

Применение морфологического проектора и суперпиксельной сегментации в задаче обнаружения структурных изменений на изображениях ДЗЗ

А.Ю. Денисова¹, А.А. Егорова¹, В.В. Сергеев^{1,2}

¹Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, Московское шоссе 34А, Самара, Россия, 443086

²Институт систем обработки изображений РАН - филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Молодогвардейская 151, Самара, Россия, 443001

Аннотация. Обнаружение структурных изменений на изображениях является одной из распространенных задач тематического анализа данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Эффективным методом ее решения является использование морфологического проектора Пытьева для анализа пары разновременных изображений. Достоинством данного способа является инвариантность к глобальным линейным преобразованиям яркости изображений, которые в случае изображений ДЗЗ соответствуют различным параметрам атмосферы и значениям соотношения яркости и контраста сцены. Однако классические варианты реализации проектора Пытьева и его регуляризованные версии работают с уровнями яркости изображения без принятия во внимание пространственной связности, что не дает учесть локальные текстурные особенности изображений. Для решения данной проблемы в настоящей статье предлагается вариант реализации алгоритма обнаружения структурных изменений на основе совместного использования суперпиксельной сегментации и морфологического проектора, учитывающий свойства локальности. В статье приводятся результаты экспериментальных исследований предложенного алгоритма обнаружения изменений и алгоритма на основе морфологического проектора Пытьева для серии синтезированных и реальных изображений ДЗЗ при различных уровнях отношения сигнал/шум и виньетировании входных изображений.

1. Введение

Задача обнаружения структурных изменений является широко распространенной в обработке изображений и заключается в анализе пары разновременных изображений одной и той же сцены с целью обнаружения изменений формы и положения объектов сцены, а также их появления или исчезновения. Иными словами, под структурным изменением понимаются изменения геометрических свойств сцены, которые не моделируются аддитивными шумами и глобальными преобразованиями яркости [1]. Результатом обнаружения изменений может являться изображение с оценкой возможности наличия изменений в каждой точке [2] или бинарное изображение меток областей изменений [3]. С точки зрения изображений дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), структурные изменения связаны с изменениями ландшафта в результате антропогенной деятельности, а также климатических и экологических

процессов, что делает данную задачу весьма актуальной для приложений комплексного анализа территории.

Существует большое количество подходов к обнаружению изменений на изображениях ДЗЗ [4-12]. К числу искажений, для которых желательно обеспечить инвариантность алгоритма обнаружения изменений, относятся различного рода глобальные преобразования яркости изображения и аддитивные шумы. Поэтому большой интерес представляет разработка алгоритмов обнаружения изменений на основе морфологии Ю.П. Пытьева [13], которая обеспечивает математическую формализацию для сравнения изображений по форме. Современные исследования [1, 5, 14, 15] показали, что основными проблемами существующих методов обнаружения структурных изменений на основе морфологии Пытьева являются: снижение производительности при глобальных нелинейных преобразованиях яркости изображений и высоком уровне аддитивных шумов, а также сложность автоматической оценки оптимального порога обнаружения изменений. Причина описанных проблем видится в отсутствии учета пространственных взаимосвязей яркости пикселей на изображениях в структуре классического морфологического проектора Пытьева.

В настоящей работе для преодоления описанных ограничений предлагается совместно использовать морфологический проектор Пытьева и суперпиксельную сегментацию изображения, а также предлагается эффективный алгоритм выбора порогового значения для обнаружения изменений. Экспериментальное сравнение результатов обнаружения изменений с помощью классического алгоритма на основе морфологического проектора Пытьева и алгоритма с использованием суперпиксельной сегментации показало, что суперпиксельная сегментация позволяет снизить ошибку ложного обнаружения изменений для нелинейного глобального преобразования яркости типа виньетирования, а также повышает устойчивость определения изменений к шумовым искажениям на исходных изображениях.

Дальнейшее изложение статьи включает описания алгоритмов обнаружения изменений с использованием классического и модифицированного с использованием суперпиксельной сегментации морфологического проектора Пытьева, а также экспериментальные исследования модифицированного и классического алгоритма на модельных и реальных изображениях.

2. Классический алгоритм обнаружения изменений с помощью морфологического проектора Пытьева

Пусть имеется некоторое изображение f , определенное на множестве пикселей $X \subset R^2$, и яркость изображения $f(x)$ является функцией $f: X \rightarrow R$ координат точек изображения $x \in X$. Классический алгоритм обнаружения структурных изменений, основанный на применении морфологического проектора Пытьева [16], принимает в качестве входных данных пару одновременных изображений f и g одинакового размера $N \times M$ и формирует на выходе изображение изменений R_T , значение каждого пикселя которого равно 1, если изменение в пикселе было обнаружено, и 0, если изменения в нём нет.

Кратко данный алгоритм может быть описан следующей последовательностью шагов [16].

1. Построение проекций $P_f g$ изображения g на форму изображения f по формуле (1) и построение аналогичным образом проекции $P_g f$ изображения f на форму изображения g .

$$P_f g = \sum_i \frac{\sum_{x' \in X} g(x') \chi_i^f(x')}{\sum_{x' \in X} \chi_i^f(x')} \chi_i^f(x) \quad (1)$$

где $\chi_i^f(x)$ – индикаторная функция множества пикселей со значениями яркости $f(x) = i$, т.е.:

$$\chi_i^f(x) = \begin{cases} 1, & \text{если } f(x) = i \\ 0, & \text{иначе} \end{cases} \quad (2)$$

2. Построение разностных изображений $R_{fg} = |P_f g - g|$ и $R_{gf} = |P_g f - f|$.
3. Построение единого разностного изображения $R = \max(R_{fg}, R_{gf})$.
4. Пороговая обработка изображения R с порогом T для получения результирующего изображения изменений R_T :

$$R_T = \begin{cases} 1, & R \geq T \\ 0, & \text{иначе} \end{cases} \quad (3)$$

Таким образом, классический алгоритм обнаружения изменений с использованием морфологического проектора Пытьева, рассматривает в качестве структуры изображения области с одинаковой яркостью и обнаруживает изменения там, где уровень яркости одного из изображений распадается на несколько уровней яркости во втором изображении.

3. Алгоритм обнаружения изменений с помощью суперпиксельной сегментации и морфологического проектора Пытьева

В выражении морфологического проектора Пытьева (1) характеристические функции $\chi_i^f(x)$ подмножеств пикселей с одинаковой яркостью $f(x)=i$ определяют структуру изображения. Однако, при таком способе задания структуры пространственные взаимосвязи яркостей для объектов на изображении не могут быть учтены.

В настоящей статье, для учета локальных пространственных корреляционных взаимосвязей пикселей изображения предлагается использовать суперпиксельное представление изображения для описания его структуры.

Будем называть суперпикселем пространственно связанное множество пикселей изображения S_j ($j=1, \dots, N$ – номер суперпикселя) однородное в смысле яркости, то есть такое, что яркости любой пары пикселей x_1 и x_2 , входящих в состав суперпикселя S_j , отличаются не более чем на 2ε , т.е. выполняется условие:

$$|f(x_2) - f(x_1)| \leq 2\varepsilon \quad (4)$$

Определим структуру изображения как множество характеристических функций $\chi_i^f(x)$, заданных на множестве всех суперпикселей $S = \{S_j\}_{j=1, \dots, N}$ изображения, то есть:

$$\chi_{S_j}^f(x) = \begin{cases} 1, & \text{если } x \in S_j \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}, \quad \forall i \neq j, S_j \cap S_i = \emptyset, \bigcup_j S_j = X \quad (5)$$

Тогда для обнаружения изменений можно использовать следующий модифицированный проектор Пытьева:

$$\hat{P}_f g = \sum_{S_j \in S} \frac{\sum_{x' \in X} g(x') \chi_{S_j}^f(x')}{\sum_{x' \in S_j} \chi_{S_j}^f(x')} \chi_{S_j}^f(x) \quad (6)$$

Морфологический проектор $\hat{P}_f g$, рассчитываемый по формуле (6), представляет собой усреднение яркостей изображения g в границах однородных по яркости и пространственно связанных участков изображения f . Вычисление проектора $\hat{P}_g f$ производится аналогичным образом и представляет собой усреднение яркостей изображения f в границах однородных по яркости и пространственно связанных участков изображения g .

Предлагаемый алгоритм обнаружения изменений на паре изображений g и f может быть описан следующей последовательностью шагов.

1. Суперпиксельная сегментация разновременных изображений f и g .

2. Построение проекций $\hat{P}_f g$ и $\hat{P}_g f$.
3. Построение разностных изображений $R_{fg} = |\hat{P}_f g - \hat{P}_g g|$ и $R_{gf} = |\hat{P}_g f - \hat{P}_f f|$.
4. Формирование единого разностного изображения $R = \max(R_{fg}, R_{gf})$.
5. Оценка порогового значения для обнаружения изменений T .
6. Пороговая обработка изображения R с порогом T для получения результирующего изображения изменений R_T по формуле (3).

В результате работы алгоритма формируется изображение изменений, полученное с учетом пространственной корреляции пикселей изображения.

Суперпиксельная сегментация, как и оценка порогового значения обнаружения изменений, могут выполняться различными способами. В настоящей работе для получения суперпикселей был использован алгоритм сегментации по порогу, описанный в [17], преимуществом которого является простота и эффективность реализации.

4. Алгоритм оценки порога обнаруженных изменений

В ходе исследований было выявлено, что для автоматического определения значения порога T на шаге 5 классические алгоритмы оценки порога, такие как, например, метод Отсу [18], квантили гистограммы, кластеризация на два класса [19] не являются эффективными, так как гистограмма разностного изображения R не является бимодальной. По этой причине был разработан собственный алгоритм оценки порога обнаружения изменений T , детально описанный ниже.

1. Для множеств суперпикселей каждого из исходных изображений g и f независимо друг от друга строятся множества граничных пикселей суперпикселей $\bar{X}_f \subset X$ ($\bar{X}_g \subset X$) такие, что для каждого из пикселей $x \in \bar{X}_f$ ($x \in \bar{X}_g$), хотя бы один из соседних пикселей принадлежит другому суперпикселю. Результирующее множество граничных пикселей формируется в результате объединения множеств граничных пикселей каждого из изображений: $\bar{X} = \bar{X}_f \cup \bar{X}_g$.

Такой отбор пикселей обусловлен тем, что изменения на изображении наиболее вероятно отражаются на границах суперпикселей обоих изображений, поэтому с целью уменьшения влияния неизменных пикселей на результат, не имеет смысла рассматривать внутренние области суперпикселей каждого из изображений.

2. Для множества граничных пикселей \bar{X} выполняется кластеризация соответствующих значений разностного изображения R на три кластера: Ω_1 – точки, не содержащие изменений, Ω_2 – сомнительные точки, Ω_3 – точки, содержащие изменения. В результате для любых пикселей $x \in \Omega_1$, $y \in \Omega_2$, $z \in \Omega_3$ значения R удовлетворяют неравенству: $R(x) < R(y) < R(z)$, т.е. деление на кластеры определяет разделение возможных значений разностного изображения $[R_{\min}, R_{\max}]$ на три интервала: $[R_{\min}, r_1]$, $[r_1, r_2]$ и $(r_2, R_{\max}]$, где $r_1 = \max_{x \in \Omega_1} R(x)$, а $r_2 = \max_{x \in \Omega_2} R(x)$.

3. Для среднего кластера, элементы которого принимают значения из отрезка $[r_1, r_2]$, рассчитывается гистограмма значений разностного изображения $H(r) = v$, где v – количество граничных пикселей, для которых $R(x) = r$.

4. Порог T определяется как первый локальный минимум гистограммы $H(r)$ по r : $T = \min_r \{r = r_1 + 1, \dots, r_2 - 1 : H(r) < H(r-1) \wedge H(r) < H(r+1)\}$, или как $T = r_2$, если значения гистограммы $H(r)$ являются монотонной функцией на отрезке $[r_1, r_2]$.

В работе [20] было показано, что распределение значений разностного изображения можно описать смесью распределений Райса и Рэля, причем распределение Рэля соответствует разностям пикселей изображения без изменений. Для распределения Рэля участок плотности вероятностей после моды является монотонно убывающим. Для распределения Райса,

наоборот, участок плотности вероятности после моды не является монотонно убывающим, поскольку плотность распределения Райса является произведением унимодальной функции на смещенную функцию Бесселя первого рода нулевого порядка, а функция Бесселя не является монотонно убывающей и имеет локальные максимумы и минимумы. Таким образом, суммарное распределение должно иметь первый локальный минимум в точке пересечения графиков распределений, что и соответствует точке оптимального выбора порога.

Поскольку на практике гистограмма изображения является лишь оценкой аналитической плотности распределения и может содержать лишние локальные минимумы, то для выделения интервала потенциального месторасположения порога и было предложено применить кластеризацию значений R на три кластера: точки без изменений, точки с изменениями и сомнительные точки.

Таким образом, порог выбирается в области точек, классифицируемых как сомнительные, с учетом предполагаемого характера распределения значений разностного изображения для точек без изменений и точек с изменениями.

5. Критерии качества обнаружения структурных изменений на разновременных изображениях

Качество обнаружения изменений определялось при помощи показателя R_{TP} (true positive rate), характеризующего долю верно обнаруженных пикселей, содержащих структурные изменения, по формуле (7), и R_{FP} (false positive rate), характеризующего долю ложных обнаружений изменений, по формуле (8) [21].

$$R_{TP} = \frac{N_{m_{R_2}}}{N_{R_2}}, \quad (7)$$

где R_2 – область изображения, содержащая структурные изменения; N_{R_2} – общее количество пикселей в области R_2 ; $N_{m_{R_2}}$ – количество верно обнаруженных пикселей, содержащих структурные изменения, в области R_2 .

$$R_{FP} = \frac{N_{m_{R_1}}}{N_{R_1}}, \quad (8)$$

где R_1 – область изображения, не содержащая структурных изменений; N_{R_1} – общее количество пикселей в области R_1 ; $N_{m_{R_1}}$ – количество ложно обнаруженных пикселей, не содержащих структурные изменения, в области R_1 .

Далее показатели R_{TP} и R_{FP} применяются для оценки качества обнаружения пикселей, содержащих структурные изменения, по паре разновременных изображений.

6. Экспериментальное исследование

В ходе выполнения экспериментальной части работы были реализованы два алгоритма обнаружения структурных изменений изображений: классический проектор Пытьева и предложенный метод, основанный на совместном использовании проектора Пытьева и суперпиксельной сегментации изображений.

В качестве входных данных выступали пары разновременных изображений двух видов: искусственно сгенерированные и реальные снимки ДЗЗ.

Для оценки качества обнаружения структурных изменений рассчитывались меры R_{TP} и R_{FP} .

В первую очередь были проведены эксперименты над искусственно сгенерированными изображениями, которые содержали фон-константу и объекты-константы. Пример пары смоделированных разновременных изображений и масок изменений представлен на рисунке 1.

Маски структурных изменений 1(в), 1(г) и все последующие для удобства восприятия были инвертированы: области белого цвета соответствуют неизменным областям изображения, области черного цвета – измененным.

Стоит отметить, что маски 1(в) и 1(г) совпадают не полностью, поскольку не все внесенные изменения являются структурными.

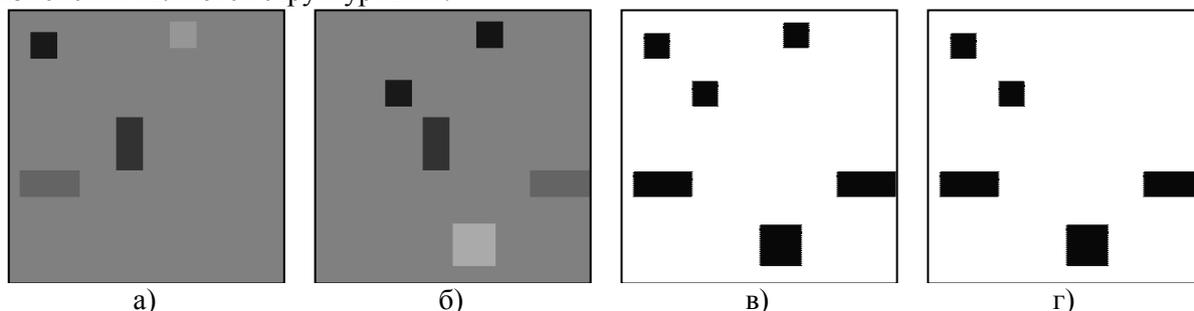


Рисунок 1. Пример смоделированной пары одновременных изображений: (а) смоделированное изображение до внесения в него изменений, (б) смоделированное изображение после внесения в него изменений, (в) маска всех изменений, (г) маска структурных изменений.

Результаты обнаружения структурных изменений на смоделированной паре изображений при помощи проектора Пытьева и предложенного метода представлены на рисунке 2.

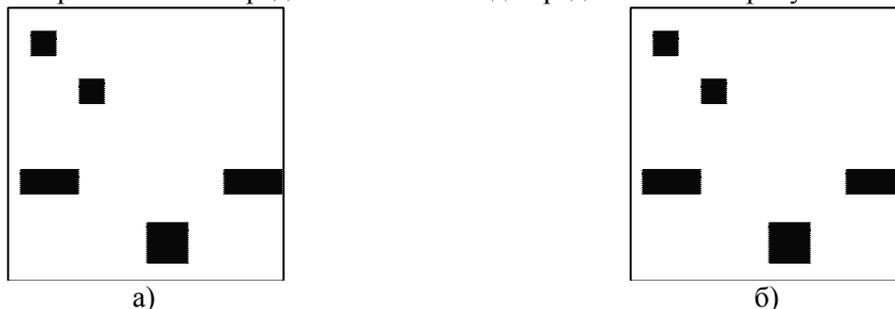


Рисунок 2. Результат обнаружения структурных изменений: (а) проектор Пытьева, (б) предложенный метод.

Как видно из рисунка 2, результат обнаружения структурных изменений при помощи каждого из рассмотренных методов полностью совпал с маской структурных изменений, представленной на рисунке 1(г), таким образом, значения показателей качества обнаружения обоих методов для пары смоделированных изображений составили: $R_{TP} = 1$, $R_{FP} = 0$.

Далее в рамках исследований была проверена устойчивость методов к следующим искажениям яркости: аддитивному белому гауссовскому шуму и виньетированию.

На рисунках 3 и 4 представлены результаты обнаружения структурных изменений на паре изображений 1(а)-1(б) классическим проектором Пытьева и предложенным методом, соответственно, после добавления к исходным изображениям аддитивного гауссовского белого шума при различных значениях отношения сигнал/шум (SNR (дБ)): 35, 30, 25, 20. В таблицах 1 и 2 показана зависимость показателей качества от значения отношения сигнал/шум ($R_{TP}(SNR)$ и $R_{FP}(SNR)$) для проектора Пытьева и предложенного метода соответственно.

Результаты проведенного исследования показали, что предложенный метод обладает устойчивостью к аддитивному белому гауссовскому шуму при значениях $SNR = 30$ дБ и выше. При значении $SNR = 20$ дБ качество обнаружения предложенным методом структурных изменений также велико: $R_{TP} = 0,958$, а $R_{FP} = 0,018$. Классический проектор Пытьева также обладает устойчивостью к аддитивному белому гауссовскому шуму, но при $SNR = 35$ дБ и выше. При меньших значениях отношения сигнал/шум, количество ложных обнаружений

методом Пытьева, как и в предложенном методе, практически не изменяется, однако, количество правильно обнаруженных структурных изменений резко уменьшается и при $SNR = 20$ составляет $R_{TP} = 0,420$.

Таким образом, результаты исследования устойчивости методов к аддитивному белому гауссовскому шуму, показали, что предложенный метод обладает преимуществом перед классической реализацией проектора Пытьева, поскольку не теряет своей способности к обнаружению структурных изменений на изображениях даже при таком низком значении отношения сигнал/шум, как $SNR = 20$ дБ.

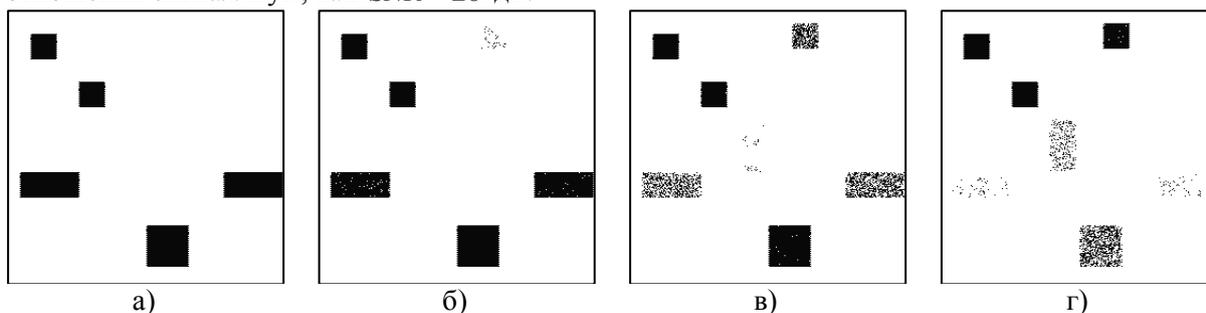


Рисунок 3. Результат обнаружения структурных изменений при помощи классического проектора Пытьева на смоделированной паре разновременных изображений, содержащих аддитивный белый гауссовский шум с различными значениями SNR : (а) $SNR = 35$, (б) $SNR = 30$, (в) $SNR = 25$, (г) $SNR = 20$.

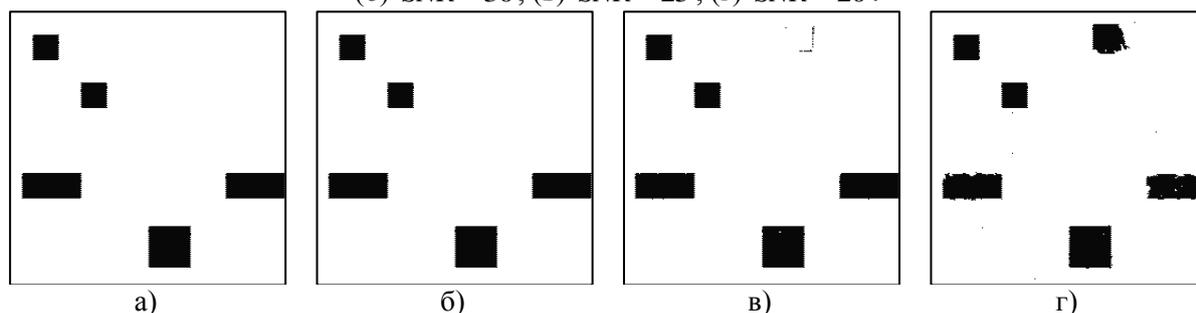


Рисунок 4. Результат обнаружения структурных изменений при помощи предложенного алгоритма на смоделированной паре разновременных изображений, одно из которых содержит аддитивный белый гауссовский шум с различными значениями SNR : а) $SNR = 35$, б) $SNR = 30$, в) $SNR = 25$, г) $SNR = 20$.

Таблица 1. Зависимость значений показателей качества от SNR для классического проектора

	$SNR = 35$	Пытьева. $SNR = 30$	$SNR = 25$	$SNR = 20$
R_{TP}	1,000	0,990	0,752	0,420
R_{FP}	0	0,002	0,013	0,018

Таблица 2. Зависимость значений метрик качества от SNR для предложенного метода.

	$SNR = 35$	$SNR = 30$	$SNR = 25$	$SNR = 20$
R_{TP}	1,000	1,000	0,998	0,958
R_{FP}	0	0	0,002	0,018

Далее приводятся результаты исследования влияния на работу методов нелинейного искажения яркости типа «виньетирование».

Виньетирование – это искажение, снижающее яркость изображения ближе к краям кадра. Искажение моделировалось путем домножения изображения с изменениями 1(б) на гауссову весовую функцию со значениями от 0 до 1 с максимумом в центре изображения.

Вид изображения 1(б) после виньетирования и результаты обнаружения структурных изменений сравниваемыми методами показаны на рисунке 5.

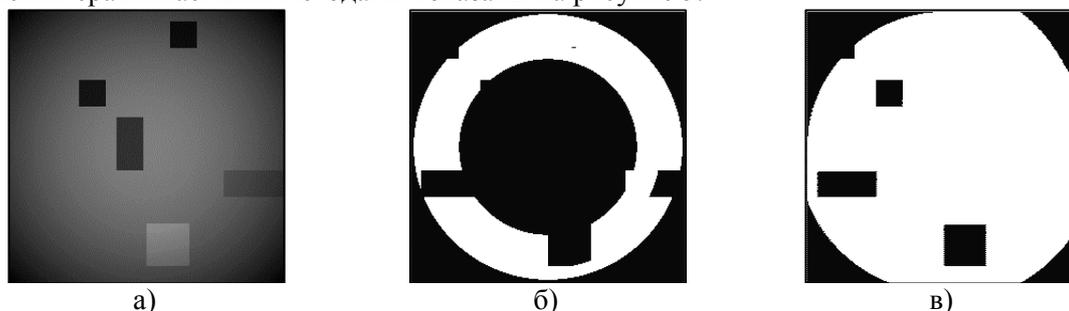


Рисунок 5. Результаты исследования влияния виньетирования на работу методов: а) вид изображения, содержащего изменения, после виньетирования, (б) результат обнаружения структурных изменений проектором Пытьева, (в) результат обнаружения структурных изменений предложенным методом.

Из рисунка 5(б) видно, что виньетирование оказывает сильное влияние на качество обнаружения структурных изменений методом Пытьева, значения показателей качества для которого составили: $R_{TP} = 0,874$, а $R_{FP} = 0,601$. Эффективность обнаружения предложенным методом также снижается, что можно увидеть из рисунка 1(в), однако, в отличие от проектора Пытьева значения показателей качества равны: $R_{TP} = 0,753$, а $R_{FP} = 0,149$, что представляет удовлетворительное качество обнаружения.

Аналогичные исследования были проведены над реальными снимками ДЗЗ. Для того, чтобы можно было рассчитать значения R_{TP} и R_{FP} , в снимок ДЗЗ встраивались области для формирования второго изображения. Пример представлен на рисунке 6.

Результат обнаружения структурных изменений для пары таких изображений представлен на рисунке 7.

Как видно из рисунка 7, оба метода обеспечивают высокое качество обнаружения. Проектор Пытьева обнаруживает изменения, четко сохраняя их форму, в отличие от предложенного метода, что обусловлено использованием им разметки на сегменты неправильной формы. Однако, классический метод обладает существенным минусом, поскольку обеспечивает значительно больше ложных обнаружений, которые могут быть распределены по всему изображению и сильно зависят от его содержимого. Стоит также отметить, что ложные обнаружения, возникающие в результате работы предложенного метода, сосредоточены преимущественно у границ структурных изменений, а не распределены по всему изображению, что также является преимуществом.

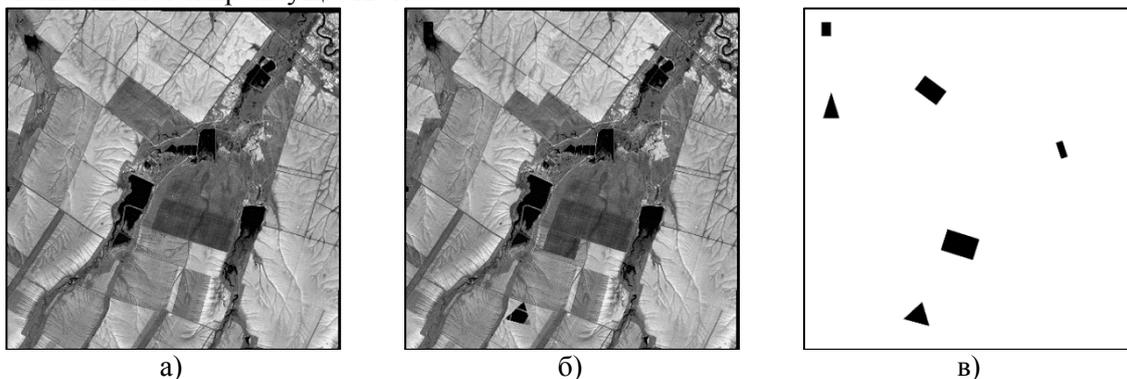


Рисунок 6. Исходные данные, полученные при помощи ДЗЗ: а) исходное изображение, (б) изображение после внесения структурных изменений, (в) маска структурных изменений.

7. Заключение

В настоящей работе предложен метод обнаружения структурных изменений на паре разновременных изображений ДЗЗ, основанный на совместном использовании суперпиксельной сегментации и проектора Пытьева, приведено сравнение его работоспособности с работоспособностью классической реализации, представлен алгоритм выбора оптимального порога по гистограмме разностного изображения.

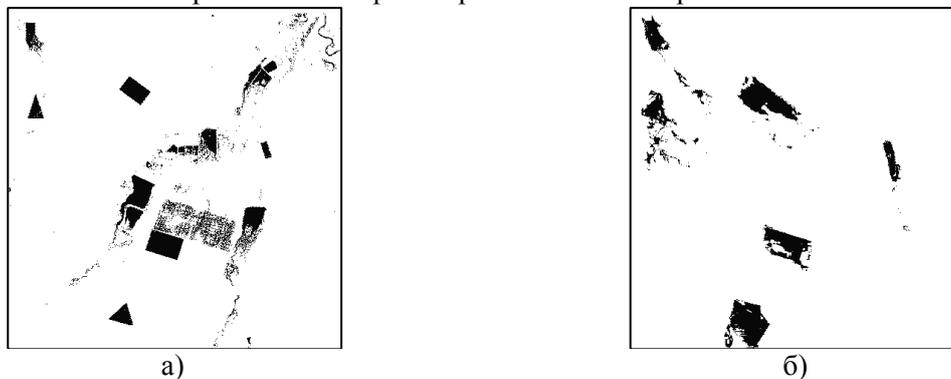


Рисунок 7. Результат обнаружения структурных изменений на паре разновременных снимков ДЗЗ: а) проектор Пытьева, б) предложенный метод.

В ходе проведенных исследований было установлено, что предложенный алгоритм позволяет эффективно обнаруживать структурные изменения на паре разновременных изображений и обладает преимуществами перед классической реализацией.

Существенным преимуществом предложенного метода над классической реализацией является устойчивость к шуму. Даже при таком низком значении отношения сигнал/шум, как $SNR = 20$ дБ, значения показателей качества для предложенного метода составили $R_{TP} = 0,958$ и $R_{FP} = 0,018$, в то время как доля правильных обнаружений для классической реализации при таком значении SNR составила $R_{TP} = 0,420$.

Другим преимуществом предложенного алгоритма является сохранение его производительности при нелинейных искажениях яркости изображения, содержащего изменения, к которым классическая реализация является неустойчивой, что было проверено на примере виньетирования. В то же время предложенный метод хоть и снижает свою производительность на сильно затемненных краях изображения, но в целом обеспечивает удовлетворительное качество обнаружения, определяя структурные изменения на остальной части изображения без ошибок.

К недостатку предлагаемого метода можно отнести тот факт, что не всегда обнаруженные структурные изменения имеют четкие границы, поскольку одним из этапов работы метода является разделение изображения на сегменты неправильной формы.

8. Литература

- [1] Кандоба, И.Н. Оперативный мониторинг структурных изменений изображений объектов на космических снимках земной поверхности / И.Н. Кандоба, Е.А. Бровко, Ф.А. Корнилов, Д.С. Перевалов // Программные продукты и системы. – 2015. – Т. 1, № 109. – С. 79-86.
- [2] Wang, B. Image fusion-based land cover change detection using multi-temporal high-resolution satellite images / B. Wang, J. Choi, S. Choi, S. Lee, P. Wu, Y. Gao // Remote Sensing. – 2017. – Vol. 9(8). – P. 804.
- [3] Gu, W. Change detection method for remote sensing images based on an improved Markov random field / W. Gu, Z. Lv, M. Hao // Multimedia Tools and Applications. – 2017. – Vol. 76(17). – P. 17719-17734.

- [4] Zhu, Z. Change detection using landsat time series: A review of frequencies, preprocessing, algorithms, and applications / Z. Zhu // *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. – 2017. – Vol. 130. – P. 370-384.
- [5] Корнилов, Ф.А. Поиск структурных различий изображений: алгоритмы и методы исследования / Ф.А. Корнилов // *Машинное обучение и анализ данных*. – 2014. – Т. 1, № 7. – С. 902-919.
- [6] Benedek, C. Change Detection in Optical Aerial Images by a Multi-Layer Conditional Mixed Markov Model / C. Benedek, T. Szirányi // *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*. – 2009. – Vol. 47(10). – P. 3416-3430.
- [7] Hussain, M. Change detection from remotely sensed images: From pixel-based to object-based approaches / M. Hussain, D. Chen, A. Cheng, H. Wei, D. Stanley // *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. – 2013. – Vol. 80. – P. 91-106.
- [8] Tewkesbury, A.P. A critical synthesis of remotely sensed optical image change detection techniques / A.P. Tewkesbury, A.J. Comber, N.J. Tate, A. Lamb, P.F. Fisher // *Remote Sensing of Environment*. – 2015. – Vol. 160. – P. 1-14.
- [9] Willhauck, G. Comparison of object oriented classification techniques and standard image analysis for the use of change detection between SPOT multispectral satellite images and aerial photos / G. Willhauck, T. Schneider, R. De Kok, U. Ammer // *ISPRS*. – 2000. – Vol. 33. – P. 35-42.
- [10] Афанасьев, А.А. Гибридные методы автоматизированной идентификации изменений ландшафтного покрова по данным дистанционного зондирования Земли в условиях шумов / А.А. Афанасьев, А.В. Замятин // *Компьютерная оптика*. – 2017. – Т. 41, № 3. – С. 431-440. DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-3-431-440.
- [11] Рубис, А.Ю. Компаративная фильтрация изображений с использованием монотонных морфологических операторов / А.Ю. Рубис, М.А. Лебедев, Ю.В. Визильтер, О.В. Выголов, С.Ю. Желтов // *Компьютерная оптика*. – 2018. – Т. 42, № 2. – С. 306-311. DOI: 10.18287/2412-6179-2018-42-2-306-311.
- [12] Федосеев, В.А. Исследование методов выявления антропогенных изменений на земной поверхности по последовательности космических снимков высокого разрешения / В.А. Федосеев, Н.В. Чупшев // *Компьютерная оптика*. – 2012. – Т. 36, № 2. – С. 279-288.
- [13] Визильтер, Ю.В. Обработка и анализ изображений в задачах машинного зрения. Курс лекций и практических занятий. / Ю.В. Визильтер, С.Ю. Желтов, А.В. Бондаренко, М.В. Ососков, А.В. Моржин. – М.: Физматкнига, 2010. – 689 с.
- [14] Корнилов, Ф.А. Разработка методов распознавания структурных различий изображений / Ф.А. Корнилов // *Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук*. – Екатеринбург, 2015. – 140 с.
- [15] Корнилов, Ф.А. Исследование влияния рассинхронизации входных изображений на качество работы алгоритмов поиска структурных различий / Ф.А. Корнилов // *Машинное обучение и анализ данных*. – 2015. – Т. 1, № 12. – С. 1686-1695.
- [16] Корнилов Ф. А. Исследование алгоритма поиска структурных различий изображений // *Труды Института математики и механики УрО РАН*. – 2013. – Т. 19, № 1. – С. 144-159.
- [17] Варламова, А.А. Информационная технология обработки данных ДЗЗ для оценки ареалов растений / А.А. Варламова, А.Ю. Денисова, В.В. Сергеев // *Компьютерная оптика*. – 2018. – Т. 42, № 5. – С. 864-876. DOI: 10.18287/2412-6179-2018-42-5-864-876.
- [18] Otsu, N. A threshold selection method from gray-level histograms / N. Otsu // *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics*. – 1979. – Vol. 9(1). – P. 62-66.
- [19] Gonzalez, R.C. *Digital Image Processing* / R.C. Gonzalez, R.E. Woods. – Pearson, 2017. – 1192 p.
- [20] Zanetti, M. Rayleigh-Rice mixture parameter estimation via EM algorithm for change detection in multispectral images / M. Zanetti, F. Bovolo, L. Bruzzone // *IEEE Transactions on Image Processing*. – 2015. – Vol. 24(12). – P. 5004-5016.
- [21] Fawcett T. An introduction to ROC analysis / T. Fawcett // *Elsevier*. – 2006. – P. 861-874.

Благодарности

Настоящая работа была выполнена при поддержке гранта РФФИ № 16-29-09494 офи_м.

Application of superpixel segmentation and morphological projector for structural changes detection in remote sensing images

A.Y. Denisova¹, A.A. Egorova¹, V.V. Sergeyev^{1,2}

¹Samara National Research University, Moskovskoe Shosse 34A, Samara, Russia, 443086

²Image Processing Systems Institute of RAS - Branch of the FSRC "Crystallography and Photonics" RAS, Molodogvardejskaya street 151, Samara, Russia, 443001

Abstract. Detection of structural changes in images is one of the important tasks of remote sensing data (RSD) thematic analysis. The effective way to solve this task is using the Pyt'ev's morphological projector to analyse the pair of images acquired on different dates. The main advantage of this method is its invariance to global brightness transformations, which in the case of remote sensing images correspond to different parameters of the atmosphere and to the different values of brightness-contrast ratio of the scene. However, the classical Pyt'ev's morphological projector and its regularized versions do not take into account spatial connectivity; as a result, they ignore textural features of images. We suggest the algorithm of structural changes detection based on superpixel segmentation and morphological projector that account for local characteristics. This paper also presents the experimental results of the proposed method of structural changes detection for a set of synthesized and real remote sensing images at different values of signal-to-noise ratio and vignetting of input images and the comparison of it with the method based on the classical Pyt'ev's morphological projector.