

## ПРИМЕНЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ

УДК 621.382

### МЕТОДЫ ОБНАРУЖЕНИЯ СТРУКТУРНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ В КАДРАХ ВИДЕОПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ ПРИ РЕГИСТРАЦИИ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

© 2013 г. Ю. С. Радченко, М. В. Ряжских

*Воронежский государственный университет  
Россия, 394006, Воронеж, пл. Университетская, 1  
E-mail: ysradchenko@yandex.ru*

Поступила в редакцию 13.02.2012 г.

Рассмотрена возможность применения параметрического, непараметрического и спектрального критериев структурного подобия изображений для обнаружения изменений в фазовом состоянии объекта наблюдения. Экспериментально показана эффективность перечисленных критериев в решении вышеуказанных задач на примере обнаружения фазовых переходов хлорида цезия в диапазоне температур от 250 до 710°С.

DOI: 10.7868/S0032816213010114

#### ВВЕДЕНИЕ

Автоматизация научных исследований, основанных на видеорегистрации, во многих случаях требует обнаружения изменений в последовательности кадров без участия наблюдателя. Изменения яркости, цвета, размера объекта достаточно просто детектируются энергетическими критериями. Однако для ряда задач требуется применение алгоритмов, которые бы реагировали на мелко-масштабные и текстурные изменения изображений. Для этих задач могут быть использованы критерии структурного подобия MSSIM (Mean Structural Similarity – среднее структурное подобие) [1], MNSSIM (Mean Nonparametric Structural Similarity) [2, 3], а также спектральный алгоритм обнаружения изменений в кадре [4], хорошо себя зарекомендовавшие при анализе видеокодеков. Полезной особенностью данных критериев подобия является их достаточная вычислительная простота и соответствие восприятию зрительной системы человека.

Целью данной работы является описание алгоритмов MSSIM, MNSSIM и спектрального критерия, экспериментальное подтверждение их рабочих характеристик и указание особенностей их применения. В качестве примера применения этих критериев приведено автоматическое обнаружение изменений фазовой структуры при нагревании ряда веществ.

#### КРИТЕРИИ СТРУКТУРНОГО ПОДОБИЯ

Критерий структурного подобия MSSIM [1] определяется путем усреднения индекса структурного

подобия SSIM по всем  $M$  информативным блокам сравниваемых изображений  $X$  и  $Y$ :

$$\text{MSSIM}(X, Y) = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M \text{SSIM}_j(x, y). \quad (1)$$

Значение  $\text{SSIM}_j(x, y)$  для  $j$  блоков  $x, y$  соответствующих изображений  $X, Y$  вычисляется по формуле

$$\text{SSIM}_j(x, y) = l(x, y)c(x, y)s(x, y), \quad (2)$$

где  $l(x, y)$ ,  $c(x, y)$  и  $s(x, y)$  – функционалы сравнения соответственно яркости, контрастности и структуры. Таким образом, критерий MSSIM учитывает три фактора зрительного восприятия изображения.

В соответствии с [1] функционалы сравнения в блоках вычисляются следующим образом:

$$l(x, y) = \frac{2\mu_x\mu_y + C_1}{\mu_x^2 + \mu_y^2 + C_1}, \quad c(x, y) = \frac{2\sigma_x\sigma_y + C_2}{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_2}, \quad (3)$$

$$s(x, y) = \frac{\sigma_{xy} + C_3}{\sigma_x\sigma_y + C_3},$$

где  $\mu_x, \mu_y, \sigma_x^2, \sigma_y^2$  – выборочные среднее и дисперсия значений яркостной компоненты для блоков изображений  $x$  и  $y$ ;  $\sigma_{xy}$  – корреляционный момент между векторами значений в блоках;  $C_1-C_3$  – небольшие константы:  $C_1 = (0.01L)^2$ ,  $C_2 = (0.03L)^2$ ,  $C_3 = C_2/2$ ,  $L$  – разрядность изображения. С точностью до константы  $C_3$  функционал  $s(x, y)$  совпадает с выборочным коэффициентом корреляции Пирсона. Выбор в качестве меры структурного различия функционала  $s(x, y)$  в виде (3) наиболее обоснован при сравнении векторов значений, имеющих многомерное гауссово распределение.

Поэтому он хорошо различает текстуры, имеющие различные спектрально-корреляционные характеристики. Критерий MSSIM хорошо отслеживает искажения в виде гауссова шума.

В [2] предложены две модификации критерия структурного подобия на основе непараметрических методов: MNSSIM1 и MNSSIM2 [2, 3].

Для MNSSIM1 вместо (3) предлагается использовать функционалы

$$l(x, y) = \frac{2m_x m_y + C_1}{m_x^2 + m_y^2 + C_1}, \quad c(x, y) = \frac{2\sigma m_x \sigma m_y + C_2}{\sigma m_x^2 + \sigma m_y^2 + C_2}, \quad (4)$$

$$s(x, y) = R_S(x, y),$$

где  $m_x = \text{mediana}(\mathbf{x})$  и  $m_y = \text{mediana}(\mathbf{y})$  – медианы векторов значений яркости  $\mathbf{x}$ ,  $\mathbf{y}$  в блоках изображений  $x$  и  $y$  соответственно;  $\sigma m_x^2 = \text{mediana}[(\mathbf{x} - m_x)^2]$ ,  $\sigma m_y^2 = \text{mediana}[(\mathbf{y} - m_y)^2]$  – медианы квадрата разности векторов значений яркости и медианы,  $R_S(x, y)$  – ранговый коэффициент корреляции Спирмена [5, 6].

Для MNSSIM2 предлагается использовать функционалы

$$l(x, y) = \frac{2m_x m_y + C_1}{m_x^2 + m_y^2 + C_1}, \quad c(x, y) = \frac{2\sigma_x \sigma_y + C_2}{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_2}, \quad (5)$$

$$s(x, y) = R_S(x, y),$$

т.е. функционал сравнения контрастности  $c(x, y)$  оставить таким же, как и в MSSIM. Константы  $C_1$  и  $C_2$  в (5), (6) идентичны используемым при подсчете MSSIM [1].

### Спектральный алгоритм обнаружения изменений в блоке

Изображение в блоке может быть разложено в обобщенный ряд Фурье по системе ортогональных функций  $\varphi_{km}(\zeta, \eta)$  [4]. Разложение в ряд Фурье целесообразно выполнить, например, при помощи дискретного косинусного или дискретного чебышевского преобразований, обеспечивающих высокую скорость сходимости рядов и простоту вычисления [4]. Тогда можно представить значения пикселей в  $j$ -х блоках последовательных кадров изображений в виде

$$X(\zeta, \eta; t)_j = \sum_{k,m} C_{km}^{(j)}(t) \sigma_{km}(\zeta, \eta), \quad (6)$$

$$Y(\zeta, \eta; t+1)_j = \sum_{k,m} C_{km}^{(j)}(t+1) \sigma_{km}(\zeta, \eta),$$

где  $\{C_{km}^{(j)}(t)\}$  – спектральные коэффициенты разложения  $j$ -го блока изображения в момент  $t$ ,  $\{C_{km}^{(j)}(t+1)\}$  – в момент  $t+1$ .

Один из спектральных критериев, предложенных в [4], для обнаружения смены сцен в видеопоследовательности использует в качестве меры различия кадров величину

$$D_0 = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M D_{0j}. \quad (7)$$

Значение метрики  $D_{0j}$  для каждого из  $M$  информативных блоков вычисляется по формуле

$$D_{0j} = \frac{\sum_{k,m} [C_{k,m}^{(j)}(t) - C_{k,m}^{(j)}(t+1)]^2}{[C_{0,0}^{(j)}(t)]^2}. \quad (8)$$

Число слагаемых в сумме (8) берется небольшим (от 7 до 12), поскольку малые высокочастотные компоненты можно отбросить. Так как спектральный коэффициент  $C_{0,0}^{(j)}(t)$  пропорционален средней яркости изображения  $X(t)$  в соответствующем блоке, то метрика  $D_0$  устойчива к вариациям средней яркости от блока к блоку.

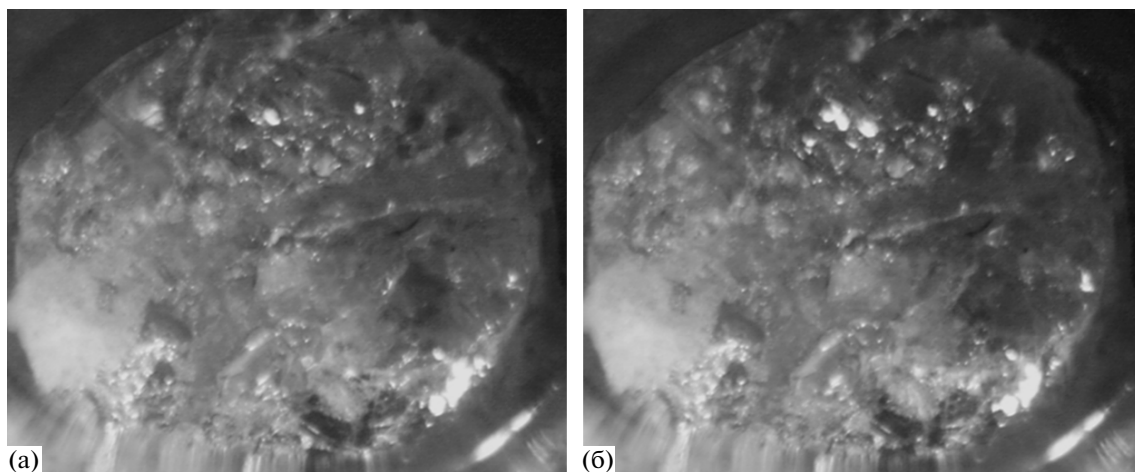
### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для изучения была выбрана видеопоследовательность из 75 кадров, полученная в ходе съемки эксперимента по нагреванию крупноблочного поликристаллического образца хлорида цезия CsCl в диапазоне температур 250–710°C с помощью цифровой камеры Infinity 1-3С. (Каждый кадр изображает вещество при определенной температуре; изменение температуры вещества от кадра к кадру не постоянно.)

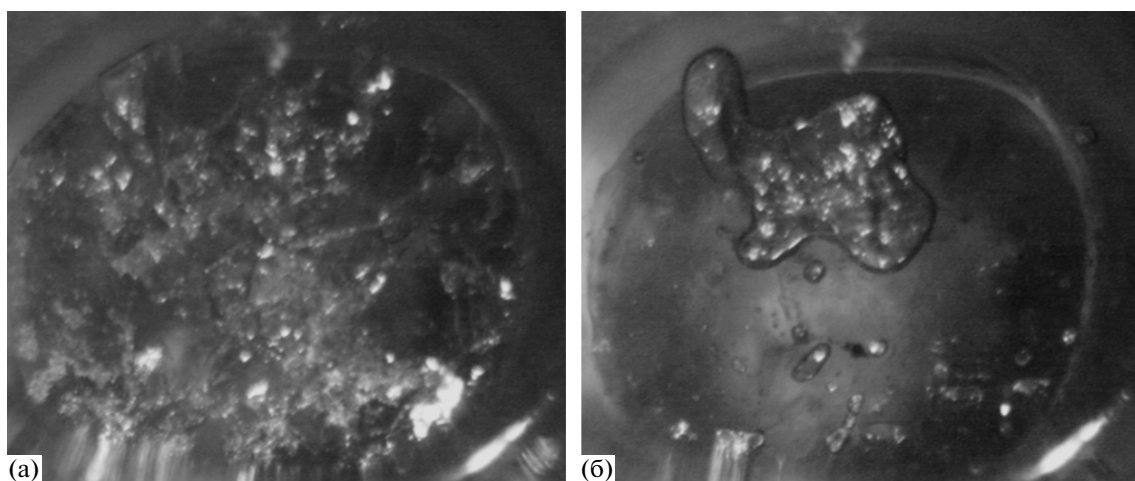
Известно [7], что в CsCl в данном диапазоне происходят два фазовых перехода. При этом имеет место резкое (скачкообразное) изменение текстуры поверхности вещества и, следовательно, резкое изменение текстуры соответствующих этому переходу соседних кадров. Необходимо зафиксировать температуры этих изменений.

На рис. 1 представлены изображения, имеющие небольшие визуальные отличия в текстуре некоторых областей (блоков) и соответствующие первому эффекту – полиморфному превращению вещества (переходу из одной твердой фазы в другую с реконструктивной перестройкой мозаичной структуры кристаллов – “зерен” на изображении). На рис. 2 представлены изображения, визуально значительно отличающиеся и соответствующие второму наблюдаемому эффекту – плавлению вещества (переход из твердой фазы в жидкую с разрушением кристаллов – исчезновению “зерен” на изображении).

Для обнаружения момента изменения текстуры нужно каждому кадру поставить в соответствие некоторую величину, описывающую насколько этот кадр изменился относительно предыдущего, и построить зависимость этой величины от номера кадра (температуры). В моменты фазовых переходов эта зависимость должна иметь скачок. В качестве таких величин в данной работе использовались индекс структурного подобия MSSIM [1], его модификации MNSSIM [2, 3] и спектральная



**Рис. 1.** Фрагмент видеопоследовательности, соответствующий фазовому переходу (полиморфному превращению) поликристаллического образца CsCl, при температуре 462.8°C (а), 468.4°C (б).



**Рис. 2.** Фрагмент видеопоследовательности, соответствующий фазовому переходу (плавлению) поликристаллического образца CsCl, при температуре 642.7°C (а), 645.2°C (б).

метрика обнаружения изменений в видеопоследовательности  $D_0$  [4]. Для вычисления спектра использовалось дискретное косинусное преобразование.

#### *Результаты исследований*

На рис. 3 приведены графики  $MSSIM(T)$ ,  $MNSSIM1(T)$  и  $MNSSIM2(T)$ , на рис. 4 – график  $D_0(T)$ . Все зависимости имеют по два ярко выраженных пика (экстремума), соответствующих температурам фазовых переходов. Физически важный смысл имеет левый склон пика, отображающий фазовый переход (появились сильные изменения); правый склон пика означает, что изменения закончились. Флуктуации (маленькие пики) объясняются случайными изменениями яркости кад-

ров, а также случайными изменениями в структуре вещества.

На графике  $MSSIM(T)$ ,  $MNSSIM1(T)$ ,  $MNSSIM2(T)$  колебания после второго большого пика при температуре 645.2°C обусловлены тем, что при плавлении на поверхности наблюдаемого вещества в пределах некоторого температурного интервала еще продолжают происходить изменения, что и отражается на текстуре изображений. На графике  $D_0(T)$  этот факт также обозначается в виде небольшого пика после 645.2°C, который здесь, в силу особенностей спектрального алгоритма, менее заметен, чем на зависимостях  $MSSIM(T)$ ,  $MNSSIM1(T)$ ,  $MNSSIM2(T)$ .

В табл. 1 и 2 представлены пиковые значения  $MSSIM$ ,  $MNSSIM1$ ,  $MNSSIM2$  и  $D_0$  и их средние значения до пиков (для оценки скачка), а также температура данных пиков.

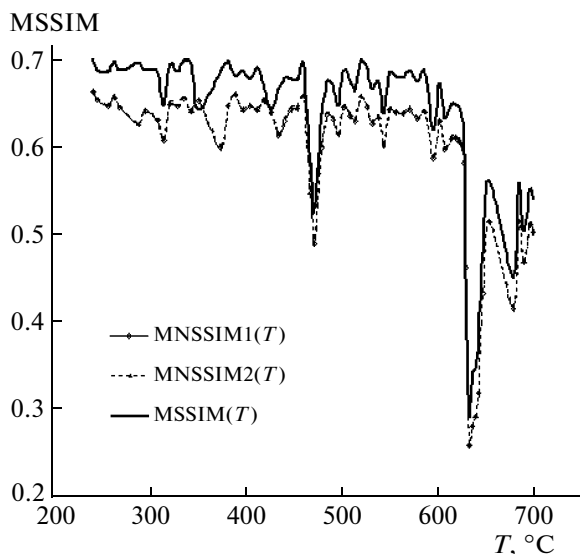


Рис. 3. Зависимости MSSIM, MNSSIM1, MNSSIM2 от температуры.

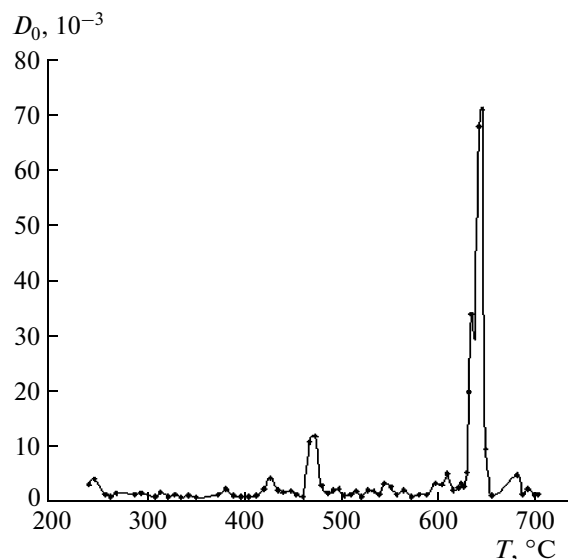


Рис. 4. Зависимость  $D_0$  от температуры.

Температуры эффектов, обнаруженные с помощью исследования резких скачков в зависимостях  $MSSIM(T)$ ,  $MNSSIM1(T)$  и  $MNSSIM2(T)$  и  $D_0(T)$ , хорошо согласуются с данными, известными из литературы [7]:  $T_1 = 469^\circ\text{C}$ ,  $T_2 = 645^\circ\text{C}$ .

*Обсуждение результатов*

Как видно из рис. 3, для данной видеопоследовательности зависимости  $MSSIM$ ,  $MNSSIM1$  и  $MNSSIM2$  однотипны, причем  $MNSSIM1$  и  $MNSSIM2$  практически повторяют друг друга. Тем не менее, если изучаемая видеопоследовательность в процессе съемки подвергается воздействию каких-либо искажающих факторов (например, импульсного шума) и искусственное улучшение изображений может повлиять на результат исследований, то предпочтение стоит отдать критериям  $MNSSIM1$  и  $MNSSIM2$ . Причем,  $MNSSIM1$  более устойчив к воздействию негауссовских помех и иных искажений, чем  $MNSSIM2$ , но требует больших вычислительных затрат.

Из рис. 3 и 4 также следует, что критерий  $MSSIM$  и его модификации  $MNSSIM1(2)$  уступают спектральному критерию по масштабу скач-

ков.  $MSSIM$  и  $MNSSIM1(2)$  в пиках изменяются в несколько раз, тогда как  $D_0$  – в десятки раз. Эта особенность спектрального критерия может быть полезной при автоматическом определении температур фазовых переходов, когда программе необходимо задать порог обнаружения изучаемых эффектов. Даже невысокий автоматически заданный порог, такой как  $6-8 \min(D_0)$ , гарантирует, что флуктуации яркости или цвета изображений, не сопровождающиеся изменением текстуры, не будут отнесены к нужным эффектам. Тем не менее, более высокая ресурсоемкость вычислений  $D_0$  (особенно при большом количестве изображений в видеопоследовательности) не всегда позволяет использовать данный критерий. Во многих случаях достаточно менее ресурсоемких  $MSSIM$ ,  $MNSSIM1$ ,  $MNSSIM2$ . Однако из-за большего разброса значений флуктуаций критериев выбор порога требует дополнительного анализа данных экспериментатором.

Для решения конкретной задачи выбор между предложенными критериями должен определяться требуемой ресурсоемкостью, степенью автоматизации вычислительного процесса, наличием искажений на изображениях.

Таблица 1

Номер пика	$T_{\text{пика}}, ^\circ\text{C}$	Пиковые значения			
		MSSIM	MNSSIM1	MNSSIM2	$D_0, 10^{-3}$
1-й	468.4	0.526	0.489	0.496	12
2-й	645.2	0.296	0.259	0.261	70

Таблица 2

Номер пика	Средние значения до пика			
	MSSIM	MNSSIM1	MNSSIM2	$D_0, 10^{-3}$
1-й	0.686	0.642	0.644	1
2-й	0.668	0.626	0.628	1

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрена возможность применения критериев структурного подобия MSSIM, MNSSIM1, MNSSIM2, а также спектрального алгоритма для обнаружения изменений в фазовом состоянии вещества. На примере видеопоследовательности, снятой в эксперименте по нагреванию поликристаллического образца хлорида цезия, показана эффективность предложенных алгоритмов для решения поставленной задачи. Полученные значения температуры фазовых переходов совпадают с литературными данными [7]. Также в обсуждении указаны особенности применения этих критериев. Предлагаемые алгоритмы могут быть использованы при анализе экспериментов в раз-

личных областях, связанных с изменением текстурных, спектрально-корреляционных параметров зарегистрированных сигналов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wang Z., Bovik A., Sheikh H., Simoncelli E. // IEEE Transaction on Image Processing. 2004. V. 13. № 4. P. 600.
2. Радченко Ю.С., Радченко Т.А., Булыгин А.В. // Труды X международной конференции и выставки "Цифровая обработка сигналов и ее применение" DSPA'2008, Москва. 2008. Т. II. С. 505.
3. Радченко Ю.С., Булыгин А.В., Радченко Т.А. // Цифровая обработка сигналов. 2008. № 4. С. 11.
4. Радченко Ю.С., Булыгин А.В., Радченко Т.А. // Известия вузов. Радиоэлектроника. 2009. № 7. С. 49.
5. Chen G.-H., Yang C.-L., Po L.-M., Xie S.-L. // Proc. 2006 International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP 2006). Toulouse, France. May 2006. V. 2. P. 933.
6. Кобзарь А.И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. М.: Физматлит, 2006.
7. Плющев В.Е., Степин Б.Д. Химия и технология соединений лития, рубидия и цезия. М.: Химия, 1970.