

А.И. Валентюк, Ю.А. Лебединский, В.Г. Синченко

### ЗАВИСИМОСТЬ КОНТРАСТА ИЗОБРАЖЕНИЯ, РЕГИСТРИРУЕМОГО ЧЕРЕЗ СЛОЙ РАССЕИВАЮЩЕЙ СРЕДЫ, ОТ ПОЛОЖЕНИЯ СЛОЯ НА ТРАССЕ НАБЛЮДЕНИЯ

Существуют три типа зависимости контраста регистрируемого изображения от удаления слоя от плоскости объектов. В зависимости от соотношения размеров наблюдаемого объекта и параметров рассеивающего слоя возможны: немонотонная зависимость с минимумом при некоторых промежуточных положениях слоя или монотонное уменьшение (увеличение) контраста.

В последние годы внимание ряда исследователей привлек анализ зависимости контраста изображения, получаемого через слой рассеивающей среды, от положения слоя на трассе наблюдения [1–7]. В работе [1] было показано, что при удалении рассеивающего слоя от поверхности объекта оптическая передаточная функция (ОПФ) слоя монотонно падает, в серии работ [2–5], основанных на численных расчетах методом Монте-Карло, было установлено, что в зависимости от удаления слоя от объекта наблюдения ОПФ изменяется немонотонно: вначале значения ОПФ убывают, достигают минимума при некотором промежуточном положении слоя, а затем возрастают. В этих же работах были сделаны качественные выводы о характере зависимости контраста изображения объектов от положения слоя на трассе наблюдения в зависимости от вида Фурье-спектра объекта. В данной работе приведены результаты расчетов контраста изображения в малоугловом приближении и результаты измерений контраста тест-объектов в виде двухшпальных мир, подтверждающие сделанные ранее качественные выводы.

Рассмотрим для простоты случай наблюдения одномерного объекта. Ширину объекта обозначим через  $L$ , характерный масштаб флуктуаций яркости по поверхности объекта (элемента изображения) через  $L_0$ . Очевидно, что наличие рассеивающего слоя на трассе наблюдения будет приводить к размытию элементов изображения. Степень влияния слоя на изображение объекта можно характеризовать шириной функции рассеяния линии (ФРЛ) слоя  $R$ . Очевидно, что при  $R \sim L_0$ , когда величина поперечной диффузии фотонов порядка элемента изображения, с ростом  $R$  величина контраста изображения будет падать. Эта закономерность будет иметь место до тех пор, пока  $R \leq L$ . При  $R > L$  начнет играть роль другой фактор — поперечная диффузия фотонов за пределы изображения объекта, полученного в нерассеянном свете. В этом случае при увеличении  $R$  контраст изображения будет возрастать.

Известно [7], что величина  $R$  при удалении слоя от поверхности объекта монотонно возрастает. Поэтому ясно, что при наблюдении объектов через рассеивающий слой возможны три ситуации:

1. На всей трассе наблюдения  $R \leq L$ . В этом случае при удалении слоя от объекта наблюдения контраст изображения будет монотонно падать.

2. На всей трассе наблюдения  $R \geq L$ . В этом случае при удалении слоя от объекта контраст изображения будет монотонно возрастать.

3. При нахождении рассеивающего слоя вблизи объекта  $R \leq L$ , при промежуточных положениях слоя  $R \geq L$ . В этом случае при удалении слоя от объекта контраст изображения вначале будет падать, затем, начиная с некоторого промежуточного положения, будет возрастать.

Конкретные значения величины  $L$ , обеспечивающей реализацию ситуаций 1–3, могут быть оценены из формулы, следующей из [7–8]:

$$R^2 = \frac{\sigma^*}{6} \bar{\gamma}^2 [(l + \delta)^3 - l^3],$$

где  $\bar{\gamma}^2$  — второй момент индикатрисы рассеяния;  $\sigma^* = \sigma(1 - \Phi)$ ;  $\sigma$  — показатель рассеяния слоя;  $\delta$  — его геометрическая толщина;  $\Phi$  — параметр, определяемый согласно [8];  $l$  — расстояние от поверхности объекта до ближней поверхности слоя.

Результаты качественного физического анализа подтверждаются как расчетом контраста изображений эталонных тест-объектов, так и экспериментальными данными. В качестве тест-объекта в данной работе была выбрана двухшпальная прямоугольная мира. Расчеты и эксперименты были выполнены для рассеивающей среды в виде взвеси молока в воде с оптической толщиной  $\tau \sim 3,0$ . Контраст изображений тест-объекта  $K$  оценивался по формуле  $K = (E_1 - E_2)/(E_1 + E_2)$ , где  $E_1$  — освещенность в центре изображения шпалы;  $E_2$  — освещенность в центре тест-объекта. Величины  $E_1$  и  $E_2$  рассчитывались по формулам, справедливым при выполнении в среде условия ракурсной инвариантности [9]:

$$E_1 = 2 \int_0^{\infty} B(\omega) T(\omega) \cos \omega \Delta d\omega, \quad E_2 = 2 \int_0^{\infty} B(\omega) T(\omega) d\omega, \quad (1)$$

где  $B(\omega) = \frac{1}{\omega} [\sin \omega(\Delta + 0,5\Delta_0) - \sin \omega(\Delta - 0,5\Delta_0)]$  – Фурье-спектр распределения яркости тест-объекта;  $\Delta$  – расстояние от центра тест-объекта до центра шпалы;  $\Delta_0$  – ширина шпалы;  $T(\omega)$  – ОПФ рассеивающего слоя;  $\omega$  – пространственная частота. ОПФ рассеивающего слоя рассчитывалась по формуле из [7, 8]:

$$T(\omega) = \exp \left\{ -\Lambda^* \tau + \frac{\Lambda^* \tau}{Q_0} \sum_{n=1}^2 \frac{A_n}{\alpha_n} \left[ \frac{l + \delta}{[\alpha_n^2 + \omega^2 (l + \delta)^2]^{1/2}} - \frac{l}{(\alpha_n^2 + \omega^2 l^2)^{1/2}} \right] \right\}, \quad (2)$$

где  $\tau = \varepsilon \delta$ ;  $\Lambda^* = \Lambda(1 - \Phi)$ ;  $\Lambda$  – вероятность выживания кванта в однократном акте рассеяния;  $\alpha_n$  и  $A_n$  – параметры, описывающие индикатрису рассеяния  $x(\gamma)$  в виде аппроксимации:  $x(\gamma) = \sum_{n=1}^2 A_n e^{-\alpha_n \gamma}$ ,

$Q_0 = \sum_{n=1}^2 A_n / \alpha_n^2$ . Для молочной взвеси считалось, что  $A_1 = 5043,4$ ;  $\alpha_1 = 118,4$ ;  $A_2 = 15,88$ ;  $\alpha_2 = 4,87$ ;

$Q_0 = 0,04$ . Сравнение результатов расчета ОПФ рассеивающих слоев с оптической толщиной  $\tau \sim 3,0$  по формуле (2) и методом Монте-Карло показало, что погрешность расчетов по формуле (2) составляет  $\sim 5\%$ .

Результаты расчета контраста тест-объектов различного размера полностью соответствуют приведенным выше физическим соображениям. По мере удаления слоя от поверхности объектов контраст изображения малоразмерных тест-объектов монотонно возрастает, крупноразмерных – монотонно падает, тест-объектов промежуточного размера – вначале убывает, затем возрастает (рис. 1).

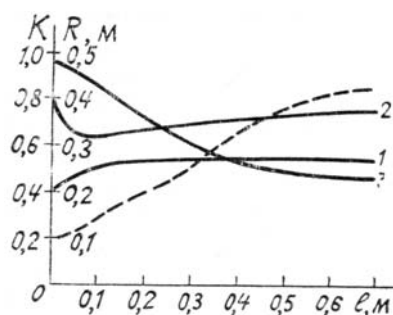


Рис. 1. Зависимость контраста изображения двухшпальной миры от удаления слоя от поверхности объекта (сплошная линия) при  $\Delta = 0,3$  см,  $\Delta_0 = 0,075$  см (1),  $\Delta = 8$  см,  $\Delta_0 = 2$  см (2),  $\Delta = 30$  см и  $\Delta_0 = 7$  см (3). Зависимость ширины ФРЛ от удаления  $l$  – штриховая кривая. Оптическая толщина слоя  $\tau = 3,0$ , геометрическая толщина  $\delta = 30$  см

Для экспериментального подтверждения указанных закономерностей была выполнена серия экспериментов. Изображение тест-объектов различного размера формировалось фотографическим объективом «Юпитер-8». Центр тест-объектов при экспериментах совмещался с оптической осью объектива. Диффузное освещение тест-объектов осуществлялось пучком света от лампы накаливания типа КГМ, проходящим через матовое стекло. Освещающий пучок модулировался с частотой 1,5 кГц. Рассеивающий слой представлял собой бак толщиной 0,3 м, который перемещался по трассе наблюдения. Изображение тест-объекта сканировалось в плоскости изображений объектива анализирующей щелью. Зарегистрированный фотоумножителем сигнал усиливался, синхронно детектировался и далее поступал на графопостроитель, регистрирующий распределение освещенности в изображении тест-объекта при фиксированном значении  $l$ . Из анализа этого изображения оценивалась его контрастность.

Эксперименты были выполнены в виде двухшпальной миры со следующими значениями параметров: тест-объект 1 –  $\Delta = 0,0109$  м,  $\Delta_0 = 0,0096$  м, тест-объект 2 –  $\Delta = 0,08$  м,  $\Delta_0 = 0,02$  м. Зависимости 2, 3 экспериментально проверялись при расстоянии между объектом и оптической системой  $L = 1,5$  м. Для анализа изображения в этом случае использовалась щель шириной 10 мкм и высотой 3 мм. Зависимость 1 – при расстоянии между объектом и оптической системой  $L = 0,52$  м и ширине анализирующей щели 200 мкм.

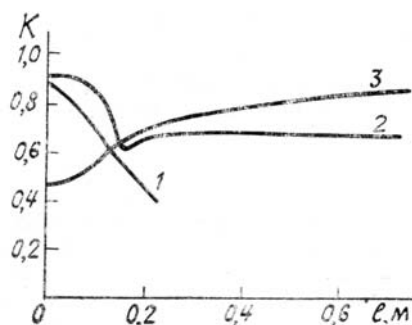


Рис. 2. Зависимость контраста изображения тест-объекта от положения рассеивающего слоя на трассе наблюдения. (1) тест-объект 2,  $L = 0,52$  м, (2) тест-объект 2,  $L = 1,5$  м, (3) тест-объект 1,  $L = 1,5$  м

Численно условия наблюдения тест-объектов могут быть оценены путем анализа зависимости контраста регистрируемого изображения от положения слоя на трассе наблюдения. Результаты такого анализа, полученные путем обработки экспериментальных распределений освещенности, представлены на рис. 2. Как видно из рисунка, при соответствующем соотношении параметров тест-объектов и рассеивающего слоя ситуации 1–3 четко наблюдаются экспериментально.

1. Дрофа А.С., Кацев И.Я. //Метеорология и гидрология. 1981. № 1. С. 101.
2. Белов В.В., Зуев В.Е., Креков Г.М. //Изв. АН СССР. ФАО. 1982. Т. 18. № 9. С. 963.
3. Белов В.В., Борисов Б.Д., Генин В.Н. и др. //Изв. АН СССР. ФАО. 1982. Т. 18. № 12. С. 1303.
4. Зуев В.Е., Белов В.В., Креков Г.М. //Докл. АН СССР. 1983. Т. 269. № 2. С. 1353.
5. Зуев В.Е., Белов В.В., Борисов Б.Д. и др. //Докл. АН СССР. 1983. Т. 268. № 2. С. 321.
6. Волнистова Л.П., Дрофа А.С. //Изв. АН СССР. ФАО. 1985. Т. 21. № 1. С. 50.
7. Зега Э.П., Иванов А.П., Кацев И.Л. Перенос изображения в рассеивающей среде. Минск: Наука и техника, 1985.
8. Валентюк А.Н. //Изв. АН СССР. ФАО. 1987. Т. 23. № 9. С. 839.
9. Долин Л.С., Савельев В.А. //Изв. АН СССР. ФАО. 1979. Т. 15. № 7. С. 717.

Могилевское отделение  
института физики АН БССР

Поступила в редакцию  
9 ноября 1988 г.

A.N. Valentyuk, Yu.A. Lebedinskii, V.G. Sinchenko. **Dependence of Contrast of the Images Recorded Through a Scattering Layer of the Position of the Layer on the Observation Path.**

There exist three types of the recorded image contrast on the distance between the layer and the objects plane. Depending on the ratio of an observed object size and parameters of scattering layer there can occur nonmonotonous behavior with minima at certain intermediate positions or monotonous decrease (increase) of the contrast.