УДК 519.6

МЕТОДЫ ФИЛЬТРАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ В РЕНТГЕНОВСКОЙ КОМПЬЮТЕРНОЙ ТОМОГРАФИИ

В.В. Ласьков, Е.Н. Симонов

В медицинской рентгеновской компьютерной томографии (КТ) существенная часть вычислений, связанных с созданием изображения КТ, относится к сокращению числа и удалению артефактов.

Теоретически любой артефакт изображения может быть определён как любое различие между реконструированными значениями изображения и истинными коэффициентами затухания объекта. Хотя это определение достаточно широко для того, чтобы покрыть почти все типы неидеальных изображений, оно имеет малое практическое значение, так как почти каждое изображение, полученное от сканера КТ, содержит «артефакты» по этому определению.

В данной работе проведена систематизация методов фильтрации артефактов и шумов изображений применительно к изображениям КТ, рассмотрены их фильтрующие качества, определены наиболее значимые методы и их комбинации для КТ, разработаны алгоритмы и программы для комбинированных (составных) методов фильтрации и осуществлено применение их в программном обеспечении КТ.

Ключевые слова: компьютерная томография, артефакты, метод фильтрации.

Введение

Уменьшение влияния артефактов и шумов на качество томографического изображения проводят путем применения фильтрации проекционных данных, или самого изображения, или того или другого совместно.

Методы фильтрации можно классифицировать следующим образом.

Пространственная фильтрация:

- линейная пространственная фильтрация (с различным размером маски фильтрации):
  - – метод скользящего среднего;
  - – метод взвешенного среднего;
- нелинейная пространственная фильтрация (с различным размером маски фильтрации):
  - – медианная;
  - – метод первой производной;
  - – метод второй производной (лапласиан);
  - – эквализация;
  - – комбинированные фильтры;
- адаптивная пространственная фильтрация:
  - – адаптивные локальные фильтры;
  - – адаптивные медианные фильтры;
  - – рекурсивные фильтры;
  - – адаптивные оптимальные фильтры.

Частотная фильтрация:

- – низкочастотные фильтры;
- – высокочастотные фильтры;
- – режекторные (полосовые) фильтры.

Вейвлет-фильтрация.

Линейная пространственная фильтрация основана на определении среднего значения в определенной окрестности, покрытой маской фильтра. Фильтрация исходного изображения проводится последовательно для каждого пикселя изображения, который накрывается маской фильтра, координаты центрального элемента которой совпадают с координатами фильтруемого пикселя изображения.

В общем виде отфильтрованное изображение $g(x,y)$ можно представить в следующем виде:

$$g(x,y)=\frac{\sum_{S=-a}^{a}\sum_{S=-b}^{b} w(s,t)\,f(x+s,y+t)}{\sum_{S=-a}^{a}\sum_{S=-b}^{b} w(s,t)}, \quad (1)$$

где $f(x+s,y+t)$ – исходное изображение; s и t – координаты маски фильтра; $w(s,t)$ – значения маски; $a=(m-1)/2$, $b=(n-1)/2$, где m и n размеры маски фильтра; минимальный размер маски $m\times n$ равен 3×3.

Формула (1) описывает метод средневзвешенной фильтрации, при $w(s,t)=1$ для всех координат маски обращается в метод скользящего среднего.

Линейная пространственная фильтрация «убирает» высокие пространственные частоты и потому уменьшает резкость изображения.

Нелинейная пространственная фильтрация основана на порядковых статистиках.

Медианную фильтрацию можно представить в следующем виде:

$$g(x,y)=\underset{(s,t)\in S_{xy}}{\operatorname{med}}\left\{f(x,y)\right\}, \quad (2)$$

где S_{xy} – прямоугольная окрестность размерами $m\times n$ с центром в точке (x,y).

Медианная фильтрация в меньшей степени «убирает» высокие пространственные частоты и потому хорошо фильтрует артефакты и шумы с некоторым сохранением резкости изображения.

К фильтрам повышения резкости изображения относятся фильтры, основанные на первой и второй производной. Для фильтрации артефактов и шумов фильтры, основанные на первой и второй производной, напрямую, как правило, не используются. Эти фильтры используются как часть комбинированных сложных фильтров. Примером может служить фильтрация

$$g(x,y)=f(x,y)-\nabla^2 f(x,y), \text{ если } w(0,0)<0; \quad (3)$$

$$g(x,y)=f(x,y)+\nabla^2 f(x,y), \text{ если } w(0,0)\geq 0. \quad (4)$$

Эквализация изображения предполагает изменение гистограммы его яркости с выделением определенного ее диапазона. Для фильтрации артефактов и шумов эквализация напрямую не применяется, она используется в сложных комбинированных фильтрах – фильтрах, состоящих из последовательности описанных ранее фильтров.

Наиболее эффективными фильтрами изображения и, как правило, наиболее сложными являются адаптивные фильтры.

Фильтрацию с применением адаптивных локальных фильтров можно представить в следующем виде:

$$g(x,y)=f(x,y)-\frac{\sigma_\eta^2}{\sigma_L^2}\left[f(x,y)-m_L\right], \quad (5)$$

где σ_η^2 – дисперсия шума общего изображения; σ_L^2 – локальная дисперсия в окрестности S_{xy}; m_L – локальное среднее в окрестности S_{xy}.

Адаптивный локальный фильтр работает следующим образом:

- если дисперсия шума σ_η^2 равна нулю, то $g(x,y)=f(x,y)$;
- если локальная дисперсия σ_L^2 много больше σ_η^2, то $g(x,y)=f(x,y)$;
- если обе дисперсии принимают значения одного порядка, то $g(x,y)=m_L$.

Применение адаптивного медианного фильтра позволяет изменять размер маски фильтра и сохранять более мелкие детали изображения.

Более эффективными являются рекурсивные фильтры и адаптивные оптимальные фильтры. С ними можно ознакомиться в статье [1].

Особое место в фильтрации изображений занимают методы, основанные на преобразовании Фурье – частотные методы. Эти методы, как правило, применяются для уменьшения периодических артефактов и шумов.

Базовая модель частотных методов выглядит следующим образом:

$$G(\omega_1,\omega_2)=H(\omega_1,\omega_2)F(\omega_1,\omega_2), \quad (6)$$

где $G(\omega_1,\omega_2)$ – фурье-образ отфильтрованного изображения; $F(\omega_1,\omega_2)$ – фурье-образ исходного изображения; $H(\omega_1,\omega_2)$ – фильтр (фурье-образ передаточной функции); ω_1,ω_2 – пространственные частоты, соответственно, по осям X и Y изображения.

Выбор функции $H(\omega_1,\omega_2)$ определяет область фильтрации частот: низкочастотные, высокочастотные и режекторные (полосовые) фильтры.

Особую группу фильтров представляют фильтры, основанные на вейвлет-преобразовании. Вейвлет-преобразование – это наиболее тонкий инструмент фильтрации двухмерных сигналов (изображений). Вейвлет-преобразование, в отличие от Фурье-преобразования, обладает свойством однозначного соответствия пространственной области и частотной, а также более избирательной способностью фильтрации изображений с резкими перепадами локальных областей и импульсным шумом.

Более подробно с вейвлет-фильтрацией можно ознакомиться в статье [2].

Были разработаны алгоритмы и программы для комбинированных (составных) методов фильтрации и применены в программном обеспечении рентгеновского компьютерного томографа для всего тела человека РКТ-01 [3, 4].

Реализация некоторых фильтров томографических изображений в системе Matlab представлена ниже.

1. Фильтрация в пространственной области

На рис. 1 показаны томограммы мозга человека после фильтрации исходной томограммы комбинированными фильтрами в пространственной области с применением формул (1)–(5).

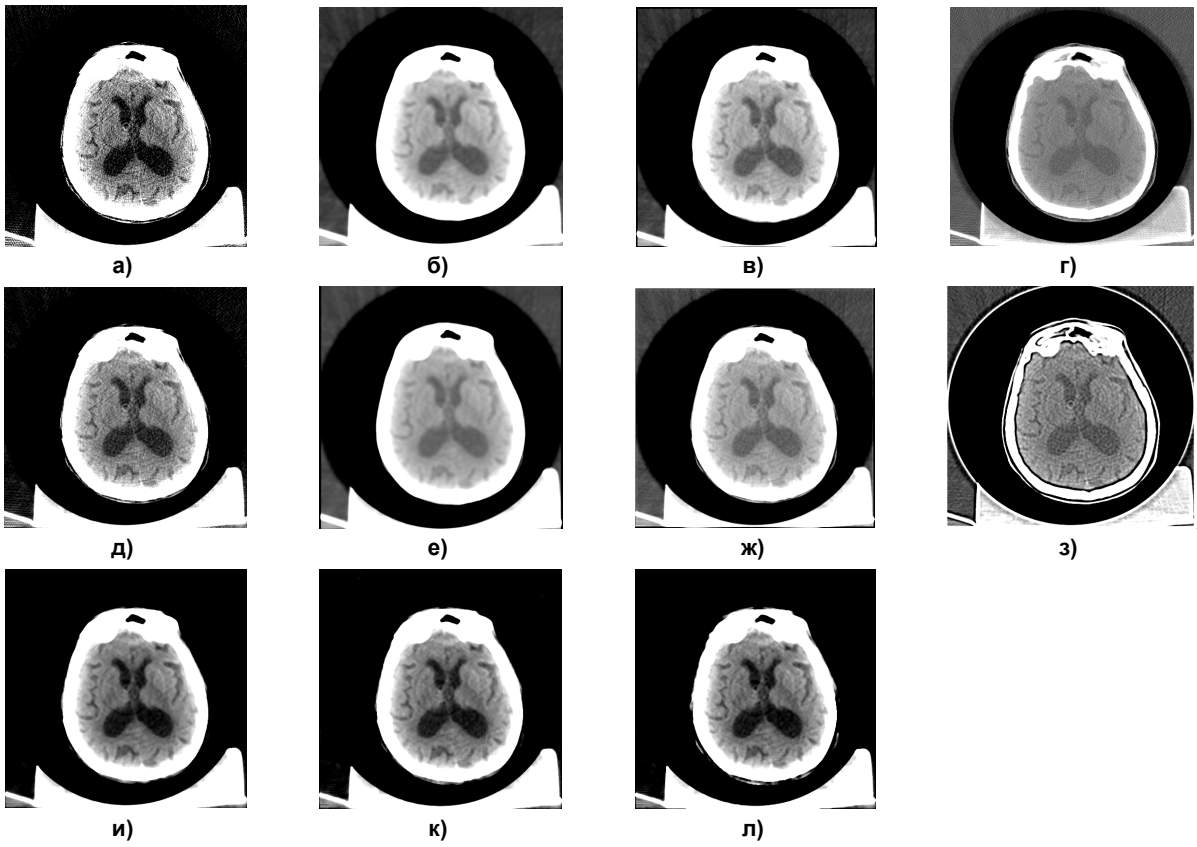
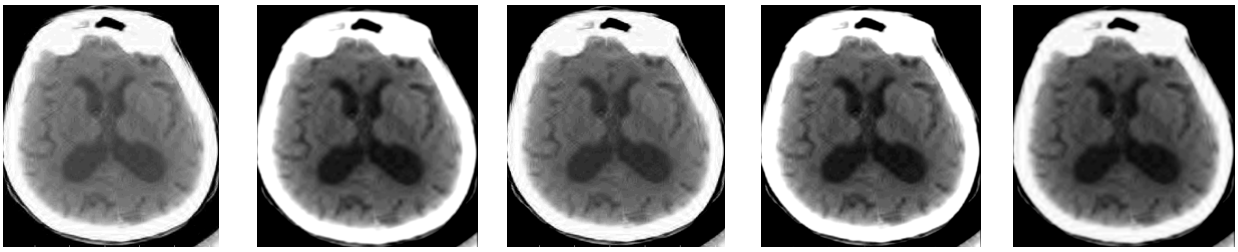


Рис. 1: а – исходная томограмма; б, в – после применения выравнивания гистограммы яркости совместно с медианным фильтром с различной величиной маски; г–е – после применения гауссовского фильтра совместно с выравниванием гистограммы яркости и лапласианом; ж–и – с выделением колец лапласианом, их вычитанием и медианной фильтрацией; к, л – после применения адаптивной медианной фильтрации

2. Фильтрация в частотной области

На рис. 2 показаны томограмы мозга человека после фильтрации исходной томограммы комбинированными фильтрами в частотной области.



а) б) в) г) д)

Рис. 2: а – исходная томограмма; б, в – с применением фильтра низких частот; г – с применением фильтра высоких частот; д – с применением режекторного фильтра

3. Вейвлет-фильтрация

На рис. 3 показаны томограмы мозга человека после вейвлет-фильтрации исходной томограммы.

а) б)

Рис. 3: а – исходная томограмма; б – с применением вейвлета Добеши db4

Заключение

Результаты исследований по фильтрации артефактов и шумов на томографических изображениях показали высокую эффективность применения комбинированных фильтров, основанных на нелинейных методах фильтрации.

Разработанные алгоритмы и программы внедрены в ПО рентгеновского компьютерного томографа для всего тела человека РКТ-01 и могут быть применены также в других медицинских томографических комплексах.

Литература

1. Гонсалес, Р. Цифровая обработка изображений: пер. с англ. / Р. Гонсалес, Р. Вудс. – М.: Техносфера, 2005. – 1070 с.

2. Соломенцев, Н.К. Основы теории вейвлетов / Н.К. Соломенцев. – М.: ДМК, 2008. – 445 с.

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.

Bulletin of the South Ural State University
Series "Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics"
2014, vol. 14, no. 3, pp. 29–33

METHODS OF IMAGE FILTERING IN THE X-RAY COMPUTED TOMOGRAPHY

***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*

The essential part of the computation connected with creation of the image of KT belongs to abbreviation of number and deleting artifacts in the medical X-ray computer tomography (CT).

Theoretically, any artifact of the image can be defined as any distinction between the reconstructed values of the image and the true attenuation coefficients of object. Though this determination is rather wide to cover almost all types of imperfect images, it has small practical value because almost each image received from the KT scanner contains "artifacts" by this determination.

Systematization of methods of filtering of artifacts and images noises in relation to CT images is carried out, their filtering qualities are considered, the most significant methods and their combinations for CT are defined, algorithms and programs for combined (composite) methods of filtering are developed and their application in CT software is realized.

Keywords: computed tomography, artifacts, filtering procedure.

References

1. Gonzalez R., Woods R. *Tsifrovaya obrabotka izobrazheniy* [Digital Image Processing]. Moscow, Technosfera, 2005. 1070 p.

2. Solomentsev N.K. *Osnovy teorii veyvletov* [Basics of the Wavelet Theory]. Moscow, DMK, 2008. 445 p.

3. Simonov E.N. *Fiziko-matematicheskie osnovy proektirovania tomograficheskikh rentegenovskikh 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