

Определение локальных сдвигов изображений радужных оболочек глаз методом проекционной фазовой корреляции

Е.А. Павельева, А.С. Крылов

Лаборатория Математических Методов Обработки Изображений
Факультет Вычислительной Математики и Кибернетики

Московский Государственный Университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

E-mail: paveljeva@yandex.ru, kryl@cs.msu.ru

Аннотация

В статье предложен метод проекционной фазовой корреляции, в котором спектральные характеристики изображений вычисляются на основе разложения функций интенсивности изображений в ряд по функциям Эрмита. При этом в спектральной области отсутствует эффект Гиббса, связанный с периодичным продолжением изображения при подсчете спектра изображения через дискретное преобразование Фурье, что особенно важно в случае входных изображений небольших размеров. Метод применен в задаче идентификации человека по радужной оболочке глаза для определения локальных сдвигов изображений.

Ключевые слова: радужная оболочка глаза, фаза, функции Эрмита.

1. ВВЕДЕНИЕ

Фаза изображения несет достаточно много информации [1]. Метод фазовой корреляции изображений (РОС, Phase-Only Correlation) [2] позволяет одновременно определить “похожесть” и сдвиги изображений. Для пары изображений исследуется поведение разности фаз этих изображений. Фаза изображения вычисляется через дискретное преобразование Фурье, что подразумевает периодическое продолжение изображений, что приводит к систематическим ошибкам вычислений (эффект Гиббса).

В данной работе предложен метод проекционной фазовой корреляции изображений, в котором преобразование Фурье изображения вычисляется с использованием разложения функции интенсивности изображения в ряд по функциям Эрмита (собственным функциям преобразования Фурье). Периодического продолжения изображений не происходит, что позволяет уменьшить ошибки, возникающие в методе фазовой корреляции. Метод проекционной фазовой корреляции имеет преимущество на изображениях небольших размеров, что позволяет применять этот метод для определения локальных сдвигов изображений.

2. МЕТОД ФАЗОВОЙ КОРРЕЛЯЦИИ

Рассмотрим две функции $f(x, y)$ и $g(x, y)$, определенные в прямоугольнике $[0, M] \times [0, N]$. Пусть $F(u, v)$ и $G(u, v)$ - их преобразования Фурье:

$$F(u, v) = \frac{1}{\sqrt{MN}} \sum_{x=0}^M \sum_{y=0}^N f(x, y) e^{-i2\pi \frac{ux}{M}} e^{-i2\pi \frac{vy}{N}} = A_F(u, v) e^{i\varphi_F(u, v)},$$

где A_F - модуль преобразования Фурье, а φ_F - его фаза.

Взаимным фазовым спектром (cross-phase spectrum) двух спектральных функций $F(u, v)$ и $G(u, v)$ называется

$$\text{функция } R_{FG}(u, v) = \frac{F(u, v) \overline{G(u, v)}}{|F(u, v) \overline{G(u, v)}|} = e^{i(\varphi_F(u, v) - \varphi_G(u, v))}, \quad \text{т.е.}$$

спектральная функция с единичным модулем, фаза которой равна разности фаз функций. Обратное преобразование Фурье является фазовой корреляцией (РОС-функцию) [2]:

$$\text{РОС}_{fg}(x, y) = \frac{1}{\sqrt{MN}} \sum_{u=0}^M \sum_{v=0}^N R_{FG}(u, v) e^{i2\pi \frac{ux}{M}} e^{i2\pi \frac{vy}{N}}.$$

Если $g(x, y) = f(x - a, y - b)$, т.е. функции одинаковы с

точностью до смещения, тогда $G(u, v) = e^{-i2\pi(\frac{ua}{M} + \frac{vb}{N})} F(u, v)$. РОС-функция является дельта-функцией с пиком в точке (a, b) . Метод фазовой корреляции опирается на следующее свойство: если две функции $f(x, y)$ и $g(x, y)$ “похожи”, то их РОС-функция имеет выраженный пик. Высота пика определяет меру похожести функций, а положение пика соответствует относительному смещению двух функций.

Метод фазовой корреляции применяется в различных задачах обработки изображений. В том числе и в задаче идентификации по радужной оболочке глаза [3]. При этом показано, что если брать обратное преобразование Фурье не от всего спектрального сигнала, а только от его части, соответствующей низким частотам, то пик РОС-функции получается более четким и устойчивым (рис. 1). Под частью спектрального сигнала (в %) в работе подразумеваются частоты, значения амплитудного спектра в которых составляют данный процент от всей спектральной энергии. При этом высокие частоты обнуляются.

3. МЕТОД ПРОЕКЦИОННОЙ ФАЗОВОЙ КОРРЕЛЯЦИИ

В работе предложен метод проекционной фазовой корреляции, основанный на проекционном методе Эрмита [4]. Исходные функции раскладываются в ряд по функциям Эрмита $\psi_n(x, y)$ – собственным функциям непрерывного преобразования Фурье.



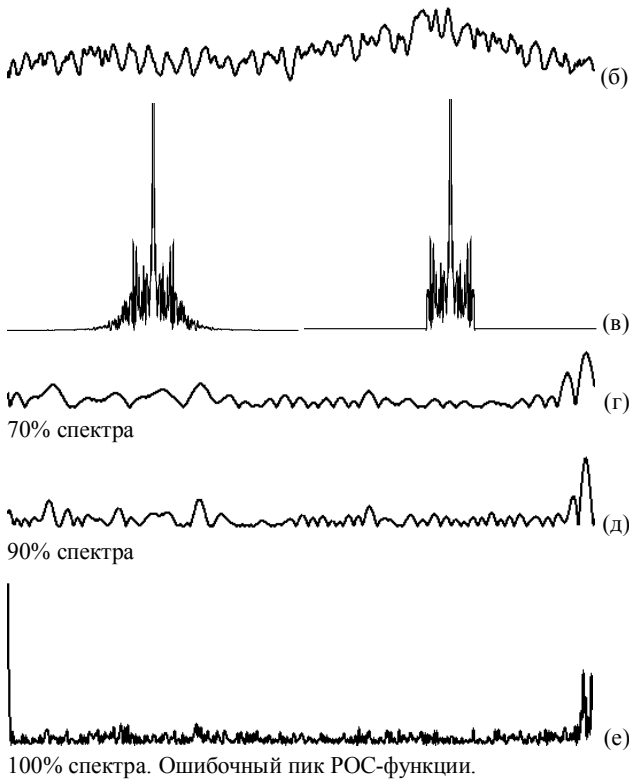


Рисунок 1. Пример одномерных РОС-функций при различной обрезке амплитудного спектра. (а), (б) исходные функции, (в) слева – амплитудный спектр функции (а), справа – урезанный амплитудный спектр (85% спектра), (г)-(е) РОС-функции, вычисленные после различного обнуления высоких частот.

Одномерные функции Эрмита определяются

$$\psi_n(x) = \frac{1}{\sqrt{2^n \cdot n! \cdot \sqrt{\pi}}} \cdot e^{-x^2/2} \cdot H_n(x),$$

$$H_0(x) = 1, \quad H_1(x) = 2 \cdot x,$$

$$H_n(x) = 2 \cdot x \cdot H_{n-1}(x) - 2 \cdot (n-1) \cdot H_{n-2}(x).$$

Двумерные функции Эрмита представимы в виде произведения одномерных:

$$\Psi_{m,n}(x, y) = \psi_m(x) \cdot \psi_n(y).$$

Функции Эрмита $\psi_{m,n}(x, y)$, $m, n = \overline{0, \infty}$ образуют полную ортонормированную систему в $L_2(R^2)$. Пусть исследуемые функции $f(x, y)$ и $g(x, y)$ заданы в прямоугольнике $[-A, A] \times [-B, B]$, продолжим их нулем.

Каждая функция Эрмита $\psi_n(x)$ локализована на отрезке $[-\sqrt{2n+1}, \sqrt{2n+1}]$ (на этом отрезке расположены все перегибы $\psi_n(x)$ и $\psi_n(x) \rightarrow 0$).

Для приближения функции $f(x, y)$ линейной комбинацией функций Эрмита $\psi_{ij}(x, y)$, $i = \overline{0, m}$, $j = \overline{0, n}$ растянем все используемые функции Эрмита по оси x в $k = A/\sqrt{2m+1}$

раз и по оси y в $l = B/\sqrt{2n+1}$ раз (чтобы функция Эрмита с максимальным номером (m, n) была локализована в том же прямоугольнике, что и функция $f(x, y)$). Получим:

$$\begin{aligned} f(x, y) &\approx \tilde{f}(x, y) = \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n c_{ij} \psi_{ij}(x, y) = \\ &= \sum_{i=0}^m \psi_i(x) \sum_{j=0}^n c_{ij} \psi_j(y) = \sum_{i=0}^m c_i(y) \psi_i(x) \end{aligned}$$

где коэффициенты Эрмита

$$\begin{aligned} c_{i,j} &= \iint f(x, y) \psi_{i,j}(x, y) dx dy = \\ &= \int \psi_j(y) dy \int f(x, y) \psi_i(x) dx = \int c_i(y) \psi_j(y) dy. \end{aligned}$$

Далее для приближенных функций $\tilde{f}(x, y)$ и $\tilde{g}(x, y)$ применяется метод фазовой корреляции. Однако, вместо дискретного преобразования Фурье, используется непрерывное преобразование Фурье. Функции Эрмита являются собственными функциями непрерывного преобразования Фурье с собственными значениями $\pm 1, \pm i$:

$F(\psi_n) = (-i)^n \psi_n$. Следовательно, аппроксимация преобразования Фурье имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} F[\tilde{f}] &= F \left[\sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n c_{ij} \psi_{ij}(x, y) \right] = \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n c_{ij} F[\psi_{ij}(x, y)] = \\ &= \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n c_{ij} (-i)^{i+j} \psi_{ij}(x, y) \end{aligned}$$

т.е. вещественная Re_F и мнимая Im_F части преобразования Фурье быстро считаются через коэффициенты Эрмита. Фаза φ_F вычисляется как $\varphi_F = \text{arctg} \frac{\text{Im}_F}{\text{Re}_F}$.

Далее вычисляется функция взаимного фазового спектра $R_{FG}(u, v)$, и для подсчета РОС-функции $POC_{fg}(x, y) = F^{-1}[R_{fg}(u, v)]$ используется свойство вычисления исходной функции через дважды примененное преобразование Фурье: $f(x, y) = F[F(-u, -v)]$. Таким образом, раскладывая функцию $R_{FG}(-u, -v)$, симметричную функции взаимного фазового спектра $R_{FG}(u, v)$, в ряд по тем же функциям Эрмита $\psi_{ij}(x, y)$, $i = \overline{0, m}$, $j = \overline{0, n}$ и считая преобразование Фурье от полученного разложения, получается аналог искомой РОС-функции, называемый нами НПРОС-функцией (Hermite Projection Phase-Only Correlation):

$$HPPOC_{fg}(x, y) = F[R_{FG}(-u, -v)].$$

4. ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ПРОЕКЦИОННОЙ ФАЗОВОЙ КОРРЕЛЯЦИИ В ЗАДАЧЕ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПО РАДУЖНОЙ ОБОЛОЧКЕ ГЛАЗА

На стадии предобработки [5] на изображении глаза выделяется радужная оболочка, которая переводится в прямоугольное нормализованное изображение. Угол

поворота одного глаза относительно другого соответствует циклическому сдвигу одного нормализованного изображения относительно другого. Будем искать сдвиг методами РОС и НРРОС. В случае изображений одной радужной оболочки (рис. 2), пики РОС и НРРОС-функций выражены четко, при этом позиция пика соответствует сдвигу второго изображения относительно первого (повороту второго глаза относительно первого), а высота пика определяет меру похожести функций. В случае изображений разных радужных оболочек (рис. 3) нет четкого пика РОС и НРРОС-функций.

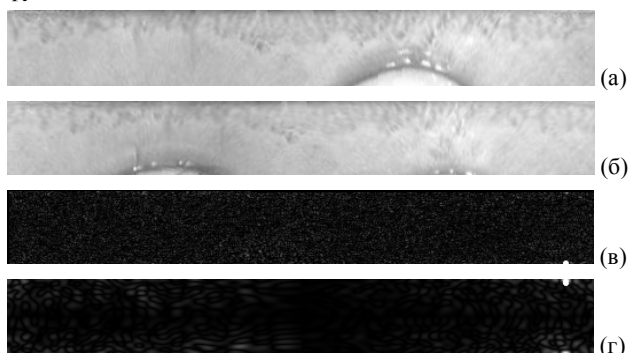


Рисунок 2. (а), (б) нормализованные изображения глаз одного человека, (в) их РОС-функция, (г) их НРРОС-функция. Изображения взяты из базы данных CASIA-IrisV3 [6].

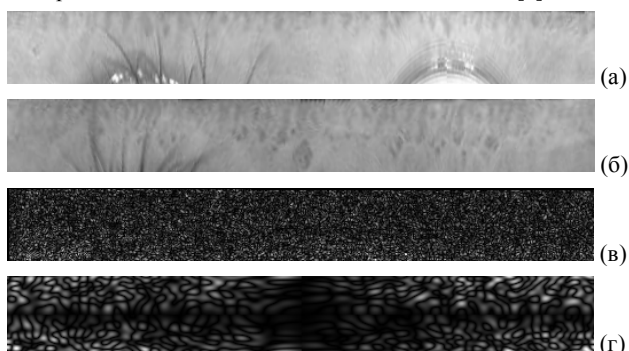


Рисунок 3. (а), (б) нормализованные изображения глаз разных людей, (в) их РОС-функция, (г) их НРРОС-функция.

5. СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ ФАЗОВОЙ КОРРЕЛЯЦИИ И ПРОЕКЦИОННОЙ ФАЗОВОЙ КОРРЕЛЯЦИИ

Метод фазовой корреляции использует дискретное преобразование Фурье, поэтому предполагает периодическое продолжение функций и, далее, обнуление части спектра. Вследствие этого, в спектре исследуемых функций могут возникать нежелательные эффекты (эффект Гиббса). Эти эффекты наиболее заметны в случае небольших изображений и могут приводить к ошибкам в работе метода (отсутствию четкого пика РОС функции для “похожих” изображений) (Рис. 4(в)). Метод проекционной фазовой корреляции работает с исходными функциями без периодического продолжения, поэтому этих ошибок не возникает (Рис. 4(г)).

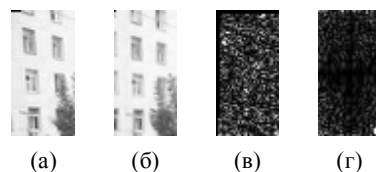


Рисунок 4: (а), (б) исходные “похожие” изображения небольшого размера, (в) РОС-функция – нет четкого пика (г) НРРОС-функция – есть четкий пик.

6. ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ПРОЕКЦИОННОЙ ФАЗОВОЙ КОРРЕЛЯЦИИ ДЛЯ УТОЧНЕНИЯ ЛОКАЛЬНЫХ СДВИГОВ ИЗОБРАЖЕНИЙ

При различных условиях съемки радужных оболочек (различия освещения, повороты головы при съемке) радужная оболочка растягивается нелинейно [7]. Поэтому может получиться так, что не существует единого сдвига для различных локальных частей нормализованного изображения (см. рис. 5). Аналогичные эффекты наблюдаются в общем случае двух изображений одних объектов (рис. 6 (а), (б)).

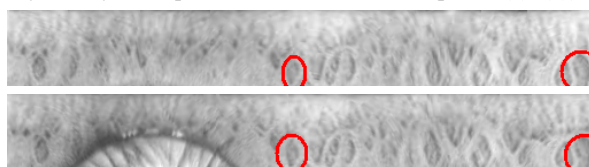


Рисунок 5. Пример локальных сдвигов радужных оболочек. Центральные части точно совпадают друг с другом, тогда как выделенная правая часть первого изображения расположена левее той же части второго изображения.

Повернув второе изображение (рис. 6(б)) методом полярного преобразования Эрмита [5] в спектральной области и, определив сдвиг второго изображения относительно первого методом НРРОС, получим изображение (в). Однако, после применения метода проекционной фазовой корреляции, остались локальные сдвиги изображений (к примеру, на изображении (в) присутствуют окна, которых нет на исходном изображении (а)). Для уточнения локальных сдвигов будем применять наш метод иерархически. Первый уровень иерархии – преобразование изображения (б) в (в) для определения глобального смещения исходных изображений. Далее на каждом следующем уровне иерархии будем делить изображение на 4 равные части. На каждом уровне иерархии уточняются локальные сдвиги изображений. Итоговое изображение практически совпадает с исходным.

Применим описанную выше процедуру к нормализованным изображениям радужных оболочек глаз (Рис. 7). Черные области на рисунке 7 говорят о том, что пик НРРОС функции в этих областях “нечеткий”, т.е. отношение высоты пика к высоте следующего по величине локального максимума НРРОС функции больше пороговой величины $k=2.5$. Таким образом, метод НРРОС показывает, какие области радужных оболочек “похожи”, а какие нет.

В случае изображений глаз разных людей, черные области занимают либо всю, либо большую часть изображения (Рис. 8), что говорит о том, что локальные области радужных оболочек “не похожи”. В дальнейшем предполагается использовать метод проекционной фазовой корреляции

локально в комбинации с методом ключевых точек [5] для идентификации человека по радужной оболочке глаза.

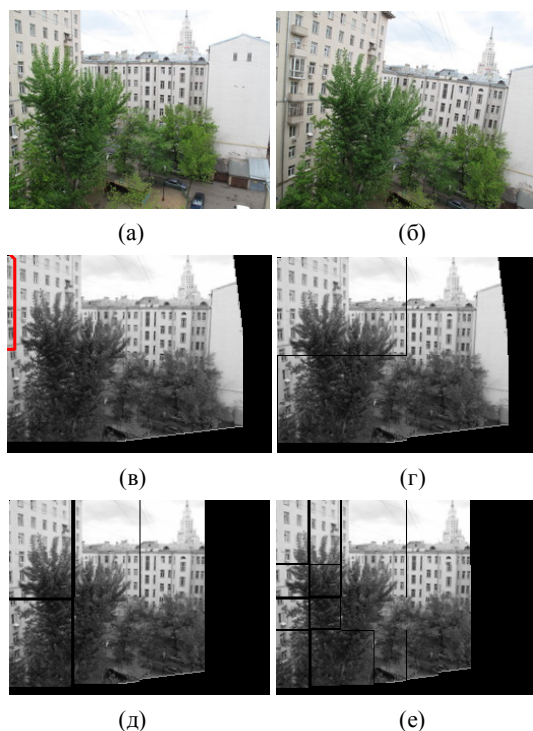


Рисунок 6. (а), (б) исходные изображения; (в) повернутое и сдвинутое изображение (б) (1 уровень иерархии); (г), (д), (е) изображение (б) после 2, 3, 4 уровня иерархии.

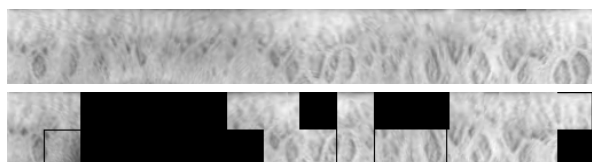


Рисунок 7. Локальные сдвиги областей радужных оболочек одного человека (исходные изображения см. на рис. 5).

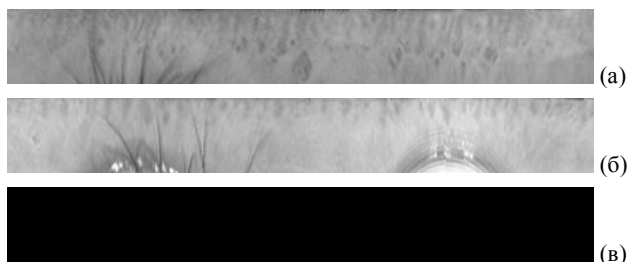


Рисунок 8. (а), (б) исходные изображения разных людей; (в) изображение (б) после нахождения локальных сдвигов.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложен метод проекционной фазовой корреляции, который показал значительно лучшие результаты по сравнению с методом фазовой корреляции на

изображениях небольшого размера. Это связано с тем, что метод НРРОС не требует периодического продолжения изображений в отличие от метода РОС, поэтому не возникает нежелательных ошибок от скачков на границах. Поэтому метод НРРОС позволяет находить локальные сдвиги изображений.

Работа выполнена при поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы и гранта РФФИ 10-07-00433-а.

8. СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] R. P. Millane, W. H. Hsiao. *The basis of phase dominance*, Optics Letters v. 34, No. 17, p. 2607-2609, 2009.
- [2] S. Nagashima, K. Ito, T. Aoki, H. Ishii, K. Kobayashi. *High Accuracy Estimation of Image Rotation using 1D Phase-Only Correlation*, IEICE Trans.Fund. v. E92-A, p. 235-243, 2009.
- [3] K. Miyazawa, K. Ito, T. Aoki, K. Kobayashi, H. Nakajima. *A Phase-Based Iris Recognition Algorithm*, LNCS (ICB 2006), No. 3832, p. 356--365, 2006.
- [4] A. Krylov, D.Korchagin. *Fast Hermite Projection Method*, LNCS, v.4141, p.329-338,2006.
- [5] Е. Павельева, А. Крылов. *Поиск и анализ ключевых точек радужной оболочки глаза методом преобразования Эрмита*, Информатика и ее применения, т.4, в.1, с.79-82,2010.
- [6] База данных CASIA-IrisV3 <http://www.cbsr.ia.ac.cn/IrisDatabase.htm>
- [7] L. Ma, T. Tan, Y. Wang, and D. Zhang, *Efficient iris recognition by characterizing key local variations* IEEE Trans. on Image Processing, vol. 13, no. 6, p. 739–750, 2004.

Об авторах

Павельева Елена Александровна – аспирант ф-та ВМК МГУ. E-mail: paveljeva@yandex.ru.

Крылов Андрей Серджевич – д.ф.-м.н., зав. лаб. математических методов обработки изображений ф-та ВМК МГУ. E-mail: kryl@cs.msu.ru.

About the authors:

Elena A. Pavelyeva is a PhD student of Faculty of Computational Mathematics and Cybernetics, Lomonosov Moscow State University. E-mail: paveljeva@yandex.ru.

Professor. Andrey S. Krylov is the Head of the Laboratory of Mathematical methods of Image Processing, Faculty of Computational Mathematics and Cybernetics, Lomonosov Moscow State University. E-mail: kryl@cs.msu.ru