

УДК 004.93

*Л.Г. Ахметшина*Харьковский национальный университет радиоэлектроники, г. Харьков, Украина  
akhm@mail.dsu.dp.ua

## Повышение качества и чувствительности анализа низкоконтрастных изображений методом виртуальной оптической эллипсометрии

Рассмотрены информационные возможности нового метода повышения качества и чувствительности сегментации низкоконтрастных изображений. Суть метода основана на переходе от амплитудной (яркостной) модуляции к фазовой (угловой) модуляции в комплексной области, что открывает возможность обобщения идеи оптической эллипсометрии на область цифровых методов обработки изображений. Представлены результаты численного моделирования и реальной проверки работоспособности метода.

### Введение

При разработке новых методов компьютерного зрения допустимо использование виртуальных аналогов физических методов обработки радиофизических и оптических сигналов и полей и их математических моделей. Известно, что наибольшую чувствительность в радиофизических и радиотехнических измерениях обеспечивают резонансные методы, а в оптических – голографические, интерференционные и эллипсометрические.

Все указанные измерительные методы базируются на использовании волновых и поляризационных свойств когерентного электромагнитного излучения. Для возможности использования данного подхода необходимо преобразование исходного изображения к такому виду, который бы обеспечивал возможность использование идей и математического формализма указанных физических методов.

В работе [1], [2] нами было предложено использование модуляционного преобразования вида

$$R(x, y) = I(x, y)e^{j\pi \frac{I(x, y)}{\lambda}} = \operatorname{Re}\{R(x, y)\} + j \operatorname{Im}\{R(x, y)\} = |R(x, y)|e^{j\Phi(x, y)}, \quad (1)$$

где  $I(x, y)$  – исходное изображение, а  $\lambda$  – модуляционный параметр.

Использование модуляционного преобразования (1), обеспечивающего переход в пространство комплексных яркостей, открывает еще одну дополнительную возможность анализа изображений, основанную на проведении аналогий с поляризационными свойствами волновых полей. Как это хорошо известно, наиболее чувствительным оптическим методом исследования пленочных структур является метод оптической эллипсометрии, теоретические и практические аспекты которого подробно изложены в [3], [4].

**Цель данной статьи** – демонстрация возможности повышения качества и разрешающей способности визуального анализа низкоконтрастных цифровых изображений на основе проведения формальной аналогии с физическим методом оптической эллипсометрии.

**Постановка задачи.** Исследование информационных возможностей метода виртуальной оптической эллипсометрии применительно к трем классам изображений: обычное яркостное изображение, цветное изображение (сюда относится и случай цветового RGB кодирование изображений); мультиспектральное изображение (число диапазонов/параметров больше трех).

## Виртуальная эллипсометрия однопараметровых изображений

Рассматривая результат модуляционного преобразования  $R(x, y)$  в виде аналога двумерной проекции трехмерного векторного поля  $\mathbf{R}$ , можно естественным способом ввести и векторное поле его ротора [5], [6]

$$\text{rot } \mathbf{R} = \left( \frac{\partial R_z}{\partial y} - \frac{\partial R_y}{\partial z} \right) \mathbf{i} + \left( \frac{\partial R_x}{\partial z} - \frac{\partial R_z}{\partial x} \right) \mathbf{j} + \left( \frac{\partial R_y}{\partial x} - \frac{\partial R_x}{\partial y} \right) \mathbf{k}. \quad (2)$$

Выражение (2) является справедливым, если частные производные  $R(x, y)$  являются непрерывными, что, безусловно, выполняется для классов изображений, являющихся предметом исследования. Поскольку компонента  $R_z$  является неизвестной, то в выражении (2) может быть определена лишь третья компонента  $\text{rot } \mathbf{R}$

$$A_z(x, y) = \left( \frac{\partial R_y}{\partial x} - \frac{\partial R_x}{\partial y} \right), \quad (3)$$

которую можно рассматривать в качестве дополнительного информативного параметра, ортогонального составляющим  $R_x$  и  $R_y$ .

Использование такого подхода позволяет сопоставить каждому пикселю исходного изображения три ортогональные компоненты, что открывает возможность использования волновых оптических преобразований, вытекающих как из самой сути модуляционного преобразования ( $\lambda$  можно рассматривать в качестве виртуального аналога длины волны), так и из трехмерной ортогонализации пространства синтезированных информативных признаков.

Действительно, если рассматривать компоненты  $R_x$  и  $R_y$  в качестве соответствующих амплитудных составляющих эллиптически поляризованной волны, то каждой точке плоскости « $x - y$ » можно сопоставить поляризационный эллипс, главная ось которого образует азимутальный угол  $\psi$  с осью  $x$ :

$$\psi = \frac{1}{2} \text{arctg} \left( \frac{2b_x b_y}{b_x^2 - b_y^2} \cos \delta \right), \quad (4)$$

где  $b_x$  и  $b_y$  рассматриваются как модули компонент  $R_x$  и  $R_y$  соответственно. Основная тонкость предлагаемого подхода заключается в способе вычисления фазового угла  $\delta = \delta_z(x, y)$  между компонентами  $R_x$  и  $R_y$ , рассчитываемого как

$$\delta = \delta_z(x, y) = e^{j\pi \frac{A_z(x, y)}{\lambda}}, \quad (5)$$

где в качестве  $A_z$  рассматривается нормированное значение компоненты ротора векторного поля  $\mathbf{R}$ . Помимо этого, отношение меньшей полуоси поляризационного эллипса  $c$  к большей полуоси  $d$  можно выразить как функцию вспомогательного угла (угла эллиптичности)  $\chi$ , так что  $c/d = \operatorname{tg} \chi$ , где

$$\chi = \frac{1}{2} \arcsin\left(\frac{2b_x b_y}{b_x^2 + b_y^2} \sin \delta\right). \quad (6)$$

Таким образом, первоначальному изображению можно сопоставить два новых: азимутальное изображение  $\Psi(x, y)$  и эллиптическое изображение  $\chi(x, y)$ , которые характеризуются нелинейной комбинацией всех трех синтезированных ортогональных параметров.

Столь же полно, в рамках рассматриваемого подхода, анализируемое изображение может быть охарактеризовано параметрами Стокса (рис. 1), определяемыми как [7]

$$\begin{aligned} s_0 &= b_x^2 + b_y^2; \quad s_1 = 2b_x b_y \cos \delta = s_0 \cos 2\chi \sin 2\psi; \\ s_2 &= b_x^2 - b_y^2; \quad s_3 = 2b_x b_y \sin \delta = s_0 \sin 2\chi. \end{aligned} \quad (7)$$

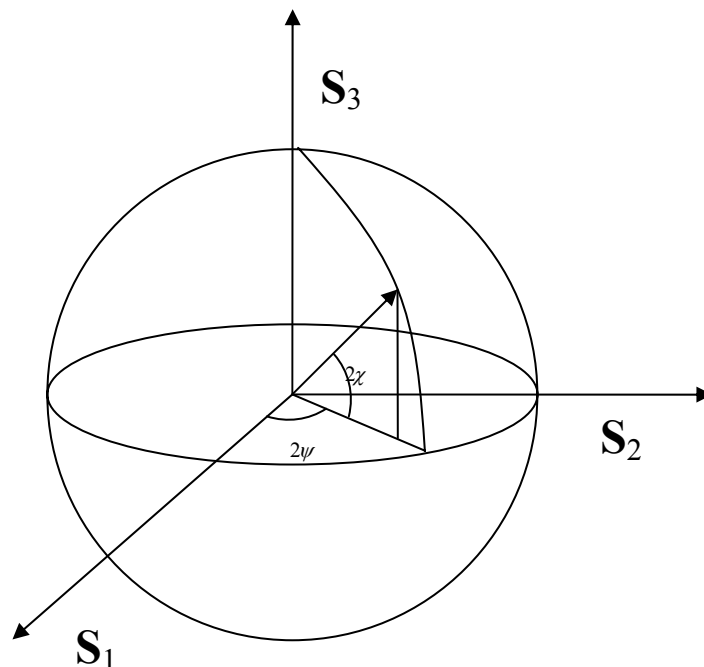


Рисунок 1 – Сфера Пуанкаре

Параметр  $s_0$  пропорционален интенсивности, а  $s_1, s_2, s_3$  интерпретируются, как декартовы координаты точки на сфере радиусом  $s_0$ , известной как сфера Пуанкаре. Долгота и широта этой точки равны соответственно  $2\psi$  и  $2\chi$ .

Исследования были проведены на многих образцах низкоконтрастных изображений. Ниже представлены некоторые из полученных результатов в сравнении с известными преобразованиями (значение  $\lambda = 1$ ).

**Маммографическое изображение.** На рис. 2 представлено медицинское радиологическое изображение и результаты его обработки известными методами [8], [9].

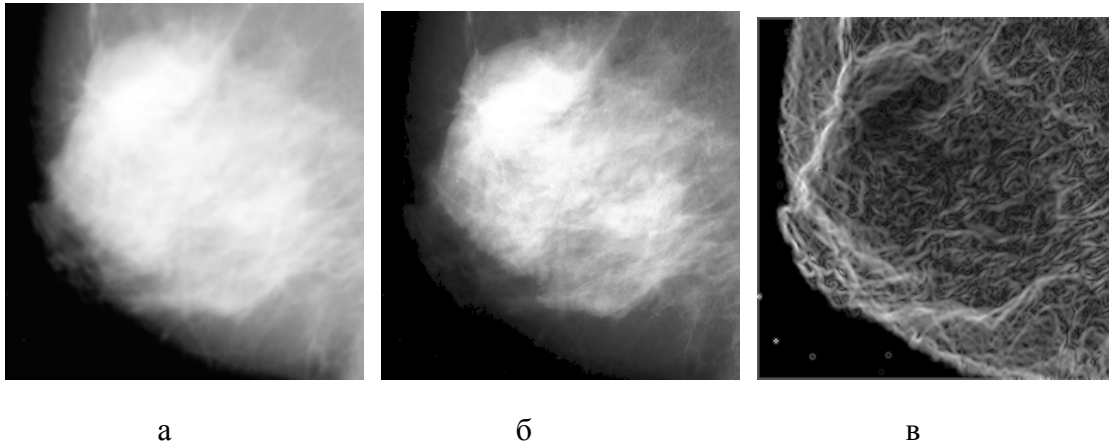


Рисунок 2 – Маммографическое изображение: а – оригинал; б – результат метода эквализации гистограмм; в – модуль градиентного отображения

Из рассмотрения рис. 2 видно, что применение известных методов анализа низкоконтрастных изображений не позволяет детализировать потенциальную область возможного интереса. Использование эллипсометрических характеристик  $\Psi(x, y)$  и  $\chi(x, y)$  (рис. 3) позволяет повысить детализацию визуального анализа.

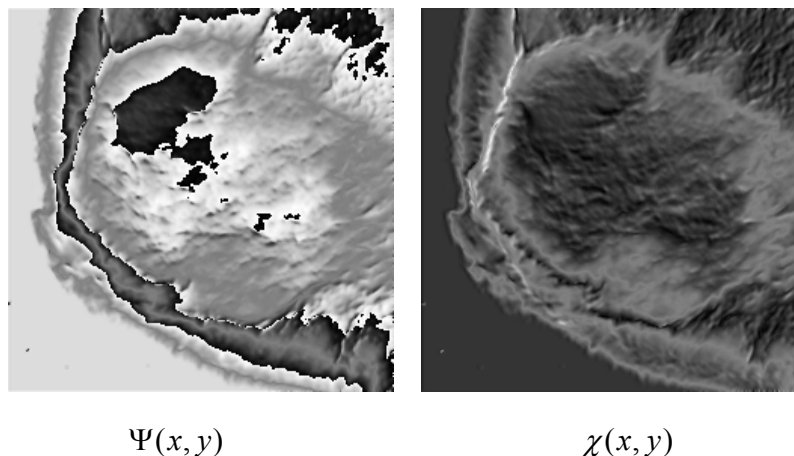


Рисунок 3 – Эллипсометрические характеристики

Из рассмотрения рис. 3 следует, что синтез виртуальных эллипсометрических характеристик на основе комбинации методов модуляционного преобразования и теории виртуальных векторных полей позволяет повысить чувствительность и резкость однопараметровых (яркостных) низкоконтрастных изображений, при этом

анализ азимутальных синтезированных характеристик  $\Psi(x, y)$  больше подходит для решения задач сегментации, тогда как синтез эллиптических характеристик  $\chi(x, y)$  позволяет повысить чувствительность и резкость исходных изображений.

**Инфракрасное изображение.** На рис. 4а представлено инфракрасное изображение работающей интегральной микросхемы, а на рис. 4б – результат применения метода эквализации гистограмм.

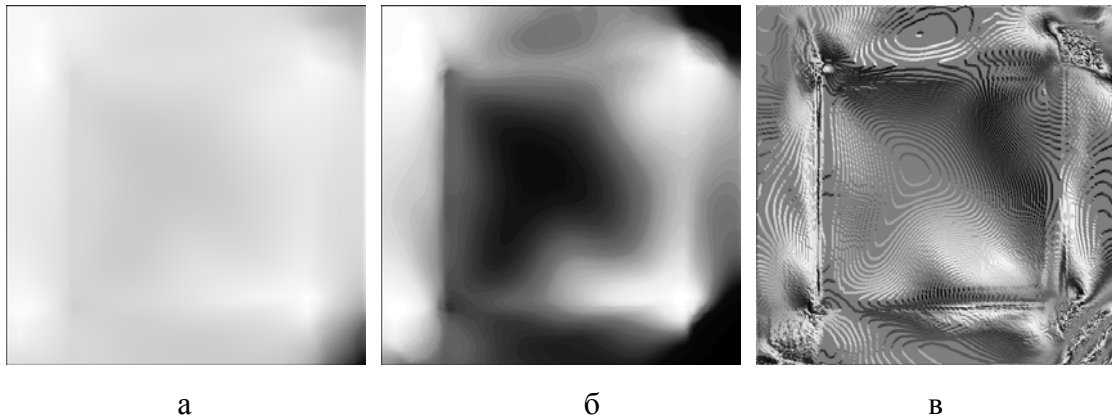


Рисунок 4 – Инфракрасное изображение: а – оригинал; б – результат метода эквализации гистограмм; в – эллиптическая характеристика  $\chi(x, y)$

Из рассмотрения рис. 4 следует, что метод эквализации гистограмм в данном случае является неэффективным, тогда как синтез эллиптической характеристики  $\chi(x, y)$  позволил выявить все топологические особенности анализируемого изображения и, в частности, выявить характерную ступенчатость его структуры связанной с особенностями его формирования на основе использования ПЗС матрицы.

**Виртуальная эллипсометрия цветных изображений.** В качестве цветного может рассматриваться любое изображение, представленное тремя параметрами  $I_1 = I_1(x, y)$ ,  $I_2 = I_2(x, y)$  и  $I_3 = I_3(x, y)$  (включая формат RGB – или HSV кодирование). Данное обстоятельство открывает возможность непосредственного использования метода виртуальной эллипсометрии для повышения чувствительности и разрешающей способности анализа цветных изображений.

Синтез трех изображений виртуальных углов эллиптичности  $\chi_1 = \chi_1(x, y)$ ,  $\chi_2 = \chi_2(x, y)$  и  $\chi_3 = \chi_3(x, y)$  возможен на последовательном использовании следующих комбинаций:

$$\begin{aligned}\chi_1 &= \chi_1\{I_1, I_2, \delta_3 = f(I_3)\}; \\ \chi_2 &= \chi_2\{I_1, I_3, \delta_2 = f(I_2)\}; \\ \chi_3 &= \chi_3\{I_2, I_3, \delta_1 = f(I_1)\},\end{aligned}\quad (8)$$

где  $\delta_i$  вычисляются на основе использования выражения (5).

Следует иметь в виду, что в отличие от предыдущего случая (однопараметрового изображения), в котором все три компонента синтезированного векторного поля являлись ортогональными, в выражении (8) любая комбинация исходных изображений  $\{I_i, I_j\}$  этим свойством не обладает. Это важное обстоятельство не позволяет непо-

средственно использовать эллипсометрический метод. В выражении (8) необходимо использовать ортогонализированные аналоги  $\{I_{ort_i}, I_{ort_j}\}$ , тогда как в выражениях  $\delta_i$  используются прямые зависимости  $I_i$ , задающие величину фазового сдвига между ортогональными составляющими  $\{I_{ort_i}, I_{ort_j}\}$ , для фиксированного значения параметра  $\lambda$  в выражении (5). Ортогонализация комбинаций  $\{I_i, I_j\}$  производилась методом Грама – Шмидта [10].

Проверка работоспособности метода для реальных изображений в целях сокращения объема изложения представлена на примере использования только эллиптической характеристики  $\chi(x, y)$  и одной комбинации  $\{I_{ort_1}, I_{ort_2}, \delta = f(I_3)\}$ , поскольку результат является типичным и для других вариантов.

На рис. 5 приводится цветной фрагмент изображения акватории Черного моря (рис. 5 а) и результат эллипсометрического синтеза, в сопоставлении с результатами преобразования известными методами. Чрезвычайно низкая контрастность исходного цветного изображения обусловлена тем обстоятельством, что перепады яркостей во всех трех диапазонах находятся в пределах  $4 \div 6\%$ . В данном случае методы нечетких С-средних и самоорганизующихся карт Кохонена обеспечивают большую степень детализации, по сравнению с исходным снимком, но они лишь сегментируют исходное изображение, однако не могут повысить степень пространственной разрешающей способности. Если анализировать характеристику  $\chi(x, y)$ , то в окрестности, обозначенной «стрелкой», явно выделяются детали, невидимые ни на одном из других изображений рис. 5.

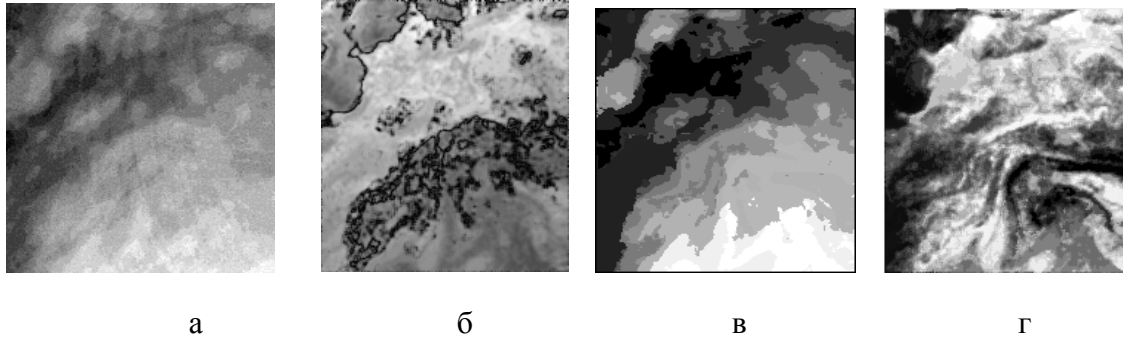


Рисунок 5 – Сопоставление различных методов преобразования: а – оригинал (в градациях серого); б –  $\chi(x, y)$ ; в – нечеткие С-средние (10 кластеров); г – карта Кохонена

Чтобы показать, что характеристика  $\chi(x, y)$  действительно обеспечивает повышение пространственной разрешающей способности, целесообразно рассмотреть пространственно-амплитудные срезы исходных трех диапазонов и синтезированной характеристики  $\chi(x, y)$ , представленных на рис. 6 (в данном случае представлены 100-ые столбцы). Тот факт, что амплитудно-частотные характеристики формирующих фильтров усиливают высокие пространственные частоты, свидетельствует об увеличении пространственной разрешающей способности при использовании эллипсометрических характеристик.

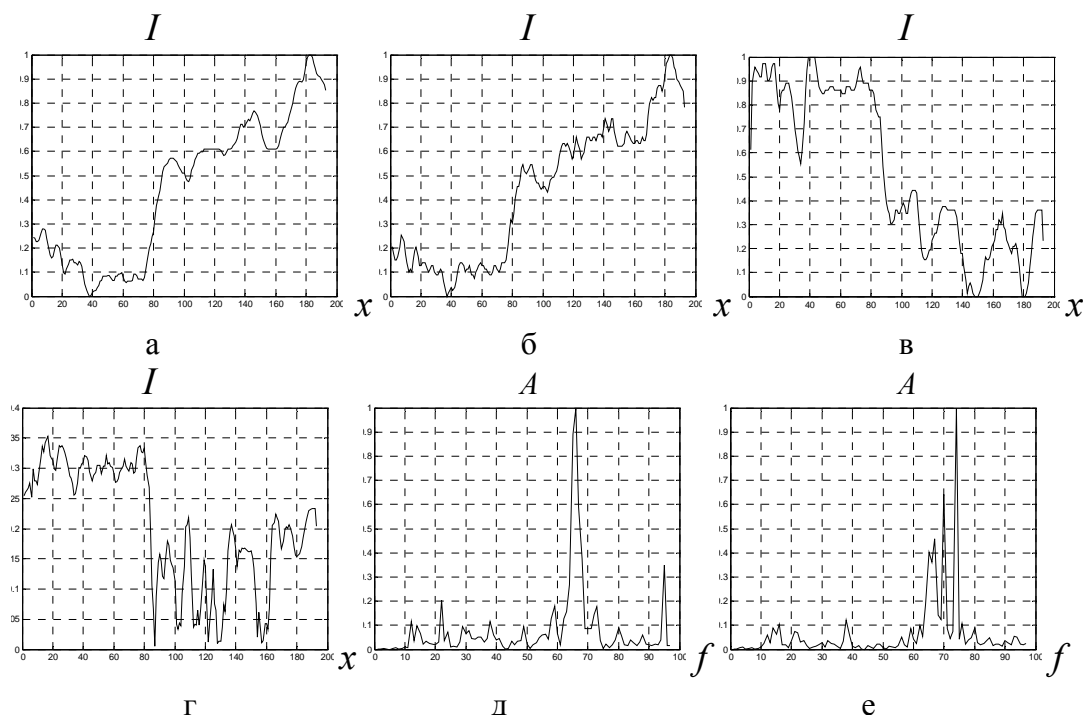


Рисунок 6 – Пространственно-амплитудные срезы: а, б, в – три диапазона исходного изображения; г –  $\chi(x, y)$ ; амплитудно-частотные характеристики формирующих фильтров: д – вход «а», выход «г»; е – вход «б», выход «г»

На рис. 7 представлены результаты синтеза эллипсометрических характеристик в ситуации, полностью аналогичной вышеизложенной, но без использования предварительной процедуры ортогонализации составляющих  $I_1(x, y)$  и  $I_2(x, y)$ .

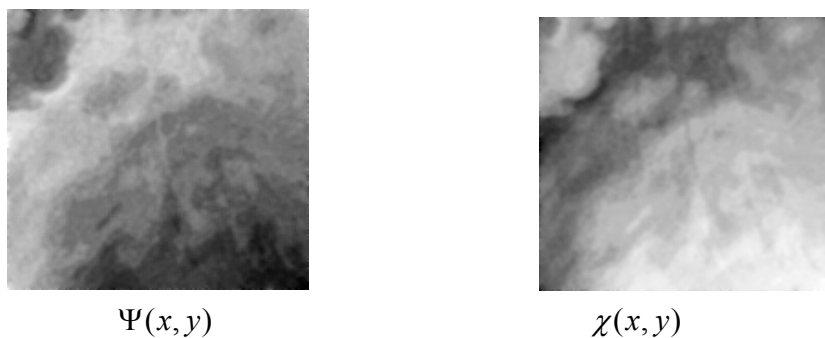


Рисунок 7 – Эллипсометрические характеристики без использования ортогонализации составляющих  $I_1$  и  $I_2$

Результаты, представленные на рис. 7, свидетельствуют, что без использования предварительной процедуры ортогонализации составляющих (в данном случае  $I_1$  и  $I_2$ ), повышения пространственной разрешающей способности (и как следствие, чувствительности визуального анализа) не происходит. Поэтому процедура ортогонализации является необходимой в рамках данного метода.

Эллиптическая характеристика  $\chi(x, y)$  обладает еще одной интересной особенностью, сближающей ее в некоторой степени с методом эквализации гистограмм. На рис. 8 представлено аэрокосмическое RGB – изображение и результат применения к каждому диапазону метода эквализации гистограммы и аналогичные его эллиптическая характеристика  $\chi(x, y)$ .

Применение метода эквализации гистограмм улучшает яркость и контрастность цветовой палитры, по сравнению с исходным изображением, что приводит к повышению чувствительности при визуальном анализе. Применение нового метода (эллиптической характеристики  $\chi(x, y)$ ) позволяет, кроме перечисленных факторов, увеличить также пространственную разрешающую способность, что выражается в детализации изображения.

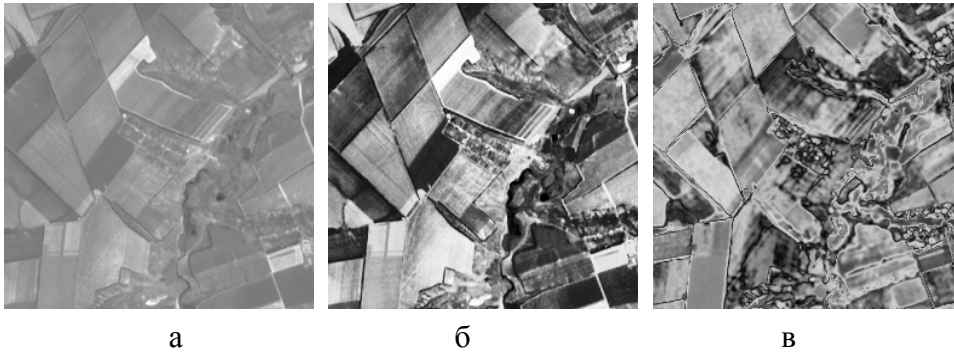


Рисунок 8 – RGB изображения, конвертированные к уровням серого:  
а – оригинал; б – метод эквализации гистограммы; в – характеристика  $\chi(x, y)$

На рис. 9 представлены гистограммы распределения яркостей трех диапазонов исходного изображения (рис. 8а), а на рис. 10 гистограммы распределения яркостей трех синтезированных эллиптических изображений (рис. 8в).

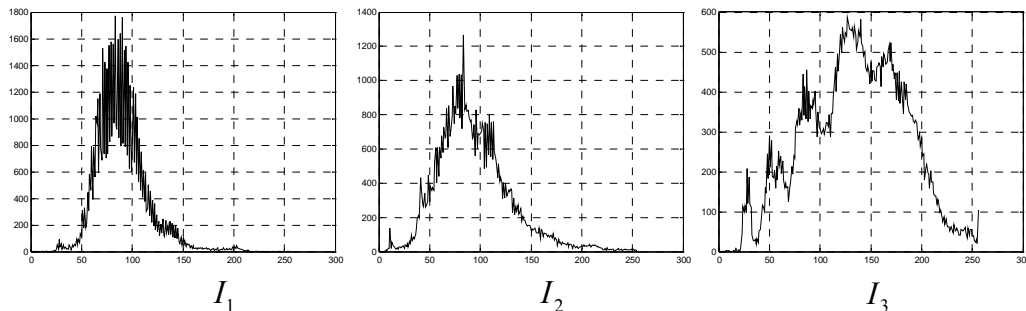


Рисунок 9 – Гистограммы распределения яркостей трех диапазонов исходного изображения (рис. 8а)

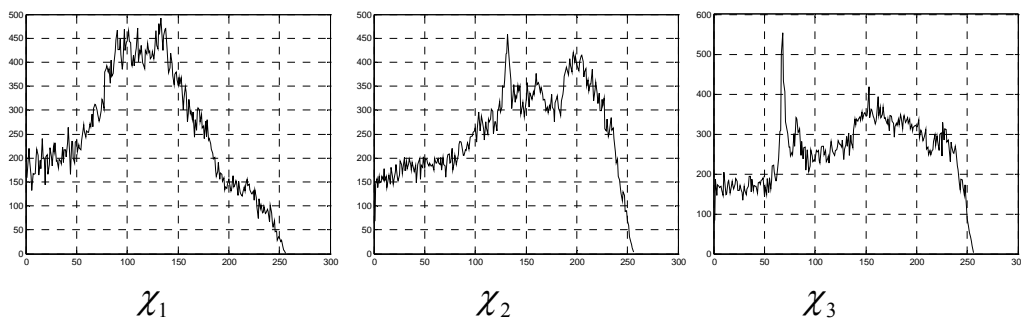


Рисунок 10 – Гистограммы распределения яркостей трех диапазонов для синтезированного эллиптического изображения (рис. 8в)

Видно, что последние распределены по всему диапазону градаций яркостей и весьма близки, за исключением  $\chi_1(x, y)$ , к равномерному распределению, что и обуславливает лучшую степень зрительного восприятия результатов RGB кодирования.



**Виртуальная эллипсометрия мультиспектральных изображений.** Как пример подобного типа изображений на рис. 11 показаны первые шесть изображений 8-мерного мультиспектрального ансамбля.



Рисунок 11 – Первые шесть изображений мультиспектрального ансамбля

Большое количество исходных диапазонов затрудняет синтез эллипсометрических характеристик для всего ансамбля и в этой связи возникает задача сжатия исходных данных, в наилучшем варианте до трех изображений.

Для этой цели нами был использован метод сингулярного разложения, причем, степень сжатия исходного ансамбля определялась на основе анализа спектра нормированных сингулярных чисел, который показал, что первые три «собственных» изображения ансамбля содержат более 99 % информации мультиспектрального ансамбля (каждое «собственное» изображение представляет собой линейную комбинацию всех исходных изображений ансамбля, но с разными значениями коэффициентов), что дает основание для вывода о достаточности их использования для непосредственного цветового RGB-кодирования (рис. 12г). Из рассмотрения рис. 12 следует, что цветовое кодирование трех «собственных» изображений ухудшает визуальное восприятие полученного изображения, по сравнению с «собственными» изображениями.

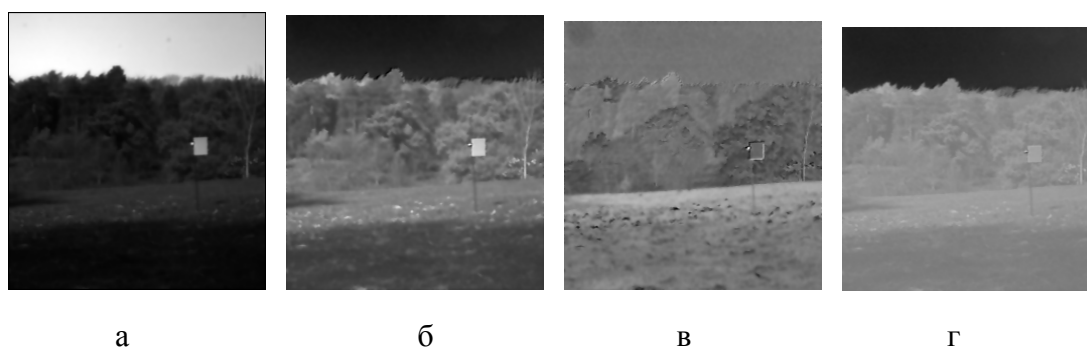


Рисунок 12 – Преобразование мультиспектрального ансамбля: а, б, в – первые три «собственных» изображения; г – результат RGB-кодирования (в градациях серого) на их основе

На рис. 13 представлены результаты синтеза трех эллиптических изображений и их цветового кодирования, полученные на основе использования трех «собственных» изображений, показанных на рис. 12а – в.

Сопоставление этих результатов (рис. 12г с рис. 13) показывает, что использование эллиптических характеристик первых трех «собственных» изображений позволило не

только применить эллипсометрическую методику к мультиспектральному ансамблю, но и обеспечить высокую степень детализации при RGB-кодировании на основе трех синтезированных эллиптических характеристик.

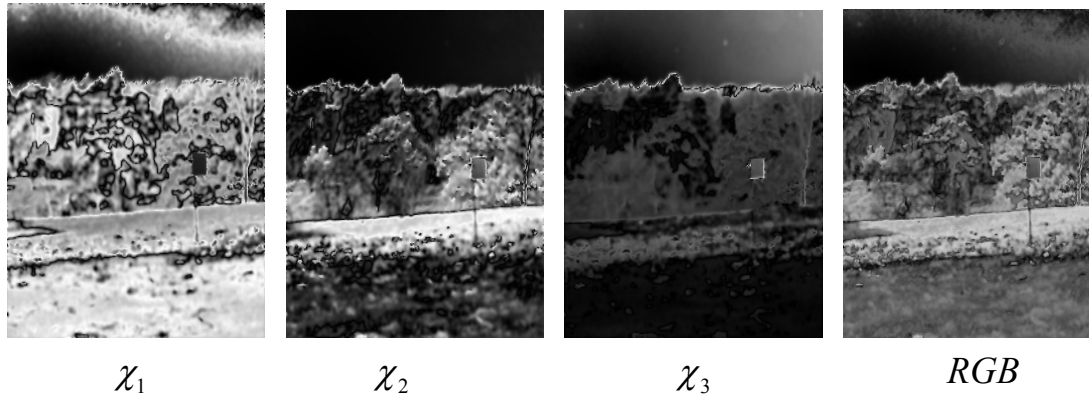


Рисунок 13 – Эллиптические характеристики и их цветное RGB-кодирование (в градациях серого), полученные на основе использования первых трех «собственных» изображений исходного мультиспектрального ансамбля

## Заключение

Метод виртуальной оптической эллипсометрии, в основе которого лежит модуляционное преобразование яркости изображений, открывает возможность проведения аналогий с поляризационными свойствами волновых полей с использованием соответствующего математического аппарата. Данный подход обеспечивает повышение чувствительности и разрешающей способности на основе нелинейного синтеза композиционных эллипсометрических характеристик: азимутального и эллиптического углов.

Практическими особенностями его применения являются следующие факторы:

- в случае обычного яркостного изображения, результат модуляционного преобразования рассматривается в виде аналога двумерного векторного поля, а третья ортогональная компонента – в виде  $z$ -компоненты ротора этого векторного поля, что позволяет непосредственно синтезировать эллипсометрические характеристики;
- при анализе цветных изображений (три измерительных канала), первым шагом является проведение предварительной процедуры ортогонализации двух из исходных изображений с применением модуляционного преобразования к третьему (процедура осуществляется в трех последовательных комбинациях), рассматриваемых в виде аналога двух поляризационных амплитуд и фазового угла между ними соответственно с последующим синтезом на их основе трех эллиптических характеристик и осуществления их цветowego RGB-кодирования, при этом чувствительность, разрешающая способность и степень цветowego зрительного восприятия превосходят характеристики оригинала;
- для мультиспектрального ансамбля, когда число измерительных каналов больше трех, необходима процедура его сжатия до трех изображений, в целях использования методики, применяемой для анализа цветных изображений; эффективным для сжатия является метод сингулярного разложения, причем в качестве трех основных («собственных») изображений принимаются те, которые соответствуют первым трем максимальным син-

гулярным числам – синтез эллиптических характеристик на основе этих «собственных» изображений, обеспечивает более высокую степень детализации результирующего цветового RGB-кодирования по сравнению с прямым RGB-кодированием трех «собственных» изображений.

## Литература

1. Ахметшина Л.Г., Ахметшин А.М., Мацюк И.М. Интерференционные методы повышения качества и чувствительности анализа низкоконтрастных изображений на основе комплексной фазовой модуляции яркостей // Искусственный интеллект. – 2007. – № 3. – С. 194-204.
2. Ахметшина Л.Г. Информационные возможности модуляционного преобразования при сегментации мультиспектральных изображений // Системні технології. – 2004. – № 6. – С. 122-127.
3. Аззам Р., Башара Н. Эллипсометрия и поляризованный свет. – М.: Мир, 1981. – 583 с.
4. Основы эллипсометрии / Под ред. А.В. Ржанова. – Новосибирск: Наука, 1979. – 422 с.
5. Арнольд В.И. Математические методы классической механики. – М.: Наука, 1989. – 472 с.
6. Борисенко А.И., Тарапов И.Е. Векторный анализ и начала тензорного исчисления. – М.: Высшая школа, 1966. – 215 с.
7. Джеррард А., Берч Д. Введение в матричную оптику. – М.: Мир, 1978. – 341 с.
8. Pratt W.K. Digital Image Processing. – New York: Chichester; Weinheim; Brisbane; Singapore; Toronto: John Wiley and Sons Inc., 2001. – 723 p.
9. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. – М.: Техносфера, 2006. – 1070 с.
10. Ланкастер П. Теория матриц. – М.: Наука, 1978. – 280 с.

*Л.Г. Ахметшина*

### **Підвищення якості та чутливості аналізу низкоконтрастних зображень методом віртуальної оптичної еліпсометрії**

Розглянуто інформаційні можливості нового методу підвищення якості і чутливості сегментації низкоконтрастних зображень. Суть методу полягає на переході від амплітудної (яскравої) модуляції до фазової (кутової) модуляції в комплексній області, що відкриває можливість узагальнення ідеї оптичної еліпсометрії на галузь цифрових методів обробки зображень. Представлені результати реальної перевірки працездатності методу.

*L.G. Akhmetshina*

### **Increasing Quality and Sensitivity Analysis of Low Contrast Images Based on Virtual Optical Ellipsometry Method**

Information possibilities of new method of increasing quality and segmentation sensitivity of low contrast images are considered. The main idea of the method is based on the transition from magnitude (brightness) modulation, to phase (angular) modulation in a complex space. It provides a possibility for generalization idea of optical ellipsometry to domain of digital methods of image processing. Results of real testing of the method possibilities are presented.

*Статья поступила в редакцию 05.06.2008.*