

Влияние преломления света на восстановление изображения в трансмиссионной оптической томографии рассеивающих сред

С.А.Терещенко*, Д.А.Потапов*, В.М.Подгаецкий*, А.В.Смирнов**

Исследовано искажающее влияние преломления света на границах рассеивающих сред на результаты томографической реконструкции изображений радиально-симметричных объектов. Описаны способы коррекции искажений, вызванных преломлением. Приведены результаты реконструкции изображений двух модельных цилиндрических объектов.

Ключевые слова: оптическая томография, рассеивающие среды, реконструкция изображения.

Ранняя диагностика различных заболеваний оптическими методами обеспечивает возможность значительного развития практической медицины. В связи с этим в последнее время, наряду с традиционными видами томографии (рентгеновская, магнитно-резонансная, радионуклидная), всё большее внимание привлекает трансмиссионная оптическая томография (ТОТ), обладающая рядом преимуществ. К ним в первую очередь можно отнести её нетравматичность, дешевизну и компактность.

Вместе с тем особенностью ТОТ является необходимость учета значительно более сложного взаимодействия оптического излучения со средой, в частности процессов рассеяния, преломления и отражения света. Это делает невозможным использование математического аппарата традиционных видов томографии, опирающегося на преобразование Радона. Кроме того, оптическое излучение существенно больше ослабляется, что усложняет регистрацию исходных данных для последующей реконструкции томографических изображений.

Математической основой ТОТ является уравнение переноса излучения и его различные приближения. В настоящей работе используется нестационарная осевая (двухпотоковая) модель переноса излучения [1, 2]. Для реконструкции объекта применяется алгоритм, соответствующий приближению пропорциональной рассеивающей среды, которое позволяет перейти от двух неизвестных функций пространственного переменного (коэффициентов поглощения и рассеяния) к одной [3].

В приближении пропорциональных сред предполагается, что

$$m_s(\zeta) = \beta m(\zeta),$$

где ζ – координата вдоль луча лазера; $m(\zeta) = m_a(\zeta) + m_s(\zeta)$ – коэффициент экстинкции; $m_a(\zeta)$ – коэффициент поглощения; $m_s(\zeta)$ – коэффициент рассеяния; β – коэффициент пропорциональности. В этой модели выражение для проеций можно записать в виде

$$p(\xi, \theta) = -\ln \left\{ \frac{I_+(\zeta_1) [1 + (1 - \beta^2)^{1/2}]}{(1 - \beta^2)^{1/2} + [1 - \beta^2 + \beta^2 I_+^2(\zeta_1)]^{1/2}} \right\},$$

где θ – угол поворота вращающейся системы координат ξ, ζ относительно неподвижной системы координат x, y ; $I_+(\zeta_1) = U_+(\zeta_1)/U_0$ – отношение интенсивности прошедшего излучения $U_+(\zeta_1)$ к интенсивности падающего излучения U_0 . Тогда

$$m(x, y) = \frac{1}{(1 - \beta^2)^{1/2}} \mathcal{R}^{-1} \{p(\xi, \theta)\},$$

где $\mathcal{R}^{-1} \{p(\xi, \theta)\}$ – обратное преобразование Радона.

Рассмотрим простейшую задачу восстановления пространственного распределения коэффициента экстинкции в сечении однородного цилиндра:

$$m(x, y) = \begin{cases} \text{const}, & (x^2 + y^2)^{1/2} < R, \\ 0, & (x^2 + y^2)^{1/2} \geq R, \end{cases}$$

где R – радиус цилиндра. Соответственно для пространственного распределения показателя преломления можно записать

$$n_c(x, y) = \begin{cases} n_2, & (x^2 + y^2)^{1/2} < R, \\ n_1, & (x^2 + y^2)^{1/2} \geq R, \end{cases}$$

где n_1 и n_2 – показатели преломления окружающей среды и объекта. Поскольку объект реконструкции является радиально-симметричным, обратное преобразование Радона сводится к обратному преобразованию Абеля.

Томографическое восстановление даже такого простого объекта затруднено из-за эффектов преломления и отражения. На рис. 1, а, б представлен ход лучей с учётом их преломления для схемы с параллельным сканированием. Преломление тем больше, чем больше отличается от единицы относительный показатель преломления $n = n_2/n_1$. При этом в случае $n > 1$ образуются области, недоступные для сканирования (рис. 1, а), в то время как для $n < 1$ возможно сканирование всех точек объекта (рис. 1, б).

Зная характер искажений в объекте, можно перейти от искривленных лучей к прямолинейным, т. к. для цилиндрического объекта путь, пройденный в нём лучом, опре-

*Московский институт электронной техники (технический университет), Россия, 124498 Москва, Зеленоград; e-mail: tsa@miee.ru

**Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38

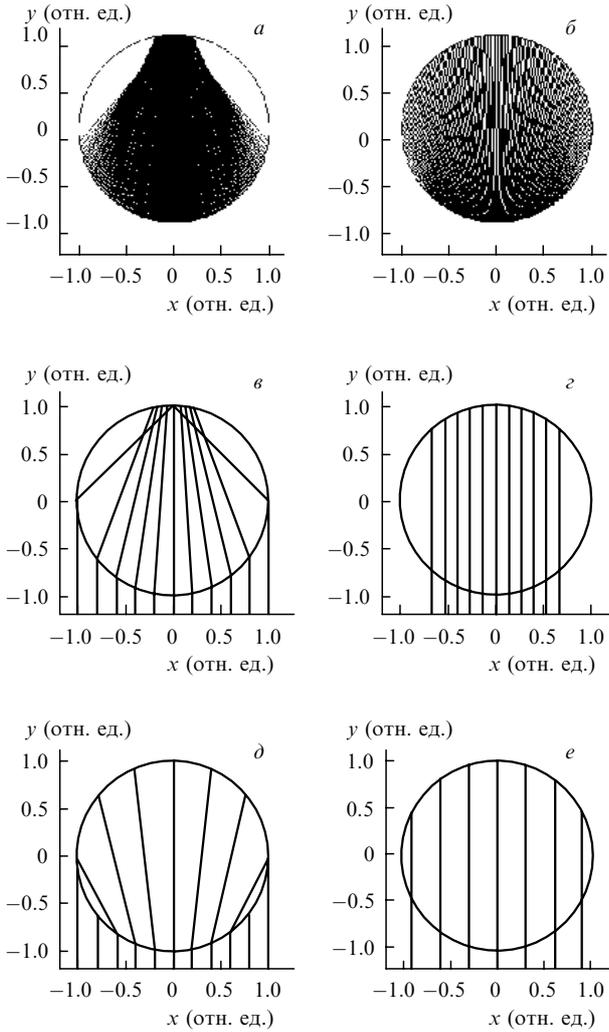


Рис.1. Сканирование цилиндрического объекта (а, б) и переход к параллельным лучам (в–е) для $n = 1.5$ (а, в, г) и 0.67 (б, д, е). Лучи идут снизу вверх.

деляется только расстоянием от оси цилиндра до соответствующей хорды (рис.1, в–е). При этом первоначальный шаг сканирования $\Delta\xi$ становится равным $\Delta\xi/n$. Кроме преломления света, дополнительные трудности вносят области резкого изменения коэффициента пропускания, обусловленного усилением отражения света при определенной ориентации сканирующего луча по отношению к границе раздела сред с разными коэффициентами преломления.

На рис.2 приведены результаты реконструкции цилиндрического объекта без коррекции преломления, показывающие резкую зависимость появляющихся искажений от относительного показателя преломления.

Таким образом, искажающее влияние преломления и отражения света на границах раздела двух сред представляет собой серьезную проблему, особенно при томографических измерениях объектов со сложной конфигурацией внешних границ и, тем более, их внутренних структур с различными показателями преломления. Отражение и преломление света приводят к следующим основным отрицательным следствиям:

- нарушается геометрия измерений;
- изменяется (уменьшается или увеличивается) путь, проходимый лучом в объекте;

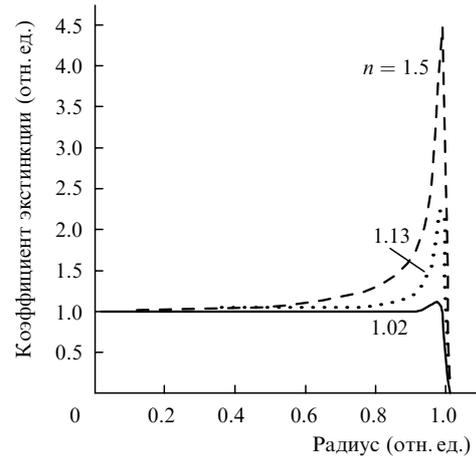


Рис.2. Центральные сечения реконструкции цилиндрических объектов без коррекции преломления для различных n .

- образуются зоны, недоступные для сканирования;
- затрудняется детектирование прошедшего излучения из-за отклонения луча;
- дополнительно ослабляется сигнал за счёт отражения части излучения.

При известных гладких внешних границах идеального цилиндрического сильно рассеивающего объекта возможна частичная коррекция преломления. Она заключается в построении системы хорд с теми же самыми расстояниями до оси цилиндра, что и для реальных траекторий, но при этом хорды параллельны друг другу. Кроме того, для областей, недоступных сканированию, недостающие данные можно добавить путём интерполяции. Хотя эти приёмы и уменьшают искажения, обусловленные преломлением, но полностью их не устраняют. Для объектов же сложной формы с неизвестным пространственным распределением показателя преломления внутри даже такая частичная коррекция невозможна.

В эксперименте в качестве источника излучения применялся наносекундный лазер на неодимовом стекле ($\lambda = 1.06$ мкм, $E = 20$ мДж, $\tau = 20$ нс). Объектами исследования служили парафиновый цилиндр диаметром 10 мм и высотой 40 мм, а также более сложный радиально-симметричный объект. Он представлял собой смесь глицерина ($n \approx 1.47$) с чёрной тушью (2 капли на 20 мл глицерина), заполняющей цилиндрическое углубление диаметром 28 мм в параллелепипеде (длиной 60 мм, шириной 40 мм и высотой 40 мм) из полиметилметакрилата ($n \approx 1.5$). В углубление соосно с ним вставлялся стеклянный столбик диаметром 10 мм. Сложный объект моделирует среду с неоднородностью поглощения и рассеяния света, но с однородным распределением показателя преломления, что соответствует ряду биологических сред [4]. Оба исследованных объекта характеризовались сильным рассеянием света.

Лазерный пучок диаметром ~ 1 мм перемещался в плоскости, перпендикулярной оси объекта, с шагом 0.5 мм. Сигнал регистрировался с помощью измерителя энергии на основе кремниевого фотоприемника. Результаты реконструкции изображений объектов приведены на рис.3. Из рис.3,а видно, что без коррекции преломления наблюдаются значительные искажения в изображении. Использование коррекции позволяло существенно улучшить изображение (рис.3,б).

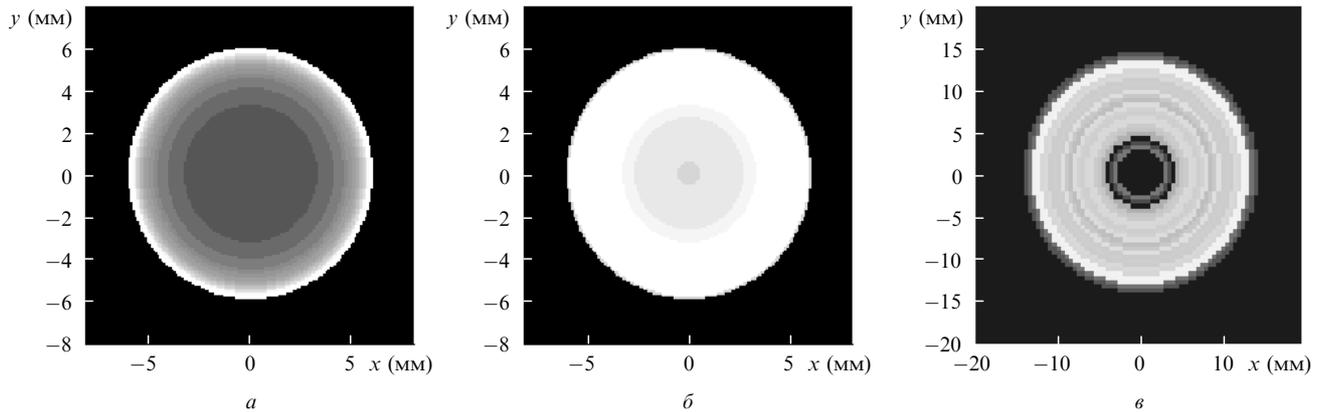


Рис.3. Реконструкции изображений цилиндрического парафинового объекта ($n = 1.5$) без коррекции преломления (a) и с коррекцией преломления и интерполяцией (b), а также усложненного объекта в иммерсионной среде (v).

Другим способом уменьшения искажений, связанных с преломлением света, может служить помещение объекта в иммерсионную среду. Результаты реконструкции указанного выше сложного объекта приведены на рис.3, v . Следует отметить, что в отсутствие иммерсионной среды не удалось получить приемлемого изображения такого объекта.

Таким образом, проведенные исследования показали сильное влияние преломления света на качество томографической реконструкции сильно рассеивающих объектов. Описаны способы коррекции искажений, связанных с преломлением света, на примере томографической

реконструкции изображений радиально-симметричных сильно рассеивающих объектов.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (гранты № 00-02-16085 и 01-01-00065) и Министерства образования РФ (проект № E00-1.0-188).

1. Терещенко С.А., Подгаецкий В.М., Воробьев Н.С., Смирнов А.В. *Квантовая электроника*, **23**, 265 (1996).
2. Селищев С.В., Терещенко С.А. *ЖТФ*, **67**, 61 (1997).
3. Терещенко С.А., Селищев С.В. *Письма в ЖТФ*, **23**, 64 (1997).
4. Tuchin V. *Tissue optics. Light scattering methods and instruments for medical diagnostics* (Bellingham, Washington, USA, SPIE Press, 2000, v. TT38, p. 347).