонтали и по вертикали. Полученная пара изображений, разумеется, не содержит никаких структурных различий, но из-за отсутствия геометрической выровненности таковыми станут сместившиеся границы объектов и т. д. Следовательно, относительная площадь обнаруженных различий будет эквивалентна вероятности ложной тревоги. На рис. 1 представлены полученные графики зависимости подобной ошибки от величины сдвига изображений относительно друг друга.

Отложенные на горизонтальной оси значения  $sd$  не целые, так как сдвиг осуществляется на целое значение по горизонтали и вертикали, а  $sd$  — это расстояние между пикселями после сдвига. Можно видеть, что наиболее устойчивым к возмущению входных данных оказался алгоритм, основанный на регуляризованном варианте морфологического проектора. Далее идет алгоритм, основанный на морфологическом проекторе, а линейные и квадратичные функции продемонстрировали практически идентичные результаты.



**Рис. 1** Графики зависимости уровня ложной тревоги (false positive, FP) от величины рассинхронизации изображений  $sd$ , изначально не содержащих структурных различий, для различных алгоритмов



**Рис. 2** Исходные изображения  $f$  и  $g$ , не содержащие структурных различий, но сдвинутые относительно друг друга на 3 пикселя по горизонтали и по вертикали, и результат поиска различий для них с помощью алгоритма, основанного на регуляризованном варианте морфологического проектора. Здесь все найденные различия (отмеченные черным цветом) являются ложной тревогой

На рис. 2 представлены сгенерированные снимки, полученные сдвигом исходного изображения на 3 пикселя по горизонтали и по вертикали, и результат поиска структурных различий для них с помощью алгоритма, основанного на регуляризованном варианте морфологического проектора. Полученное результирующее разностное изображение содержит

значительное количество ложных тревог в тех областях, где присутствуют значительные перепады яркости — таких, как границы объектов.

### 3 Поиск структурных различий с устранением рассинхронизации входных изображений

В соответствии с предложенным в [6] определением структура изображения — это набор его множеств уровня, а структурное различие — это набор точек, в которых яркости пары выровненных по яркости изображений существенно различаются. Работа алгоритмов их обнаружения основана на анализе яркостей в сканирующем окне и последующей оценке степени различия для его центральной точки  $x_c$ . Соответственно, при таком подходе к поиску различий на первом изображении можно рассматривать лишь уровень яркости, которому принадлежит центральная точка. Основываясь на этом рассуждении, можно предложить подход, анализирующий на каждом из изображений яркости пикселей сканирующего окна относительно яркости центральной точки  $x_c$ , благодаря чему становится возможным не использовать яркостную коррекцию снимков. Такой алгоритм получил название «степени биективности».

#### 3.1 Анализ «степени биективности» изображений

В основе вычисления «степени биективности» SB лежит следующая идея: при отсутствии структурных различий пиксели на первом изображении близкие по яркости к  $f(x_c)$  (попадающие в некоторую окрестность яркости точки  $x_c$ ), на втором должны оказаться близки по яркости к  $g(x_c)$ . Необходимость задания окрестности связана с задачей подавления шума на изображениях. Формально это можно определить с помощью понятия штрафа. Для этого задаются два радиуса окрестностей —  $\delta$  для первого и  $\varepsilon$  для второго изображения. Пиксели, яркость которых лежит за пределами  $\delta$ -окрестности яркости центральной точки  $x_c$  первого изображения, а на втором изображении попадают в  $\varepsilon$ -окрестность яркости центральной точки, штрафуются на величину  $\alpha$ , и аналогично, пиксели, яркость которых лежит в  $\delta$ -окрестности яркости центральной точки  $x_c$  первого изображения, а на втором изображении не попадает в  $\varepsilon$ -окрестность яркости центральной точки, штрафуются на величину  $\beta$  (рис. 3). Итоговая оценка в данной точке — «степень биективности» — есть сумма штрафов для всех пикселей локального окна.

Дадим более строгое определение «степени биективности». Пусть уровни яркости фрагментов изображений  $f$  и  $g$  относительно центральной точки  $x_c$  определяются соотношениями:

$$L_f^0(x_c) = \{x \in S_d \mid |f(x) - f(x_c)| < \delta\};$$

$$L_g^0(x_c) = \{x \in S_d \mid |g(x) - g(x_c)| < \varepsilon\},$$

где  $S_d$  — множество пикселей сканирующего окна. Зададим функцию штрафа  $h: S_d \rightarrow \mathbb{R}$ . В частном случае каждая оказавшаяся за пределами заданной окрестности точка штрафуются на 1, но можно использовать и другие весовые функции, например функцию Гаусса, убывающую к границе окна. Тогда «степень биективности» вычисляется по формуле:

$$SB(x_c) = \sum_{x \in L^0} h(x),$$

где  $L^0$  — симметрическая разность двух множеств:  $L^0 = L_f^0(x_c) \Delta L_g^0(x_c)$ .

Преимущества данного метода проявляются в следующих случаях.

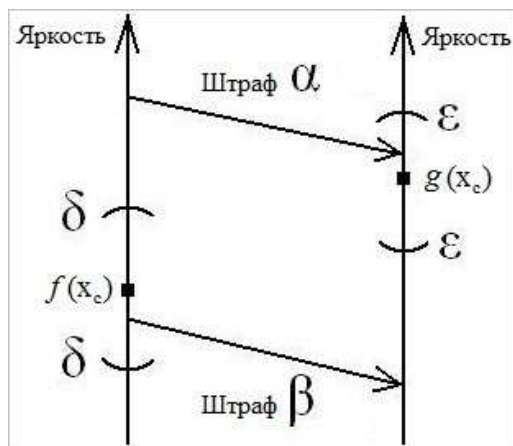


Рис. 3 Принцип вычисления «степени биективности» для двух изображений

- (1) Поиск структурных различий, размеры которых составляют несколько пикселей. При анализе космосъемки такие выбросы почти наверняка являются шумом, и все вышеперечисленные алгоритмы будут стремиться их подавить. Однако возможно появление практической задачи, где ключевую роль будут играть именно такие незначительные по площади различия, и вычисление «степени биективности» позволит их точно локализовать.
- (2) Локальная геометрическая коррекция исходных снимков, которая будет рассмотрена в следующем пункте.

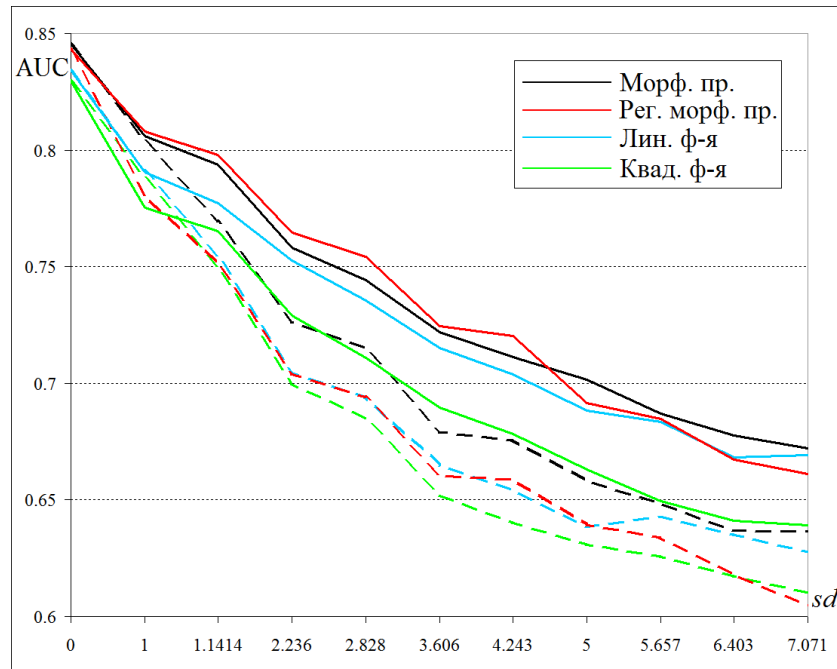
### 3.2 Алгоритм поиска структурных различий с локальной геометрической коррекцией

Предлагается следующая стратегия использования «степени биективности»: алгоритмы работают со сканирующим окном, размеры которого относительно невелики, и можно считать, что присутствующие искажения значительно проявляются на размерах больше, чем величина стороны локального окна  $d$ , и, следовательно, в пределах выбранной окрестности локальные сдвиги пикселей являются параллельными. Тогда, прежде чем строить функции преобразования яркости, можно вычислить «степень биективности» для текущего положения окна и для всех окон со сдвигом по небольшой окрестности.

Таким образом, первый пункт приведенного выше алгоритма поиска структурных различий будет выглядеть следующим образом: исходные изображения сканируются с шагом 1 локальным окном заданного размера  $d \times d$ . Для каждого положения окна перебираются все возможные сдвиги из отрезка  $[-sd, sd]$  по каждой координате (отдельно), т. е. перебираются все возможные положения окна из квадрата от  $(-sd, -sd)$  до  $(sd, sd)$ , и вычисляется величина «степени биективности»  $SB$ . Среди полученных значений выбирается наименьшее, и для соответствующего ему положению окна строятся функции преобразования яркости и разностные изображения. При этом результат обработки записывается по-прежнему в центр окна в исходном положении.

### 3.3 Результаты работы алгоритмов с локальной геометрической коррекцией

Как и в первой части статьи, возьмем два геометрически выровненных космоснимка городской застройки и добавим в них локальный сдвиг, после чего применим к полученным изображениям описанные выше алгоритмы поиска структурных различий — без использования «степени биективности» и с ней. Полученные результаты сравним с ручной



**Рис. 4** Графики зависимости AUC(sd) для различных алгоритмов поиска структурных различий изображений без геометрической коррекции (пунктирные линии) и с ее использованием (сплошные линии). Размер сканирующего окна для всех алгоритмов  $d = 21$

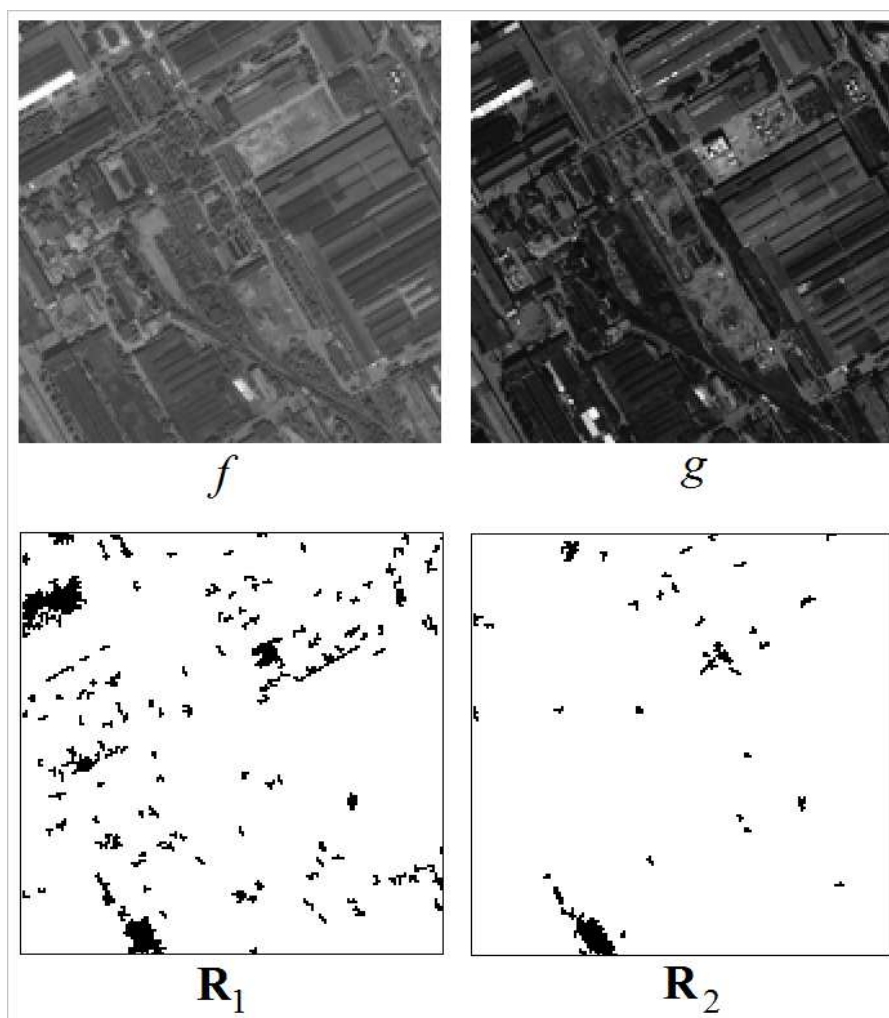
разметкой; критерием качества работы станет анализ ROC-кривых [7] (ROC — Receiver Operating Characteristic, операционная характеристика приемника). Количественную интерпретацию ROC-кривой дает показатель AUC (*Area Under the Curve* — площадь под ROC-кривой) — площадь, ограниченная ROC-кривой и осью доли ложных положительных классификаций. Чем выше показатель AUC, тем качественнее классификатор, при этом значение 0,5 соответствует случайному решению.

На рис. 4 изображены графики зависимости значения AUC от величины сдвига для алгоритмов без геометрической коррекции (пунктирные линии) и с ее использованием (сплошные линии). Во всех случаях применение «степени биективности» позволило повысить качество работы.

На рис. 5 представлено сравнение результатов работы алгоритма поиска структурных различий изображений на основе регуляризованного варианта морфологического проектора при отсутствии локальной геометрической коррекции и в ее присутствии для изображений, представляющих собой реальные снимки городской застройки, в которые была внесена погрешность их привязки друг к другу.

Параметры выбраны следующим образом: функция штрафа  $h(\cdot) \equiv 1$ ,  $\delta = 30$  и  $\varepsilon = 30$  (диапазон возможных яркостей — от 0 до 255). Сдвиг изображений был сделан вручную на три пикселя вправо и три пикселя вниз; его можно оценить по смещению ярко-белого дома в левом верхнем углу снимков. Можно видеть, что без применения геометрической коррекции алгоритм нашел очень много лишних объектов — по сути, структурным различием стал любой значительный перепад яркости на снимках. В то же время тот же алгоритм, использующий вычисление «степени биективности» для геометрического сопоставления локальных окон, обнаружил только структурные различия. Таким образом, можно говорить о применимости предложенного метода для практического применения.





**Рис. 5** Сравнение результатов работы алгоритма поиска структурных различий изображений  $f$  и  $g$  на основе регуляризованного варианта морфологического проектора при отсутствии локальной геометрической коррекции ( $R_1$ ) и в ее присутствии ( $R_2$ ). Размер сканирующего окна  $d = 21$ , порог  $T = 25$

## 4 Заключение

Алгоритмы поиска структурных различий изображений, как и любые другие методы анализа изображений, очень чувствительны к качеству входных данных. При этом геометрическая выровненность изображений играет ключевую роль, ведь смещение объекта даже на один пиксель порождает сложное структурное различие. В данной работе приведены результаты оценки устойчивости алгоритмов к подобным возмущениям — разумеется, качество работы падает весьма ощутимо — и описывается метод, называемый анализом «степени биективности», чье использование в алгоритмах поиска различий позволяет значительно уменьшить количество возникающих ошибок.

## Литература

- [1] Townshend J. R. G., Justice C. O., Gurney C. The impact of misregistration on change detection // IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 1992. Vol. 30. Iss. 5. P. 1054–1060.

- [2] *Dai X., Khorram S.* Quantification of the impact of misregistration on the accuracy of remotely sensed change detection // *IEEE Geoscience and Remote Sensing (IGARSS 1997)*, 1997. Vol. 4. P. 1763–1765.
- [3] *Корнилов Ф. А., Перевалов Д. С.* Задача обнаружения структурных различий изображений // *Алгоритмы и програм. средства парал. вычислений.* — Екатеринбург: УрО РАН, 2011. Вып. 11. С. 37–56.
- [4] *Пытьев Ю. П., Чуличков А. И.* Методы морфологического анализа изображений. — М.: Физ-МатЛит, 2010. 336 с.
- [5] *Tomasi C., Manduchi R.* Bilateral filtering for gray and color images // *6th Conference (International) on Computer Vision Proceedings.* Bombay, India: IEEE, 1998. P. 839–846.
- [6] *Корнилов Ф. А.* Исследование алгоритма поиска структурных различий изображений // *Тр. Ин-та математики и механики УрО РАН.* — Екатеринбург: ИММ УрО РАН, 2013. Т. 19. № 1. С. 144–159.
- [7] *Green D. M., Swets J. M.* Signal detection theory and psychophysics. — New York, NY, USA: John Wiley and Sons Ltd., 1966. 455 p.

*Поступила в редакцию 15.06.2015*

## References

- [1] Townshend, J. R. G., C. O. Justice, and C. Gurney. 1992. The impact of misregistration on change detection. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing* 30(5):1054–1060.
- [2] Dai, X., and S. Khorram. 1997. Quantification of the impact of misregistration on the accuracy of remotely sensed change detection. *IEEE Geoscience and Remote Sensing (IGARSS 1997)*. 4:1763–1765.
- [3] Kornilov, F. A., and D. S. Perevalov. 2011. The problem of detecting structural differences on the images. *Algorithms and software for parallel computing.* Ekaterinburg: IMM UB RAS. 11:37–56.
- [4] Pitev, Y. P., and A. I. Chulichkov. 2010. *The methods of morphological analysis of images.* Moscow: FizMatLit. 336 p.
- [5] Tomasi, C., and R. Manduchi. 1998. Bilateral filtering for gray and color images. *6th International Conference on Computer Vision Proceedings.* Bombay, India: IEEE. 839–846.
- [6] Kornilov, F. A. 2013. Study algorithm detection structural differences on the images. *Trudy Instituta Matematiki i Mekhaniki UrO RAN.* Ekaterinburg: IMM UB RAS. 19(1):144–159.
- [7] Green, D. M., and J. M. Swets. 1966. *Signal detection theory and psychophysics.* New York, NY: John Wiley and Sons Ltd., 1966. 455 p.

*Received June 15, 2015*