

5. Гузев В.В., Верешагин В.И., Гузев В.В. Покрытия на основе фосфатных связующих // Стекло и керамика. 2000. № 6.
6. Аронов А.М., Пичугин В.Ф., Ещенко Е.В., Рябцева М.А., Сурменев Р.А., Твердохлебов С.И., Шестериков Е.В. Тонкие кальций-фосфатные покрытия, полученные методом высокочастотного магнетронного распыления, и перспективы их применения в медицинской технике // Медицинская техника. 2008. № 3. С. 18-22.
7. Хенч Л., Джонс Д. Биоматериалы, искусственные органы и инжиниринг тканей. – М.: Техносфера, 2007.
8. Баринов С.М., Комлев В.С. Биокерамика на основе фосфатов кальция. – М.: Наука, 2005.
9. Катаева В.М., Попова В.А., Сажина Б.И. Справочник по пластическим массам. Т. 1. – М.: Химия, 1975.
10. Графская Н.Д. Сравнительная оценка сетчатых полимерных материалов как алопротезов брюшной сетки при грыжах / Диссертация на соискание степени канд. мед. наук. – М.: Институт хирургии им. А.В. Вишневского Академии медицинских наук СССР, 1967.
11. <http://lintex.ru/page42.html>.
12. Гурин А.Н., Комлев В.С., Федотов А.Ю., Фадеева И.В., Смирнов В.В., Баринов С.М. // Перспективные материалы. 2008. № 3. С. 1-4.
13. Калита В.И., Соколов В.Н., Парамонов В.А. Трехмерные капиллярно-пористые покрытия // Физика и химия обработки материалов. 2000. № 4. С. 55-61.
14. Correa F.J., Ota Rogeroa B.S., Couto A.A., Costa Marques R.F., Ribeiro A.A., Campos J.S. Characterization of PVDF/HAP Composites for Medical Applications // Materials Research. 2007. Vol. 10. № 3. PP. 247-251.

Анатолий Маркович Аронов,
д-р эконом. наук,
директор по научно-техническому развитию,
Сибирский научно-исследовательский и
испытательный центр медицинской техники,
г. Новосибирск,
Евгений Николаевич Больбасов,
научный сотрудник,
Виталий Васильевич Гузев,
д-р техн. наук, профессор, ст. научный сотрудник,
Марина Владимировна Дворниченко,
канд. мед. наук, научный сотрудник,
Томский филиал ФГУ «Российский научный центр
«Восстановительная травматология и
ортопедия» им. академика Г.А. Илизарова
Росмедтехнологий», г. Томск,
Сергей Иванович Твердохлебов,
канд. физ.-мат. наук, доцент,
кафедра теоретической и экспериментальной физики,
ГОУ ВПО «Томский политехнический университет»,
Игорь Альбертович Хлусов,
и.о. директора,
Томский филиал ФГУ «Российский научный центр
«Восстановительная травматология и
ортопедия» им. академика Г.А. Илизарова
Росмедтехнологий», г. Томск,
e-mail: tverd@tpu.ru

С.А. Лаэров, Е.Н. Симонов

АЛГОРИТМ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ПРОЕКЦИОННЫХ ДАННЫХ ВЕРНОЙ ГЕОМЕТРИИ В ПАРАЛЛЕЛЬНУЮ ПРИ РЕКОНСТРУКЦИИ ТОМОГРАФИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Аннотация

В статье приведены алгоритмы реконструкции изображения по методу обратного проецирования с фильтрацией сверткой для верной и параллельной геометрий сканирования. Представлен алгоритм «перегруппировки» проекций верной геометрии пучка излучения в проекцию параллельной геометрии.

Приведен анализ влияния параметров «перегруппировки» (число детекторов, число ракурсов) на уровень ошибки между реконструированным изображением в верной геометрии и в параллельной после «перегруппировки» проекционных данных.

Введение

В медицинской рентгеновской компьютерной томографии для получения минимального времени сканирования объекта и сбора информации применяется в основном реконструкция томографического изображения в верных лучах (используется тонкий верный пучок рентгеновского излучения).

Однако время реконструкции томографического изображения с использованием прямых алгоритмов реконструкции для верной геометрии пучка можно уменьшить, используя геометрию парал-

лельных лучей [1]. Для сканирования объекта в верной геометрии требуется значительно меньше времени, чем в параллельной. Поэтому естественным способом уменьшения общего времени сканирования и реконструкции является применение верной геометрии сканирования с последующей «перегруппировкой» верных проекций в параллельные и реконструкция томографического изображения в параллельной геометрии. Но «перегруппировка» приводит к искажениям проекционных данных, вследствие чего происходит потеря качества восстанавливаемого изображения.

В данной статье рассматривается вопрос: какие параметры «перегруппировки» (число детекторов, число ракурсов) следует применять для уменьшения уровня ошибки между реконструированным изображением в веерной геометрии и в параллельной после «перегруппировки» проекционных данных.

Реконструкция томографического изображения в веерных лучах

На рис. 1 показаны геометрические соотношения для веерного луча, заданного двумя параметрами γ, β . Пусть O – начало координат; U – положение источника излучения на окружности радиусом D с центром в точке O . Каждый луч задается как элемент множества лучей (γ, β) , где β – угол наклона прямой OU , а γ – угол между рассматриваемым лучом и прямой OU .

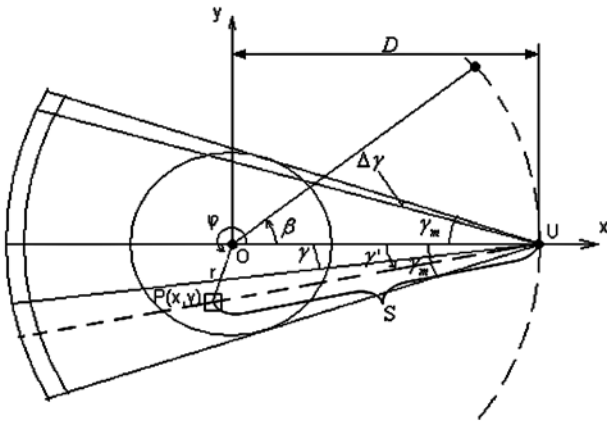


Рис. 1. Веерная геометрия сканирования

Томографический параметр $\mu(x, y)$ для рентгеновской томографии – это плотность объекта исследования в точке (x, y) , для веерной геометрии его получают следующим образом (рис. 1):

$$\mu(x, y) = \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} \frac{1}{S^2} d\beta \int_{-\gamma_m}^{+\gamma_m} \tilde{q}(\gamma, \beta) \cdot \tilde{g}(\gamma' - \gamma) d\gamma, \quad (1)$$

где $\tilde{q}(\gamma, \beta) = q(\gamma, \beta) \cdot D \cdot \cos \gamma$ – проекция для веерной геометрии;

$$\tilde{g}(\gamma' - \gamma) = g(\gamma' - \gamma) \frac{(\gamma' - \gamma)^2}{\sin^2(\gamma' - \gamma)}$$

– ядро свертки для веерной геометрии;

$$S^2 = r^2 + D^2 - 2D \cdot r \cdot \cos(\beta - \varphi); \quad (2)$$

$q(\gamma, \beta)$ – исходные проекционные данные, полученные с детектора; S – расстояние между точками U и P ; γ' – угол между отрезками OU и UP ; φ – угол между отрезками OU и OP .

При использовании дискретных значений отсчетов по углам γ и β , обусловленных соответственно построением детекторов и организацией ракурсов, уравнения аппроксимируют для последующего расчета на ЭВМ, т. е. γ и β берут с соответствующими

индексами дискретизации, а интегрирование заменяется суммированием. В этом случае уравнение (1) примет вид

$$\mu(x, y) = \frac{\Delta\beta \cdot \Delta\gamma}{2} \sum_{j=1}^{M_1} \frac{1}{S^2} \sum_{i=-N_1/2}^{N_1/2-1} \tilde{q}(\gamma_i, \beta_j) \cdot \tilde{g}(\gamma' - \gamma_i),$$

где $\Delta\gamma$ – угол между соседними отсчетами детектора; $\Delta\beta$ – угол между соседними ракурсами; i – индекс отсчета детектора, $i = -(N_1 - 1)/2, \dots, (N_1 - 1)/2$ (N_1 – число отсчетов детектора); $j = 1, \dots, M_1$ (M_1 – число отсчетов ракурса); $q(\gamma_i, \beta_j)$ – исходные проекционные данные с детектора.

Реконструкция томографического изображения в параллельных лучах

На рис. 2 показаны геометрические соотношения для параллельного луча, заданного двумя параметрами (l, θ) . Пусть O – начало координат; E – точка у основания перпендикуляра, опущенного из точки O к линейке детекторов. Каждый луч задается как элемент множества лучей (l, θ) , где θ – угол наклона прямой OE , а l – расстояние между рассматриваемым детектором и прямой OE .

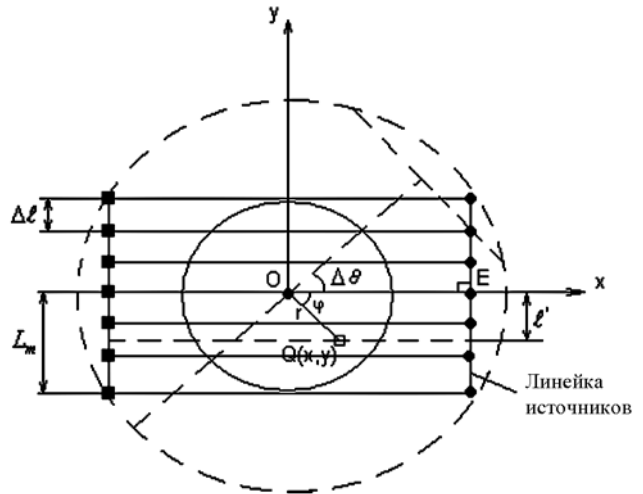


Рис. 2. Параллельная геометрия сканирования

Томографический параметр $\mu(x, y)$ для параллельной геометрии получается следующим образом (рис. 2):

$$\mu(x, y) = \int_0^{\pi} d\theta \int_{-L_m}^{+L_m} q(l, \theta) \cdot g(l' - l) dl, \quad (3)$$

где $g(l' - l)$ – ядро свертки для параллельной геометрии; $q(l, \theta)$ – исходные проекционные данные; l' – расстояние между точкой Q и прямой OE ; φ – угол между отрезками OE и OQ .

При использовании дискретных значений отсчетов l и θ , обусловленных соответственно построением детекторов и организацией ракурсов, уравнения аппроксимируют для последующего расчета на ЭВМ, т. е. l и θ берут с соответствующими индексами дискретизации, а интегрирование заменяется суммированием. В этом случае уравнение (3) примет вид

$$\mu(x, y) = \Delta\theta \cdot \Delta\ell \sum_{c=1}^{M_2} \sum_{k=-N_2/2}^{N_2/2-1} q(\ell_k, \theta_c) \cdot g(\ell' - \ell_k),$$

где $\Delta\ell$ – расстояние между соседними отсчетами детектора; $\Delta\theta$ – угол между соседними ракурсами; k – индекс отсчета детектора, $k = -(N_2 - 1) / 2, \dots, (N_2 - 1) / 2$ (N_2 – число отсчетов детектора); c – индекс отсчета ракурса, $c = 1, \dots, M_2$ (M_2 – число отсчетов ракурса); $q(\ell_k, \theta_c)$ – исходные проекционные данные с детектора.

«Перегруппировка»

«Перегруппировку» проекционных данных из веерной геометрии в параллельную производят следующим образом.

Количество отсчетов детектора и ракурсов, а также матрицу проекционных данных для веерной геометрии мы обозначим соответственно через N_1, M_1 и A_1 , для параллельной геометрии соответственно – N_2, M_2 и A_2 .

Следовательно, надо из матрицы $A_1(D \cdot \sin(j \cdot \Delta\gamma), i \cdot \Delta\gamma + j \cdot \Delta\beta)$, $-(N_1 - 1) / 2 \leq i \leq (N_1 - 1) / 2, 1 \leq j \leq M_1$, получить матрицу $A_2(k \cdot \Delta\ell, c \cdot \Delta\theta)$, $-(N_2 - 1) / 2 \leq k \leq (N_2 - 1) / 2, 1 \leq c \leq M_2$.

Для получения матрицы A_2 нужно провести интерполяцию, например линейную. Интерполируя набор веерных данных $A_1(D \cdot \sin(j \cdot \Delta\gamma), i \cdot \Delta\gamma + j \cdot \Delta\beta)$ по значениям $i \cdot \Delta\gamma + j \cdot \Delta\beta$, мы получим наборы параллельных, но не эквидистантных проекционных данных $A(D \cdot \sin(i \cdot \Delta\gamma), c \cdot \Delta\theta)$. Сделав вторую интерполяцию $A(D \cdot \sin(i \cdot \Delta\gamma), c \cdot \Delta\theta)$ по значениям $D \cdot \sin(i \cdot \Delta\gamma)$, мы получим матрицу $A_2(k \cdot \Delta\ell, c \cdot \Delta\theta)$.

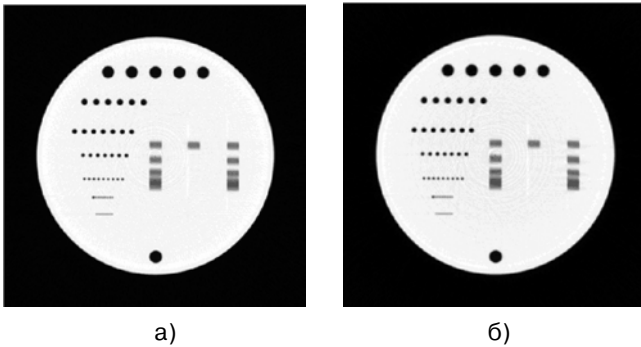


Рис. 3. Примеры реконструированных изображений для веерной геометрии (а) и параллельной после «перегруппировки» (б)

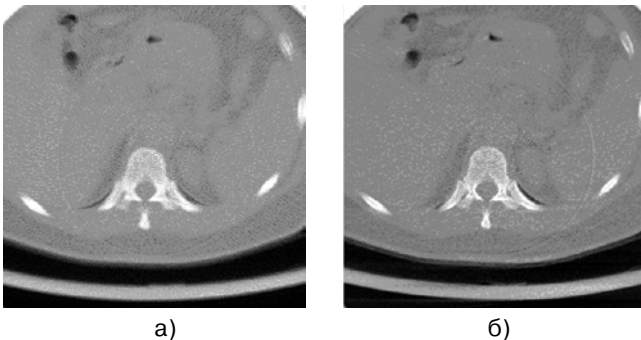


Рис. 4. Примеры реконструированных изображений для веерной геометрии (а) и параллельной после «перегруппировки» (б)

Анализ результатов

Приведем примеры изображений, полученные для веерной и параллельной геометрий при «перегруппировке» веерных проекций.

Реконструкция изображений проводилась при:

- количестве ракурсов 600;
- количестве детекторов 512 (величина отсчета на детекторе 1,56 мм);
- матрица изображения 512×512 пикселей.

На рис. 3 и 4 приведены восстановленные при помощи алгоритма изображения для веерной (а) геометрии и параллельной (б) геометрии. Для параллельной геометрии изображения получены вследствие «перегруппировки» веерных проекционных данных.

Качественный анализ полученных изображений (рис. 3, 4) для веерной геометрии и параллельной после «перегруппировки» показывает практически их идентичность.

Был проведен более детальный количественный анализ изображений для веерной и параллельной геометрий после «перегруппировки» (рис. 5, 6).

Для оценки погрешности были использованы две оценки уровней ошибок реконструкции между изображениями [2]: $t_{i,j}$ и $h_{i,j}$ – плотности i -го элиза в j -й строке матриц реконструкций для веерной и параллельной (после «перегруппировки») геометрий соответственно. (Матрицы изображений имеют размер $\xi \times \xi$.)

$$d_1 = \frac{\sum_{i=1}^{\xi} \sum_{j=1}^{\xi} |t_{i,j} - h_{i,j}|}{\sum_{i=1}^{\xi} \sum_{j=1}^{\xi} |t_{i,j}|}; \quad d_2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^{\xi} \sum_{j=1}^{\xi} (t_{i,j} - h_{i,j})^2}{\sum_{i=1}^{\xi} \sum_{j=1}^{\xi} (t_{i,j})^2} \right)^{1/2},$$

где d_1 – нормированная абсолютная средняя мера различия; d_2 – средняя квадратичная ошибка реконструкции.

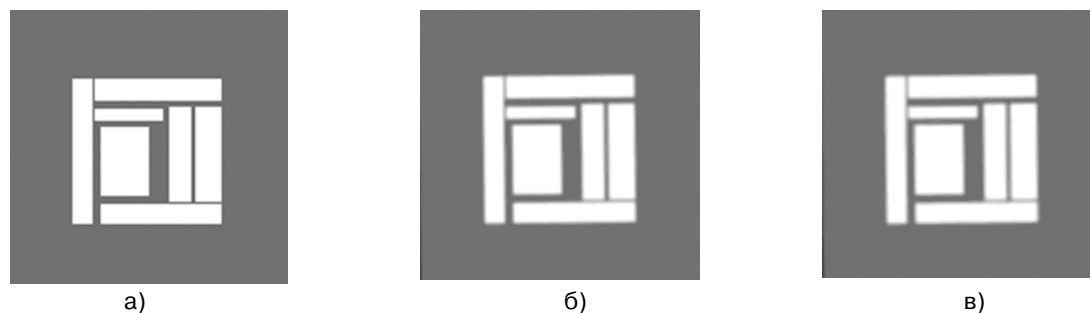
На рис. 5 приведены высококонтрастные (контрастность более 50 %) изображения: а) исходной модели; б) реконструированной модели для веерной геометрии; в) реконструированной модели для параллельной геометрии после «перегруппировки».

На рис. 6 представлено сравнение профилей сечений реконструированных объектов.

Колебания, отличающие параллельную геометрию от веерной, образуются из-за «перегруппировки». При переходе от веерных проекционных данных к параллельным используется интерполяция, которая и обуславливает разность в полученных результатах.

Отличия образуются на границах областей с разными поглощающими коэффициентами. В данном примере такие отклонения составляют: $d_1 = 0,0070$; $d_2 = 0,0088$.

Рассмотрим низкоконтрастную модель (контрастность 0,8 %). На рис. 7 приведены изображения: а) исходной модели; б) реконструированной модели для веерной геометрии; в) реконструированной модели для параллельной геометрии после «перегруппировки».



а)

б)

в)

Рис. 5. а) Исходный объект; б) реконструированный объект для веерной геометрии; в) реконструированный объект для параллельной геометрии после «перегруппировки»

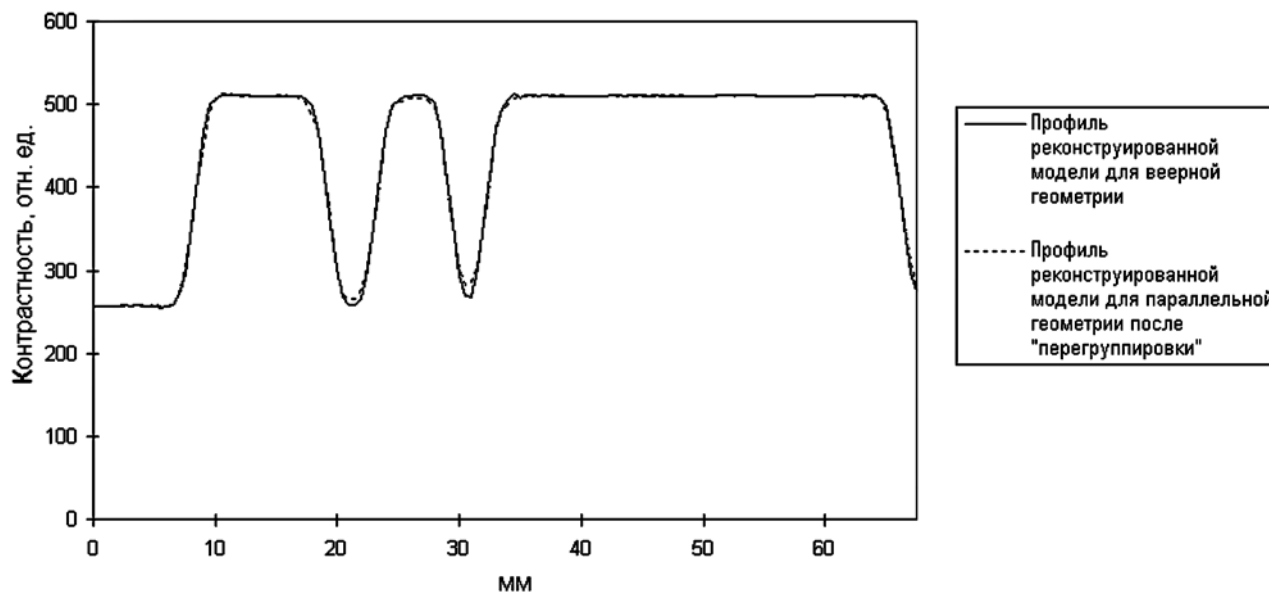


Рис. 6. Сравнение профилей сечений моделей, изображенных на рис. 5б, в

На рис. 8 представлено сравнение профилей сечений реконструированных объектов.

Отличия образуются на границах областей с разными поглощающими коэффициентами. В данном примере такие отклонения составляют: $d_1 = 0,0080$; $d_2 = 0,0100$.

Было проведено исследование влияния количества детекторов и ракурсов на погрешность, обусловленную «перегруппировкой». Исследование проводилось путем моделирования объекта и многократного его «прогона» через реконструктор для веерной и параллельной (после «перегруппировки») геометрий и последующего анализа погрешности изображений.

В табл. 1 и 2 приведены оценки уровней ошибок реконструкции для моделей, изображенных соответственно на рис. 5 и 7, при различном числе детекторов и ракурсов. Повторимся, что для этих случаев в реконструкции для веерной геометрии было 512 детекторов (величина отсчета на детекторе 1,56 мм) и 600 ракурсов.

Полученные результаты представлены на рис. 9.

В табл. 3 и 4 приведены оценки уровней ошибок реконструкции для моделей, изображенных соответственно на рис. 5 и 7, при различном числе детекторов и ракурсов, но для этих случаев в ре-

конструкции для веерной геометрии было 512 детекторов (величина отсчета на детекторе 1,56 мм) и 240 ракурсов.

Полученные результаты представлены на рис. 10.

Далее, говоря об уменьшении или увеличении числа ракурсов или детекторов, мы подразумеваем уменьшение или увеличение их в «перегруппировке» относительно числа ракурсов или детекторов, используемых при сборе данных в веерной геометрии.

Анализ ошибок реконструкций в табл. 1-4 показывает:

- с увеличением числа ракурсов уровень ошибки реконструкции изображений для веерной геометрии и параллельной после «перегруппировки» уменьшается как для высококонтрастных, так и для низкоконтрастных объектов;
- количественный анализ указывает на существование областей, в которых уровень ошибки реконструкции уменьшается с уменьшением числа детекторов;
- также существует переходная область, в которой с увеличением или уменьшением числа детекторов и при неизменном числе ракурсов уровень ошибки реконструкции увеличивается;

Таблица 1

Таблица 2

Уровни ошибок реконструкции изображений для высококонтрастных объектов

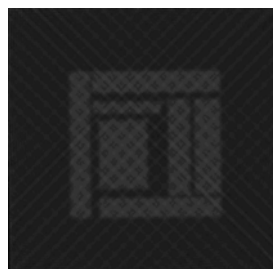
Число детекторов	Ошибки реконструкции	Число ракурсов			
		120	240	600	1000
256	d_1	0,0247	0,0105	0,0083	0,0082
256	d_2	0,0315	0,0148	0,0132	0,0132
512	d_1	0,0269	0,0099	0,0070	0,0069
512	d_2	0,0348	0,0121	0,0088	0,0088
1024	d_1	0,0284	0,0100	0,0065	0,0057
1024	d_2	0,0371	0,0126	0,0079	0,0071

Уровни ошибок реконструкции изображений для низкоконтрастных объектов

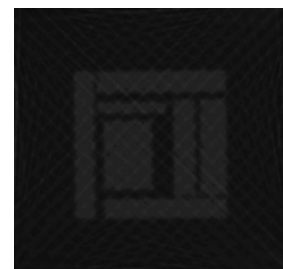
Число детекторов	Ошибки реконструкции	Число ракурсов			
		120	240	600	1000
256	d_1	0,0275	0,0118	0,0091	0,0090
256	d_2	0,0388	0,0186	0,0165	0,0165
512	d_1	0,0298	0,0118	0,0080	0,0079
512	d_2	0,0423	0,0147	0,0100	0,0099
1024	d_1	0,0311	0,0118	0,0074	0,0068
1024	d_2	0,0454	0,0160	0,0099	0,0090



а)



б)



в)

Рис. 7. а) Исходный объект; б) реконструированный объект для веерной геометрии; в) реконструированный объект для параллельной геометрии после «перегруппировки»

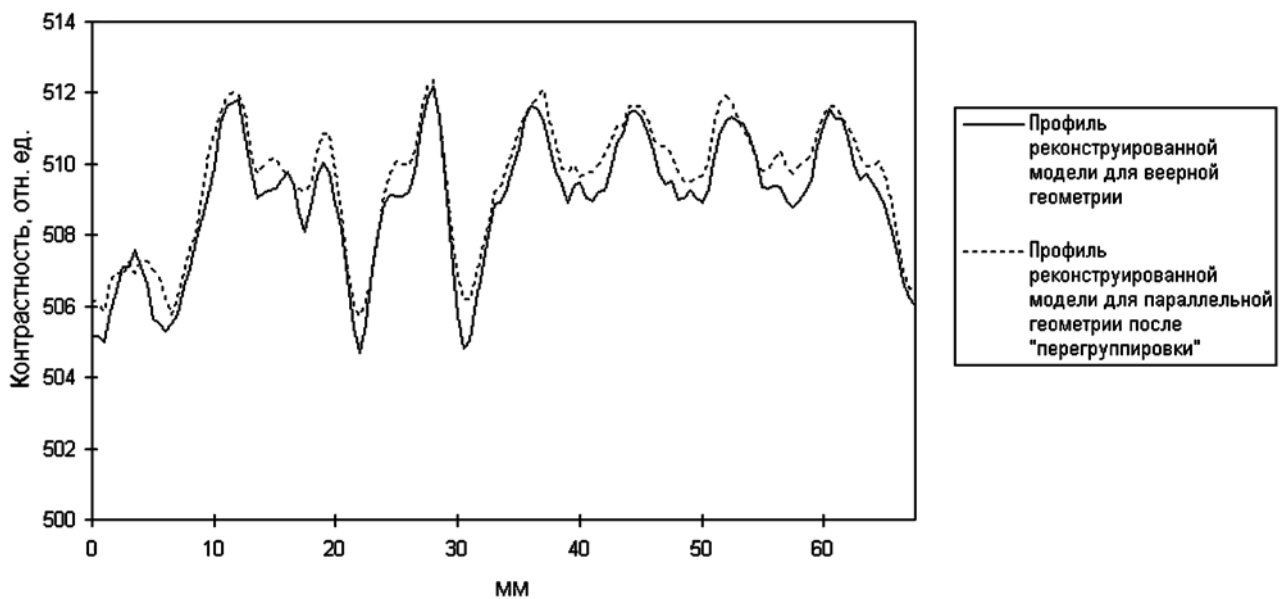


Рис. 8. Сравнение профилей сечений моделей, изображенных на рис. 7б, в

- если число ракурсов увеличивается (находится за переходной областью), тогда следует увеличить и число детекторов в «перегруппировке». Если число ракурсов существенно уменьшается (находится перед переходной областью), тогда следует уменьшить и число детекторов в «перегруппировке»;
 - если взять d_2 , характеризующую среднюю квадратическую ошибку в реконструкции изображений за счет «перегруппировки», то для высококонтрастных объектов эта мера различия, например, для условий, представленных в табл. 1, может составлять до 1 %, для низкоконтрастных объектов – до 1 %;
 - если взять d_1 , характеризующую нормированную абсолютную среднюю меру различия в реконструкции изображений за счет «перегруппировки», то для высококонтрастных объектов она может составлять до 1 % (при условиях, приведенных в табл. 1).
- При реконструкции изображений в параллельной геометрии после «перегруппировки» следует

Таблица 3

Таблица 4

Уровни ошибок реконструкции изображений для высококонтрастных объектов

Число детекторов	Ошибки реконструкции	Число ракурсов			
		120	240	600	1000
256	d_1	0,0243	0,0131	0,0123	0,0123
256	d_2	0,0317	0,0181	0,0172	0,0172
512	d_1	0,0261	0,0117	0,0109	0,0108
512	d_2	0,0341	0,0151	0,0136	0,0136
1024	d_1	0,0272	0,0113	0,0099	0,0096
1024	d_2	0,0355	0,0150	0,0128	0,0123

Уровни ошибок реконструкции изображений для низкоконтрастных объектов

Число детекторов	Ошибки реконструкции	Число ракурсов			
		120	240	600	1000
256	d_1	0,0264	0,0150	0,0140	0,0140
256	d_2	0,0399	0,0244	0,0226	0,0226
512	d_1	0,0280	0,0139	0,0126	0,0125
512	d_2	0,0417	0,0209	0,0175	0,0174
1024	d_1	0,0286	0,0133	0,0116	0,0114
1024	d_2	0,0430	0,0209	0,0170	0,0166

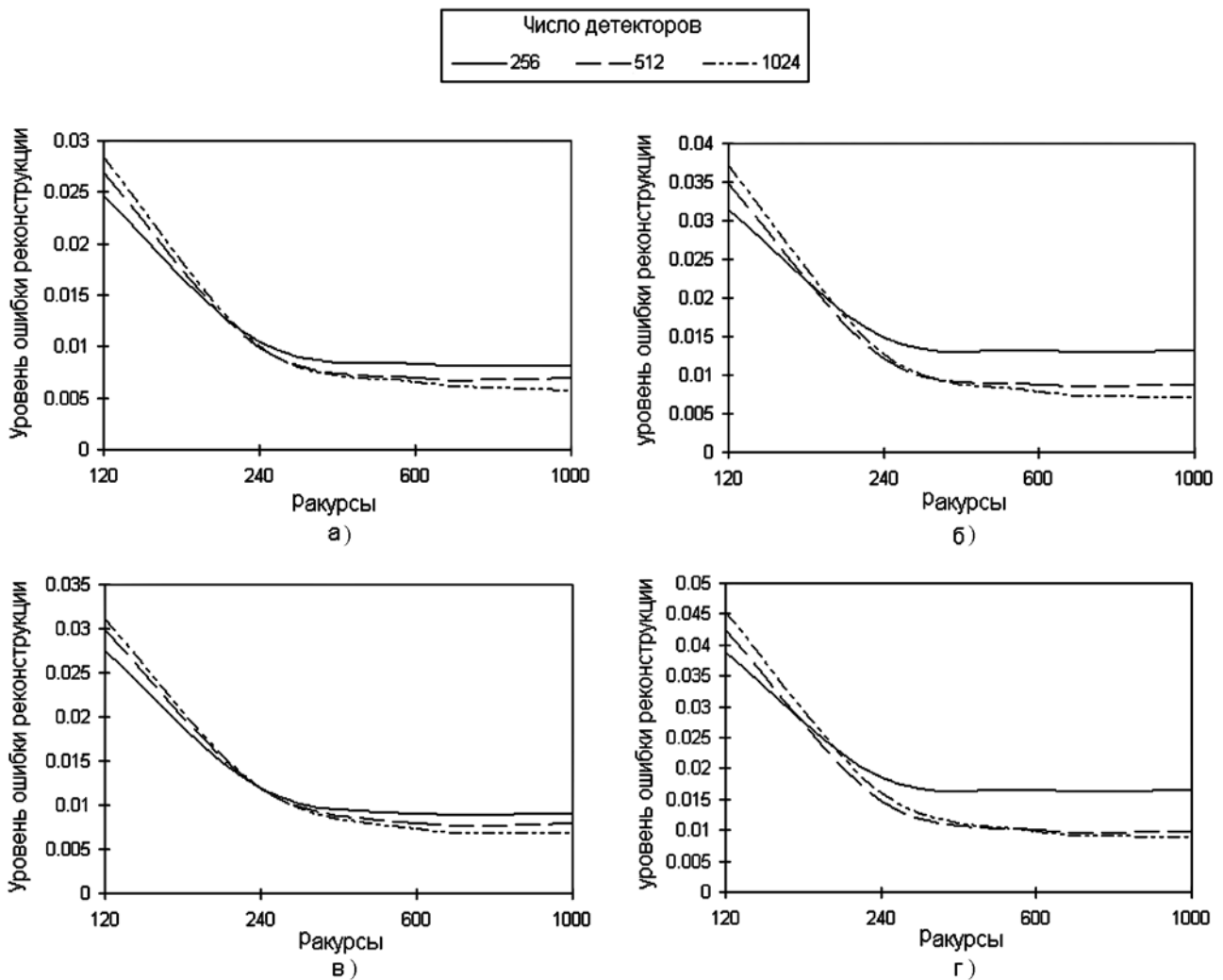


Рис. 9. Зависимость уровня ошибки реконструкции от числа ракурсов: а) высококонтрастная модель – d_1 ; б) высококонтрастная модель – d_2 ; в) низкоконтрастная модель – d_1 ; г) низкоконтрастная модель – d_2

учитывать, с какими параметрами происходил сбор данных в веерной геометрии. Хотя качественный анализ говорит, что увеличение числа ракурсов или/и числа детекторов в «перегруппировке» ведет к лучшей реконструкции объекта, количественный анализ говорит о существовании областей, где это правило не работает.

Если рассматривать другие типы КТ: спиральную однослойную, спиральную мультислойную, конусную трехмерную суперслойную, то во всех них базовым алгоритмом реконструкции томографического изображения является вышеописанный алгоритм веерной геометрии с «перегруппировкой» в параллельную [3]. И все достоинства и

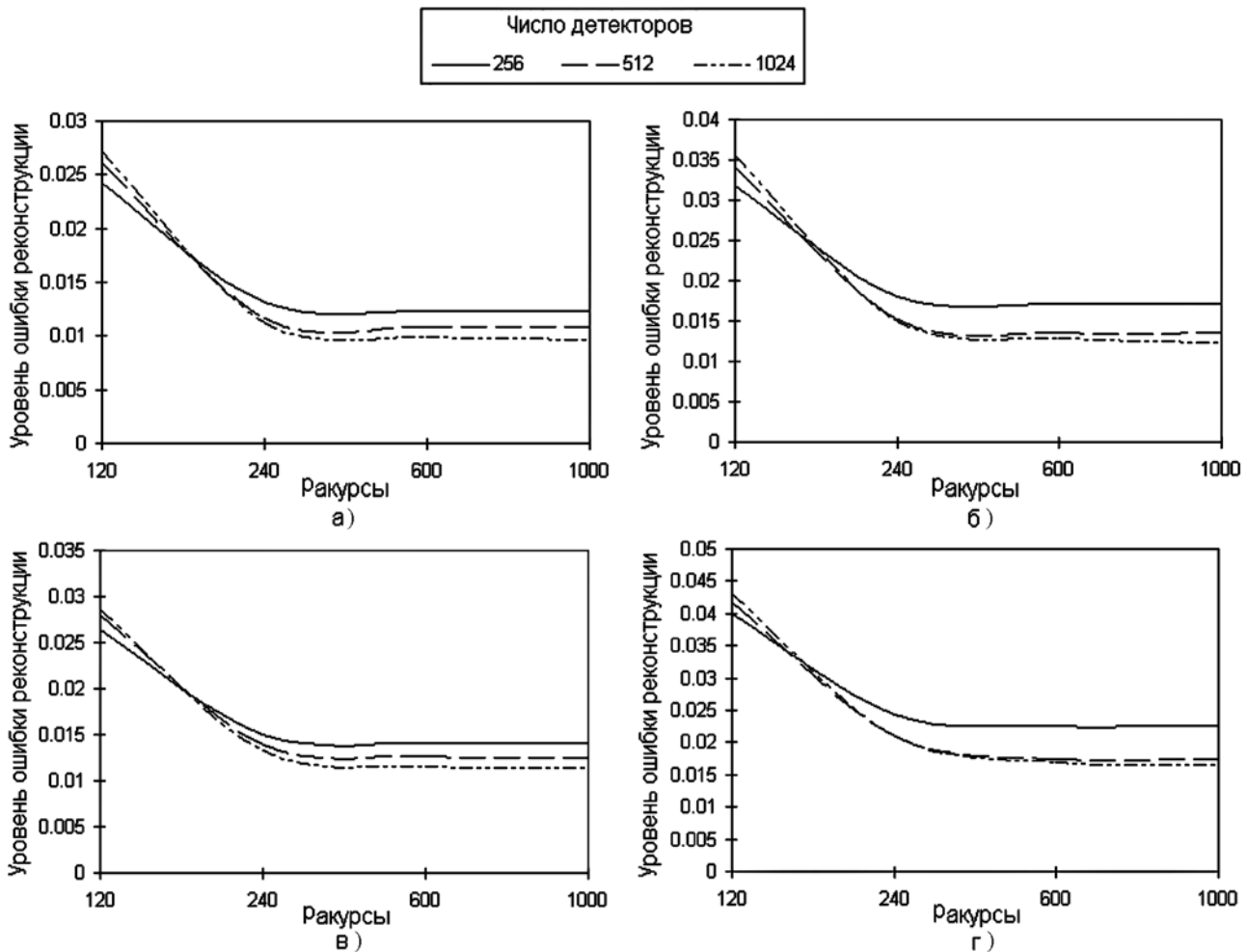


Рис. 10. Зависимость уровня ошибки реконструкции от числа ракурсов: а) высококонтрастная модель – d_1 ; б) высококонтрастная модель – d_2 ; в) низкоконтрастная модель – d_1 ; г) низкоконтрастная модель – d_2

недостатки этой «перегруппировки» присущи с большой достоверностью данным типам КТ.

Заключение

«Перегруппировка» веерных проекционных данных в параллельные применяется в различных типах рентгеновской компьютерной томографии: пошаговой однослойной, спиральной мультислойной, конусной трехмерной суперслойной. Она используется для сведения к минимуму количества данных, необходимых для реконструкции изображения, и тем самым уменьшения времени реконструкции изображения.

Однако, как показали исследования, реконструированные изображения для веерной геометрии и параллельной геометрии после «перегруппировки» не имеют абсолютного сходства.

При существенном уменьшении числа ракурсов при «перегруппировке» следует уменьшить и число детекторов. При увеличении числа ракурсов можно увеличить число детекторов, но меры различия при этом уменьшаются незначительно.

Список литературы:

1. Симонов Е.Н. Рентгеновская компьютерная томография. Монография. – Снежинск: РФЯЦ-ВНИИТФ, 2002. 364 с.
2. Хермен Г. Восстановление изображений по проекциям: основы реконструктивной томографии / Пер. с англ. – М.: Мир, 1983. 352 с.
3. Календер В. Компьютерная томография. Основы, техника, качество изображений и области клинического использования. – М.: Техносфера, 2006. 344 с.

Семен Александрович Лавров,
инженер-исследователь,
РФЯЦ-ВНИИТФ,

Евгений Николаевич Симонов,
д-р техн. наук, профессор,
Снежинская государственная
физико-техническая академия

Национальный исследовательский ядерный
университет «МИФИ», г. Москва,
e-mail: semlav@list.ru