

АЛГОРИТМ ФИЛЬТРАЦИИ РЕНТГЕНОВСКИХ ТОМОГРАММ МЕТОДОМ АДАПТАЦИИ РАЗМЕРА ОКНА ФИЛЬТРА К ЛОКАЛЬНЫМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ ИЗОБРАЖЕНИЯ

В.В. Ласьков, Е.Н. Симонов

В настоящее время используется множество методов для подавления артефактов компьютерной томографии (КТ). Обычно методы приходят из научных кругов или из промышленности. Для ознакомления с методами можно найти отчеты об исследованиях или прослушать доклады на конференциях. Значительная часть методов борьбы с артефактами, тем не менее, является патентованным средством или засекреченной технологией, и не является доступной широкому кругу.

Предложен алгоритм фильтрации изображений медицинской рентгеновской компьютерной томографии с адаптацией размеров апертуры и метода фильтрации к локальным характеристикам изображения. Алгоритм реализован в виде программного обеспечения и апробирован на проекционных данных томографических изображений. Приведено описание алгоритма и формул, лежащих в его основе. Оценена погрешность, даваемая алгоритмом, приведено сравнение с существующими методами фильтрации.

Ключевые слова: компьютерная томография, артефакты, метод фильтрации.

Введение

Алгоритмы фильтрации изображений с адаптацией размеров апертуры были представлены в статьях Воскобойникова, Белявцева и Бронникова [1, 2]. Известно, что степень сглаживания сигналов зависит от размеров апертуры фильтра. При малом размере апертуры фильтра обработке подвергается меньшее число значений, что обеспечивает лучшее сохранение контрастных деталей сигнала, но при этом шум будет сглажен хуже. При большом размере апертуры фильтра сглаживание шума будет происходить лучше, однако при этом возможна «потеря» некоторых контрастных деталей, присутствующих в исходном сигнале. Таким образом, введение алгоритмов адаптации размеров апертуры позволяет улучшить качественные характеристики данного локального фильтра.

В настоящей статье предложен алгоритм фильтрации изображений с адаптацией размеров апертуры к локальным характеристикам этих изображений.

Описание алгоритма

Основой адаптивного алгоритма является выбор оптимальных параметров фильтрации: определение размера апертуры фильтра по локальным статистикам (локальное среднее, локальная дисперсия, дисперсия шума) и типа фильтра (медианный, скользящего среднего или комбинированный) в зависимости от локальных статистик изображения.

Входные параметры фильтра:

- минимальный и максимальный горизонтальный размер апертуры;
- минимальный и максимальный вертикальный размер апертуры;
- значения параметров k и ε , определяющих чувствительность алгоритма к адаптации.

Описание выбора параметров приведено ниже.

Шаги алгоритма описаны ниже.

1. Задаются ограничения на минимальный и максимальный размеры апертуры; задаются параметры k и ε .
2. Первоначальный размер апертуры устанавливается минимальным.
3. Флаг выбора размеров апертуры устанавливается в 0.
4. Флаги изменения размеров апертуры устанавливаются в 1.
5. Пока флаг выбора размеров апертуры не равен 1, выполняется подбор размеров апертуры.
6. При выбранном размере апертуры для выбранной точки рассчитывается медиана.

7. Оценивается дисперсия шума.
8. Рассчитываются средние значения яркости по строкам и столбцам изображения.
9. Рассчитываются среднеквадратические отклонения по строкам и столбцам изображения.
10. Производится проверка условия превышения среднеквадратическими отклонениями заданного уровня шума.
11. В случае истинности условия для строки или столбца соответствующий размер апертуры уменьшается, устанавливаются флаги изменения размеров апертуры.
12. В случае ложности условия соответствующий размер апертуры увеличивается, устанавливаются флаги изменения размеров апертуры.
13. Производится проверка выхода установленных размеров апертуры за пределы минимальных и максимальных размеров.
14. В случае достижения одним из размеров фильтра предельного значения расчёт размеров апертуры заканчивается, флаг выбора размера устанавливается в единицу.
15. Осуществляется проверка критерия останова: если знак приращения размеров апертуры меняется на противоположный, то флаг выбора устанавливается 1, иначе флаг выбора остаётся равным 0.
16. Если флаг выбора равен 0, осуществляется переход к шагу 5.
17. Для выбранного размера апертуры рассчитывается медиана.
18. Для выбранного размера апертуры рассчитывается дисперсия шума.
19. Для выбранного размера апертуры рассчитывается среднее значение.
20. Для выбранного размера апертуры рассчитывается локальная дисперсия.
21. Оценивается и корректируется величина μ .
22. По рассчитанной величине μ определяется тип фильтра.
23. При рекурсивной реализации алгоритма значению $x^{in}(k,l)$ текущей точки присваивается рассчитанное значение $f_{\text{вых}}$.

Оценка параметров

Параметр k

На шаге 10 проводится проверка неравенств:

$$v_r^2(k,l) \geq k\sigma_M^2;$$

$$v_c^2(k,l) \geq k\sigma_M^2,$$

где $v_r^2(k,l)$ и $v_c^2(k,l)$ – среднеквадратическое отклонение по строкам и столбцам, $k\sigma_M^2$ – оценка шума.

В случае истинности условия для строки или столбца соответствующий размер апертуры уменьшается, в обратном случае – увеличивается.

Соответственно, возможные варианты выбора параметра k :

- $k < 1$, если требуется удерживать размеры апертуры, близкие к минимальным;
- $k = 1$, если требуется расчёт по действительной величине шума;
- $k > 1$, если требуется удерживать размеры апертуры, близкие к максимальным.

Параметр E

На шаге 21 оценивается величина μ :

$$\mu = 1 - \frac{XD}{DISP},$$

где XD – дисперсия шума; $DISP$ – локальная дисперсия.

Величина μ может принимать следующие значения:

- $\mu = 1$, если локальная дисперсия значительно превосходит дисперсию шума (происходит резкое изменение изображения);
- $0 < \mu < 1$, если размеры локальной дисперсии и дисперсии шума сопоставимы;
- $\mu = 0$, если дисперсия шума превосходит локальную дисперсию (отклонения обусловлены шумом).

По значениям μ и ε определяется тип фильтра:

$$f_{\text{вых}} = \begin{cases} f^M, & \text{если } 1 - \varepsilon < \mu \leq 1; \\ \mu f^M + (1 - \mu) f^{\text{CP}}, & \text{если } \varepsilon \leq \mu \leq 1 - \varepsilon; \\ f^{\text{CP}}, & \text{если } 0 \leq \mu < \varepsilon. \end{cases}$$

Соответственно, имеют смысл значения $\varepsilon \in (0, 0; 0, 5)$. Чем большее значение имеет ε , тем шире полосы медианного фильтра и фильтра скользящего среднего. При малых значениях ε расширяется полоса комбинированного фильтра: при $\varepsilon = 0, 05$ полоса составит $(0, 05; 0, 95)$.

Результаты вычислительных экспериментов

Описание тестового изображения

В качестве тестового изображения использовалось изображение, восстановленное с помощью реконструктора [3, 4] по проекционным данным фантома Шеппа–Логана. Для ухудшения качества изображения на проекционные данные был наложен гауссовый белый шум. Единичные канальные ошибки были смоделированы наложением импульсного шума.

Проекционные данные представлены на рис. 1.



Рис. 1. Фантом Шеппа–Логана: а – исходное изображение; б – зашумлённые проекционные данные

Результаты фильтрации

Полученное изображение было обработано предлагаемым фильтром, а также медианным фильтром и фильтром скользящего среднего в один и два прохода. Результаты фильтрации представлены в табл. 1.

Оценка среднеквадратической ошибки фильтрации производилась по формуле

$$\Delta_1 = \frac{\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J (\bar{f}_{i,j} - f_{i,j})^2}{\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J f_{i,j}^2},$$

где $\bar{f}_{i,j}$ – значение отфильтрованной точки изображения; $f_{i,j}$ – значение исходной точки изображения без искажений и шума.

Оценка относительной ошибки фильтрации производилась по формуле

$$\Delta_2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J (\bar{f}_{i,j} - f_{i,j})^2}{\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J f_{i,j}^2} \right]^{1/2} 100\%,$$

где $\bar{f}_{i,j}$ – значение отфильтрованной точки изображения; $f_{i,j}$ – значение исходной точки изображения без искажений и шума.

Таблица 1

Параметры фильтрации

№ п/п	Параметры	$\Delta_1, 10^{-4}$	$\Delta_2, \%$
1	$k = 0,95, e = 0,05$	3,20	1,79
2	$k = 1,00, e = 0,15$	3,16	1,78
3	$k = 1,05, e = 0,15$	3,15	1,77
4	$k = 1,05, e = 0,25$	3,16	1,78
5	$k = 1,05, e = 0,15$ (рекурсивно, 1 проход)	2,89	1,70
6	$k = 1,05, e = 0,15$ (рекурсивно, 2 проход)	2,65	1,63
7	ФСС, апертура 3×3, 1 проход	8,61	2,93
8	ФСС, апертура 3×3, 2 проход	9,91	3,15
9	ФСС, апертура 5×5, 1 проход	9,56	3,09
10	ФСС, апертура 5×5, 2 проход	15,00	3,87
11	МФ, апертура 3×3, 1 проход	3,55	1,89
12	МФ, апертура 3×3, 2 проход	2,30	1,52
13	МФ, апертура 5×5, 1 проход	1,77	1,33
14	МФ, апертура 5×5, 2 проход	1,32	1,15

Полученные проекционные данные были восстановлены. Рассчитанные ошибки фильтрации представлены в табл. 2, восстановленные изображения представлены на рис. 2.

Таблица 2

Ошибки фильтрации

№ п/п	Параметры	Δ_1	$\Delta_2, \%$
1	Изображение, восстановленное с зашумлёнными проекционными данными	0,2503	50,0
2	ФСС, апертура 5×5, 1 проход	0,0306	17,5
3	МФ, апертура 5×5, 1 проход	0,0295	17,2
4	Комб, $k = 1,05, e = 0,15$	0,0500	22,4
5	Комб, $k = 1,05, e = 0,15$, рекурсивно, 2 прохода	0,0324	18,0

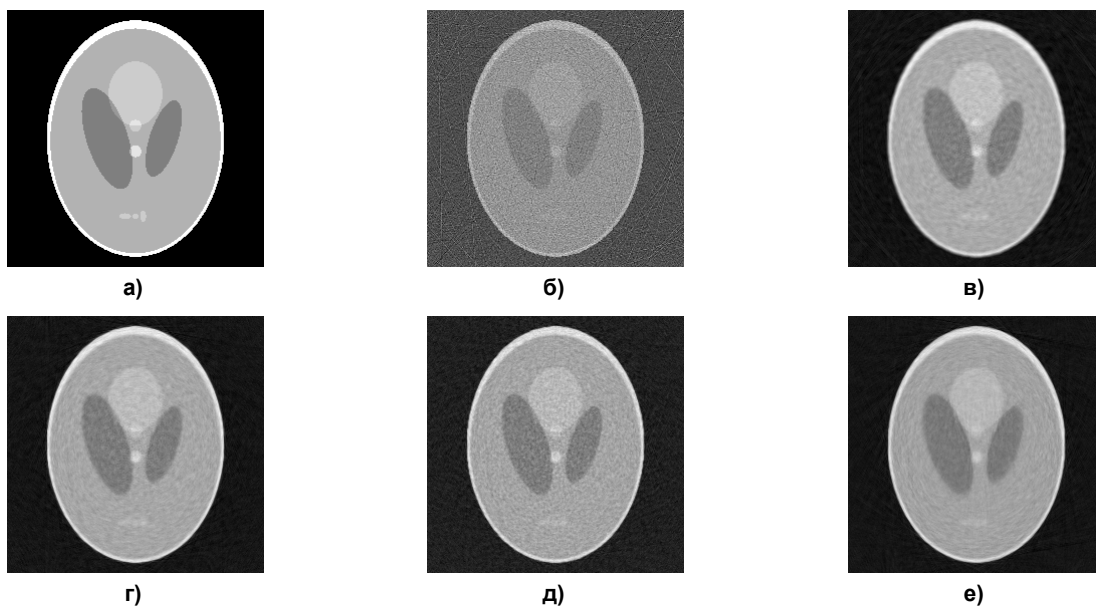


Рис. 2. Восстановленные изображения (1 проход): а – исходное изображение; б – изображение, восстановленное с зашумлёнными проекционными данными; в – фильтр скользящего среднего, апертура 5×5; г – медианный фильтр, апертура 5×5; д – предлагаемый комбинированный фильтр, $k = 1,05, e = 0,15$; е – предлагаемый комбинированный рекурсивный фильтр, $k = 1,05, e = 0,15$

По результатам фильтрации можно сделать вывод, что предлагаемый алгоритм даёт ошибку фильтрации меньшую, чем фильтр скользящего среднего, и сравнимую с ошибкой медианного фильтра. Наименьшая ошибка фильтрации достигается при значениях параметров $k > 1$, $e = 0,15$.

Также можно сделать вывод, что при сравнимом объёме ошибок границы высококонтрастных объектов остаются более резкими, в монотонных областях содержится меньше “зернистости”, что является критичным в томографии.

Заключение

В результате исследований были решены следующие задачи:

- проанализированы существующие адаптивные алгоритмы в области обработки изображений;
- предъявлены требования к создаваемому алгоритму;
- создан и протестирован алгоритм фильтрации изображений с адаптацией размеров апертуры и метода фильтрации к локальным характеристикам изображения;
- оценены погрешности, даваемые алгоритмом, в сравнении с существующими методами фильтрации.

Предложенный алгоритм можно использовать для фильтрации проекционных данных КТ.

Литература

1. Воскобойников, Ю.Е. Алгоритмы фильтрации изображений с адаптацией размеров апертуры / Ю.Е. Воскобойников, В.Г. Белявцев // *Автометрия*. – 1998. – № 3. – С. 18–27.
2. Бронников А.В. Комбинированные алгоритмы нелинейной фильтрации зашумленных сигналов и изображений / А.В. Бронников, Ю.Е. Воскобойников // *Автометрия*. – 1990. – № 1 – С. 21–26.
3. Симонов, Е.Н. Физико-математические основы проектирования томографических рентгеновских компьютерных комплексов / Е.Н. Симонов. – М.: Российская Академия Естествознания, 2011. – 410 с.
4. Симонов, Е.Н. Томографические измерительные информационные системы. Рентгеновская компьютерная томография / Е.Н. Симонов. – М.: НИЯУ МИФИ, 2011. – 440 с.

Ласьков Вячеслав Валерьевич, соискатель, инженер-программист, Российский Федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики им. акад. Е.И. Забабахина (РФЯЦ – ВНИИТФ) (г. Снежинск); snzst86@gmail.com.

Симонов Евгений Николаевич, д-р техн. наук, профессор кафедры радиотехники, Южно-Уральский государственный университет, филиал в г. Кыштыме (г. Кыштым); e.n.simonov@yandex.ru.

Поступила в редакцию 10 апреля 2014 г.

ALGORITHM OF FILTERING OF X-RAY TOMOGRAMS BY ADAPTATION METHOD OF THE SIZE OF A FILTER WINDOW TO LOCAL CHARACTERISTICS OF THE IMAGE

V.V. Laskov, *Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russian Scientific Research Institute of Technical Physics (RFNC – VNIITF), Snezhinsk, Russian Federation, snzst86@gmail.com,*

E.N. Simonov, *South Ural State University, Kyshtym Branch, Kyshtym, Russian Federation, e.n.simonov@yandex.ru*

There are many methods which are used for suppression of artifacts of the computer tomography (CT) now. Usually methods appear from scientific community or from the industry. It is possible to find reports on researches or to listen to reports at conferences for acquaintance with methods. Nevertheless, the considerable part of methods of fight against artifacts is patent means or classified technology and isn't available to a wide range.

The algorithm of images filtering of a medical X-ray computer tomography with adaptation of the sizes of an aperture and a filtering method to local characteristics of the image is offered. The algorithm is implemented in the form of the software and approved on projectional data of tomographic images. The description of algorithm and the formulas which it is based on is provided. The error of this algorithm is evaluated, comparison with existing methods of filtering is given.

Keywords: computed tomography, artifacts, filtering procedure.

References

1. Voskoboynikov Yu.E., Belyavtsev V.G. [Image Processing Algorithms with Aperture Sizes Adaptation]. *Avtometriya*, 1998, no. 3, pp 18–27. (in Russ.)
2. Bronnikov A.V., Voskoboynikov Yu.E. [Combined Algorithms for Nonlinear Processing of Noisy Signals and Images]. *Avtometriya*, 1990, no. 1, pp 21–26. (in Russ.)
3. Simonov E.N. *Fiziko-matematicheskie osnovy proektirovaniya tomograficheskikh rentgenovskikh komp'yuternykh kompleksov* [Physical and Mathematical Basis of the Design of X-ray Tomographic Computer Systems]. Moscow, Russian Academiya of Natural History, 2011. 410 p.
4. Simonov E.N. *Tomograficheskie izmeritelnye informatsionnye sistemy. Rentgenoskaya komp'yuternaya tomografiya* [Tomographic Measuring Information System. X-Ray Computed Tomography]. Moscow NRNU MiFi, 2011. 440 p.

Received 10 April 2014