



А.Ю. Тычков, А.В. Кузьмин

## МАТЕМАТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ВОПРОСУ АВТОМАТИЧЕСКОГО ОБНАРУЖЕНИЯ КОНТУРА СЕРДЦА НА ФЛЮОРОГРАФИЧЕСКИХ СНИМКАХ

(ФГБОУ ВПО «Пензенский государственный университет»)

Цифровой флюорографический снимок (ФОС) представляет собой изображение органов грудной клетки (легких, сердца и сосудов), полученное в результате сканирования пациента веерным рентгеновским лучом посредством цифрового флюорографа. В настоящее время задача автоматизированной обработки ФОС сложилась в отдельное направление, разветвлённое на множество частных задач, связанных с различными аспектами их обработки: корректировка яркости, контрастности, удаление помех, сегментация, выделение отдельных областей и контуров органов грудной клетки (легких и сердца). Например, информация, полученная в результате точного выделения контура сердца, позволит определить его линейные размеры, геометрическую форму, и, тем самым, реконструировать объёмную модель сердца пациента. Современные методы распознавания: метод активных контуров, «шарика», «жука» и преобразование Хафа не позволяют выделить контур сердца без предварительной обработки ФОС.

Авторы предлагают использовать новый математический подход в решении задачи автоматического выделения контура сердца на ФОС, основанного на методе декомпозиции ФОС на эмпирические моды (ДЭМ), последующем его восстановлении (без отдельных эмпирических мод), определении фрактальной размерности восстановленного ФОС и выборе наилучшего результата.

Эмпирические моды – это монокомпонентные составляющие ФОС, модулированные по амплитуде и частоте для каждой строчки и столбца снимка, т.е. их амплитуда и частота меняются во времени. Моды не имеют строгого аналитического описания, но должны удовлетворять двум условиям:

- общее число экстремумов и число пересечений нуля должны отличаться не более чем на единицу;
- среднее значение двух огибающих: верхней, интерполирующей локальные максимумы, и нижней, интерполирующей локальные минимумы, должно быть приближенно равно нулю.

Технология ДЭМ ФОС включает в себя следующие действия:

### 1. Определение локальных экстремумов и минимумов) ФОС $f_j(m_i, n_i)$ :

- значение  $i$ -го отсчета  $f_j(m_i, n_i)$  является локальным максимумом, если выполняется условие  $f_j(m_{i-1}, n_{i-1}) < f_j(m_i, n_i) \geq f_j(m_{i+1}, n_{i+1})$
- значение  $i$ -го отсчета  $f_j(m_i, n_i)$  является локальным минимумом, если выполняется условие  $f_j(m_{i-1}, n_{i-1}) > f_j(m_i, n_i) \leq f_j(m_{i+1}, n_{i+1})$

где  $j$  – шаг декомпозиции,



2. **Определение** верхней  $e_j(m_i, n_i)$  и нижней  $g_j(m_i, n_i)$  огибающей ФОС с помощью кубической сплайн-интерполяции по найденным локальным экстремумам  $f_j(m_i, n_i)$ :

$$e_j(m_i, n_i) = a_a(m_i, n_i)^3 + b_a(m_i, n_i)^2 + c_a(m_i, n_i) + d_a \quad (1),$$

$$g_j(m_i, n_i) = a_i(m_i, n_i)^3 + b_i(m_i, n_i)^2 + c_i(m_i, n_i) + d_i \quad (2),$$

где  $a_a, b_a, c_a, d_a$  – коэффициенты для каждого значения  $i$ -го отсчета верхних огибающих зашумленного ФОС;

$a_i, b_i, c_i, d_i$  – коэффициенты для каждого значения  $i$ -го отсчета верхних огибающих зашумленного ФОС.

3. **Вычисление** среднего значения огибающих ФОС в соответствии с выражением:

$$h_j(m_i, n_i) = \frac{e_j(m_i, n_i) + g_j(m_i, n_i)}{2} \quad (3),$$

где  $h_j(m_i, n_i)$  – среднее значение огибающих зашумленного ФОС;

$e_j(m_i, n_i)$  и  $g_j(m_i, n_i)$  верхняя и нижняя огибающая зашумленного ФОС соответственно.

4. **Вычисление** остатка ФОС по формуле:

$$s_j(m_i, n_i) = f_j(m_i, n_i) - h_j(m_i, n_i) \quad (4),$$

где  $s_j(m_i, n_i)$  – остаток ФОС.

5. **Вычисление** значения критерия останова. В качестве критерия останова декомпозиции используется значение нормализованной квадратичной разности, определяемое как:

$$S = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[ \frac{(f_j(m_i, n_i) - s_j(m_i, n_i))^2}{f_j(m_i, n_i)^2} \right] \quad (5),$$

6. **Проверка условия останова.** На этом этапе осуществляется сравнение значения остатка ФОС со значением нормализованной квадратичной разности. Если:

- $SD > s_j(m_i, n_i)$ , то переходят к выполнению действия 1;
- $SD < s_j(m_i, n_i)$  и  $h_j(m_i, n_i) > s_j(m_i, n_i)$ , то переходят к выполнению следующего действия.

7. **Вывод эмпирических мод ФОС.** На этом этапе осуществляется вывод мод  $m_k(m_i, n_i)$  и остатка  $s_j(m_i, n_i)$  ФОС, где  $k$  – номер. На рис. 1 (а, б, в, г, д) и 2 (а, б, в, г, д) приведены результаты разложения фронтального и левобокowego ФОС на составные части – набор эмпирических мод ФОС (а, б, в, г) и остаток – глобальный тренд ФОС (д). Представленные на фигуре 1 и 2 эмпирические моды получены путем применения метода ДЭМ последовательно для каждого изображения, начиная с исходного флюорографического снимка, соответственно во фронтальной и левобоковой проекции. Из каждого флюорографического снимка получена первая мода (см. рис. 1а и 2а), а из нее получена следующая (см. рис. 1б и 2б) и так далее.

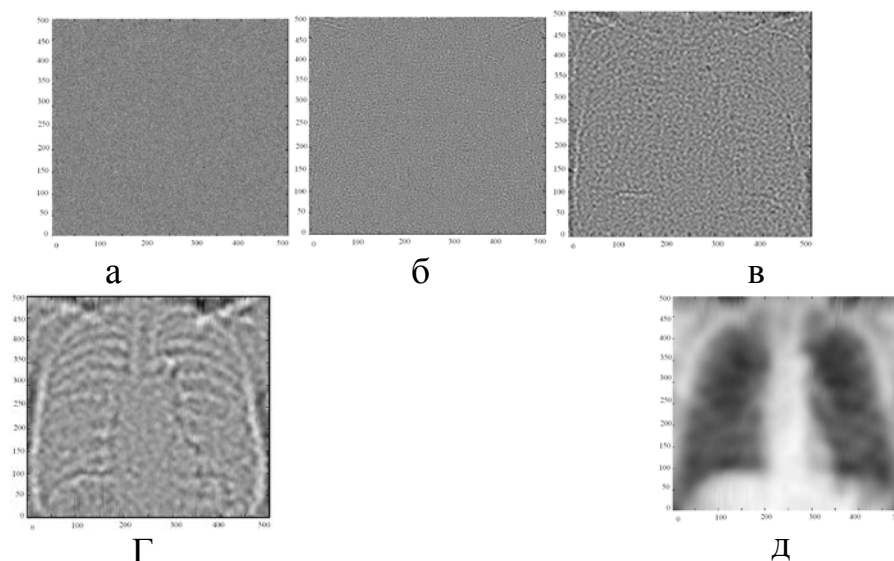


Рис. 1. Результат декомпозиции фронтального ФОС

Каждая эмпирическая мода, представленная на рис. 1 и 2 получена путем разложения ей предыдущей. Частотные составляющие снимков представленных на фигуре 3д и 4д, являются глобальными трендами ФОС и дальнейшему разложению не подлежат. Глобальный тренд представляет собой монотонную функцию, которая не может быть разложена далее на моды, согласно условиям декомпозиции сигнала на эмпирические моды.

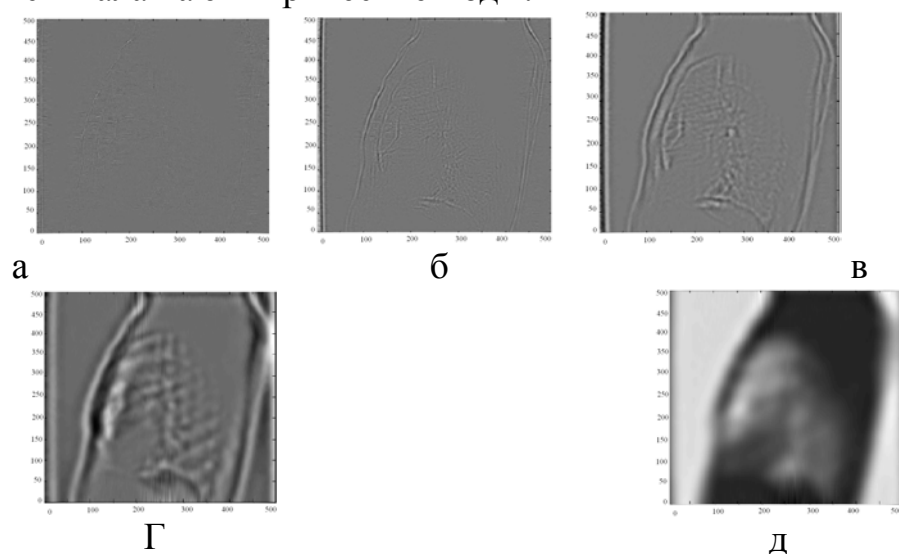


Рис. 2. Результат декомпозиции левобокowego ФОС

На этом этапе восстановления ФОС осуществляется восстановление флюорографических снимков путем суммирования отдельных эмпирических мод  $m_k(m_i, n_i)$ . Целью этапа «Восстановление ФОС» является получение ФОС с явными текстурными различиями в области сердца относительно других органов, чтобы в перспективе, применяя методы текстурной сегментации и ряд других нехитрых методов обработки изображений выделить контур сердца на снимках и построить объемную модель сердца. Приведение изображения к определенной зернистости позволит отделить на снимке различные участки, в том числе и область сердца.



Результат восстановления фронтального и левобокового ФОС путем суммирования отдельных эмпирических мод приведен на рис. 3 (а, б) соответственно. Суммирование третьей и четвертой моды дает наиболее качественную картину изменения текстуры сердца относительно других органов грудной клетки на снимке.

Критерием суммирования третьей и четвертой является однородная мелкозернистая текстура снимка, которая позволяет выделить границы сердца и отделить его от других органов на снимке путем применения методов распознавания. Зернистость снимка определяется путем расчета фрактальной размерности всего ФОС, как левобокового, так и фронтального.

Фрактальная размерность ФОС рассчитывается следующим образом. Сначала производится преобразование снимка, с градацией серого цвета в черно-белое изображение, накладывалась сетка с квадратной ячейкой размером 1x1 пиксель, и подсчитывалось число клеток, в которые попадает наш фрактал, а именно участки только черного цвета. Затем определяется зависимость количества ячеек, занятых черными или белыми пикселями, от размера ячейки, т.е. определяется фрактальная размерность ФОС по следующей формуле:

$$D = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{1}{n} \frac{\ln N}{\ln \varepsilon} \quad (6),$$

где  $D$  – фрактальная размерность;

$N$  – минимальное число квадратных ячеек, которые полностью покрывают фрактальное множество, т.е. участок только черного цвета;

$\varepsilon$  – длина стороны квадратной ячейки сетки квадратного участка, равная 1.

$N$  может изменяться от 1 до 500, так как количество ячеек перекрывающих участок черного цвета находится в зависимости от текстуры снимка, при условии, что сторона одной квадратной ячейки вписанной равна 1 пиксель, при разрешении снимка 500x500 пикселей.

Согласно изображениям, имеющим только черный цвет, фрактальная размерность будет равна 2, т.е. совпадать с топологической размерностью плоскости изображения, а для участка на снимке, в котором имеется только белый цвет, фрактальная размерность будет равна 1. Для участка на снимке, имеющего градацию черного и белого цвета фрактальная размерность будет дробной, и варьироваться в пределах от 1 до 2, как и в случае с флюорографическим снимком.

Значение фрактальной размерности для черно-белого изображения находится в интервале от 1 до 2. Для изображения имеющего градацию как крупных, так и мелких зерен черного цвета фрактальная размерность будет находиться в интервале от 1,4 до 1,6.

Таким образом, технический результат, достигаемый при реализации предложенной математической инновации, позволит использовать ее в дальнейшем исследовании для выделения контура сердца и построения компьютерной модели сердца пациента.