

В.В. Белов, Б.Д. Борисов, Н.В. Молчунов

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ЛИНЕЙНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ, ИСКАЖЕННЫХ РАССЕЙВАЮЩИМИ СРЕДАМИ

Исследована возможность применения линейных фильтров в задаче восстановления изображений, искаженных атмосферными оптически плотными рассеивающими образованиями. На примере пространственно ограниченного объекта показано, что для реальных цифровых изображений, содержащих шумовую компоненту, требуется применение значительной степени сглаживания решения для компенсации потери качества, вызванного шумом, ошибками в задании импульсной переходной функции искажающей среды, а также пространственным ограничением, связанным с формированием кадра изображения.

Эффективность зондирования земной поверхности с бортов летательных аппаратов ограничивается наличием рассеивающих слоев в виде облаков, дымок и туманов, которые специфическим образом искажают регистрируемое изображение и тем самым затрудняют процесс обработки, проводимый с целью контроля за состоянием природной среды и объектов искусственного происхождения. В связи с этим, по мере развития средств зондирования и расширения классов зондируемых объектов повышается потребность в исследовании и развитии методов, позволяющих восстанавливать изображения, искаженные подобными образованиями.

Данная статья посвящена исследованию возможности применения известных и ставших уже классическими методов для восстановления изображений, искаженных рассеивающими средами. При этом основное внимание уделяется анализу источников ошибок, возникающих в процессе проведения реставрации дискретизированных изображений с использованием ЭВМ.

Рассмотрим некоторые детали формирования изображения на выходе регистрирующего прибора с учетом переноса некогерентного оптического сигнала через мутные среды.

Влияние такой среды на процесс формирования изображения аналогично воздействию на него пространственного фильтра низких частот, выходной сигнал которого описывается интегральным уравнением типа свертки.

$$g_a(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(\xi, \eta) h(x - \xi, y - \eta) d\xi d\eta = f(x, y) * h_a(x, y), \quad (1)$$

где $h_a(x, y)$ — импульсная функция отклика среды (функция размытия точки — ФРТ); $f(x, y)$ — исходный сигнал от объекта, $g_a(x, y)$ — изображение, формируемое на входе приемного устройства.

Регистрирующий прибор в процессе формирования изображения: можно рассматривать как еще один пространственный фильтр низких частот с импульсной функцией $h_n(x, y)$, который осуществляет также сжатие динамического диапазона исходного сигнала и вносит шумовую компоненту $n(x, y)$. Общая импульсная функция канала передачи — регистрации представляется сверткой импульсных функций составляющих его компонент, т. е.

$$h(x, y) = h_a(x, y) * h_n(x, y). \quad (2)$$

Регистрируемый сигнал изображения теперь можно описать следующим образом:

$$g_d(x, y) = D[f(x, y) * h(x, y) + n(x, y)], \quad (3)$$

где D — оператор сжатия динамического диапазона. В частности, его функцию может выполнять чувствительный элемент фотодатчика в линейном участке, а также АЦП с определенным количеством разрядов, поэтому действие оператора D распространяется и на шум $n(x, y)$, вносимый регистрирующим прибором. Любой оптический прибор ограничивает регистрируемое изображение по пространству, т. е. формирует кадр. Как правило, областью ограничения является прямоугольник. В случае цифровых изображений удобнее пользоваться квадратными кадрами (или растрами), поскольку к ним хорошо приспособлен математический аппарат дискретных интегральных преобразований.

Таким образом, изображение на выходе регистрирующего прибора представляется в следующем виде:

$$g(x, y) = D\{R[f(x, y) * h(x, y)] + n(x, y)\}, \quad (4)$$

где R — оператор формирования кадра, который не меняет свойств шума.

Заметим, что при проведении реставрации формирование кадра может оказаться крайне неблагоприятным фактором, существенно влияющим на качество восстановления. Предположим, что формирование кадра приводит к усечению изображения $f(x, y)$ за пределами интервала $|x| > p, |y| > p$ так, что $f(x, y) = 0$ вне данного интервала. Усечение изображения эквивалентно умножению его на весовую функцию окна

$$\omega(x, y) = \begin{cases} 1, & |x| < p, |y| < p \\ 0, & |x| \geq p, |y| \geq p. \end{cases}$$

Спектр полученного после усечения изображения равен свертке спектров изображения и окна, при этом спектр функции окна — двумерная sinc -функция. В результате в спектре изображения появляются паразитные компоненты с высокими пространственными частотами, кратными $2\pi/p$ (явление Гиббса) [1]. В связи с тем, что задача получения оценки изображения $\hat{f}(x, y)$ из интегрального уравнения (1) является некорректной [4], то формирование кадра может привести к резкому усилению искажений.

Если в качестве рассеивающей среды рассматривать аэрозольногазовую атмосферу, то соответствующая ей ФРТ может характеризоваться значительной пространственной протяженностью [2]. В связи с этим заметим, что аналогичный рост искажений может вызвать и усечение ФРТ, которая используется при проведении реставрации изображения.

Пусть непрерывное изображение дискретизируется с помощью решетки дельта-импульсов Дирака, разделенных интервалом Δs . Будем считать, что дискретизация выполнена с интервалом, при котором наложения периодического повторения спектра изображения не происходит. Тогда действие оператора R определяет размер квадратного раstra со стороной N отсчетов, в узлах которого располагаются значения искаженного изображения, а действие оператора D фактически сводится к округлению до ближайшего целого в пределах шкалы, определяемой разрядностью АЦП. В результате формируется двумерный массив отсчетов:

$$g_{ij} = \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^N f_{kl} h_{i-k, j-l} + n_{ij}. \quad (5)$$

Для проведения реставрации изображения по результатам зарегистрированных отсчетов g_{ij} будем использовать ФРТ, рассчитанные по методике, предложенной в [2], или измеренные в лабораторных экспериментах [3]. При этом, с одной стороны, в реализациях ФРТ будет присутствовать ошибка, связанная с неточностью методов расчета или погрешностями измерений, с другой стороны, может возникнуть потребность ее усечения на некотором уровне с тем, чтобы уложиться в заданный размер раstra N . Поэтому была проведена серия численных экспериментов по оценке влияния на точность восстановления изображений следующих факторов:

- неточности в задании ФРТ;
- диапазона квантования и аппаратного шума, в том числе шума квантования;
- пространственного ограничения, связанного с формированием кадра.

Исследования проводились по следующим схемам.

1. На основе расчетных и измеренных в эксперименте ФРТ модельных облачных сред на ЭВМ имитировались процессы как искажения, так и реставрации изображения.

2. Искажение изображения осуществлялось в лабораторном эксперименте путем моделирования условий наблюдения через локальный слой мутной среды, а его реставрация производилась на ЭВМ с помощью расчетных и измеренных ФРТ.

В обоих случаях соблюдались условия, при которых модель наблюдения характеризуется ФРТ с круговой симметрией, при этом оптическая передаточная функция (ОПФ), представляющая собой Фурье образ ФРТ, является чисто действительной функцией.

Для минимизации потерь, связанных с формированием кадра, соотношение размеров раstra N и объекта N_f выбрано из условия $N/N_f > 10$. При проведении численных экспериментов использовался тест-объект в виде равномерного круга, диаметр которого $N_f = 25$ отсчетов при 250 уровнях яркости. Тест-объект размещался на нулевом фоне в центре квадратного раstra размером 256×256 отсчетов. Шумовая компонента на ЭВМ не моделировалась (зашумленное изображение регистрировалось в процессе выполнения лабораторного эксперимента).

Следует отметить, что выбранный тест-объект обладает практически неограниченным спектром и поэтому может служить хорошим эталоном при оценке алгоритмов восстановления, в особенности, по отношению к возможности восстановления высоких пространственных частот.

Искажение изображения в численном эксперименте осуществлялось сверткой в частотной области тест-объекта и расчетных (методом Монте-Карло [2]) или измеренных [3] ФРТ. При необходимости ФРТ интерполировалась до требуемого шага с помощью метода сплайн-аппроксимации и отобража-

лась на сетку 256×256 . Для исключения эффекта наложения перед проведением свертки растр объекта и ФРТ доопределялся нулями до размера 512×512 . Формирование кадра (действие оператора R) производилось усечением результата до размера 256×256 . Перед записью на диск отсчеты изображения масштабировались в требуемый диапазон, определяемый разрядной сеткой АЦП и округлялись до ближайшего целого (действие оператора D). Например, для 5-разрядной сетки максимальная амплитуда сигнала составляла 30, для 8-разрядной — 250, а для 10-разрядной — 1020.

Для согласованной оценки результатов численного и лабораторного экспериментов в последнем использовался диффузный самосветящийся тест-объект в виде круга диаметром 6 мм, изображение которого в память ЭВМ составило 25 отсчетов на диаметр. Шаг квантования по пространству при этом составил 0,24 мм/отсчет. Тест-объект регистрировался телевизионной камерой высокого разрешения с компенсацией неравномерности чувствительности по фотокатоду. Рассеивающая среда создавалась раствором молока в дистиллированной воде в кювете с рабочим диаметром 440 мм. Расстояние от тест-объекта до середины дисперсного слоя l варьировалось так, чтобы была возможность имитировать три типа характерных атмосферно-оптических ситуаций, которые иллюстрируются рис. 1. На рисунке изображены три типа высотных профилей распределения коэффициентов ослабления β_{ext} . Рис. 1, *a* соответствует случаю, когда подстилающая поверхность покрыта оптически плотным рассеивающим слоем (например, туманом), рис. 1, *b* — слой фиксируется на незначительном удалении от поверхности, и рис. 1, *в* — линию визирования пересекает облачность. Заметим, что форма ФРТ, ее протяженность существенно различны для трех рассматриваемых случаев. Если для первой ситуации ФРТ можно аппроксимировать экспоненциальной функцией, то в последнем случае $h(r) = \delta(r) + \text{const}$, где $\delta(r)$ — дельта-функция, $r = \sqrt{x^2 + y^2}$.

Контроль оптической толщины τ рассеивающего слоя в эксперименте осуществлялся при помощи отдельного измерительного канала. Регистрация искаженного изображения производилась через слой с $\tau = 7,0$. Регистрация контрольного изображения тест-объекта — через кювету, заполненную только дистиллированной водой.

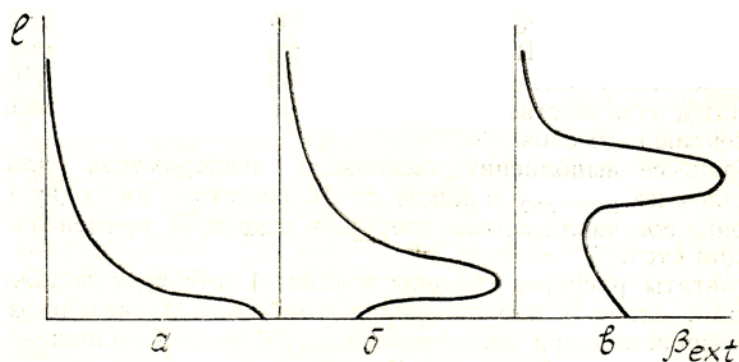


Рис. 1. Зависимость высотного профиля коэффициента ослабления от положения рассеивающего слоя

Для ввода в ЭВМ аналогового телевизионного сигнала применялся видеопроцессор с быстродействующим 8-разрядным АЦП. С целью оптимального использования разрядности АЦП интенсивность светового потока от тест-объекта регулировалась нейтральными светофильтрами, устанавливаемыми перед осветителем, при этом яркость отсчетов зарегистрированного изображения находилась в диапазоне 0—250. С целью уменьшения шумовой компоненты проводилось усреднение по 32 оцифрованным кадрам. Записанное в байтовом формате изображение размечалось на растре 256×256 отсчетов.

Восстановление полученных искаженных изображений проводилось с использованием инверсного фильтра, фильтра Винера, аналогичного используемому в [5, 6], а также по методике регуляризации А.Н. Тихонова [7]. Передаточные функции восстанавливающих фильтров приведены формулами (6), (7), (8) соответственно перечислению.

$$H_{\text{и}}(\omega_x, \omega_y) = \frac{1}{H(\omega_x, \omega_y)}; \quad (6)$$

$$H_{\text{В}}(\omega_x, \omega_y) = \frac{H^*(\omega_x, \omega_y)}{|H(\omega_x, \omega_y)|^2 + A}; \quad (7)$$

$$H_{\text{Т}}(\omega_x, \omega_y) = \frac{H^*(\omega_x, \omega_y)}{|H(\omega_x, \omega_y)|^2 + \alpha(\omega_x^2 + \omega_y^2)}, \quad (8)$$

где $H(\omega_x, \omega_y) = F[h(x, y)]$ – оптическая передаточная функция рассеивающего слоя; F – символ преобразования Фурье; $|H(\omega_x, \omega_y)|^2 = H(\omega_x, \omega_y)H^*(\omega_x, \omega_y)$; $H^*(\omega_x, \omega_y)$ – комплексно-сопряженная величина по отношению к $H(\omega_x, \omega_y)$, A – параметр фильтра Винера; α – параметр регуляризации; $\omega_x = \omega_m = m\Delta\omega_x$, $\Delta\omega_x = 2\pi/N$; $\omega_y = \omega_n = n\Delta\omega_y$, $\Delta\omega_y = 2\pi/N$; $m = 1, 2, \dots, N$; $n = 1, 2, \dots, N$.

Для оценки качества изображений и полноты ФРТ использовался критерий нормированной среднеквадратической ошибки (НСКО):

$$\epsilon = \frac{\|\varphi_{ij} - \hat{\varphi}_{ij}\|}{\|\varphi_{ij}\|} \cdot 100, \quad (9)$$

где φ_{ij} – исходный тест-объект или полная ФРТ; $\hat{\varphi}_{ij}$ – результат искажения или восстановления тест-объекта, усеченная ФРТ.

Для проведения численного эксперимента по оценке влияния на точность восстановления степени усечения ФРТ, формирование искаженных изображений произведено с помощью ФРТ, рассчитанных для трех характерных положений рассеивающего слоя с $\tau = 3,75$. Для того чтобы охватить максимум энергии на заданном растре размером 256×256 отсчетов, ФРТ интерполировалась с более крупным шагом, составляющим $0,4$ мм/отсчет. Включение операторов D и R не производилось. Полученные изображения характеризовались величиной НСКО 85,4; 91,2 и 96,1% соответственно для первого, второго и третьего положений рассеивающего слоя.

В процессе выполнения численного эксперимента длина ФРТ уменьшалась по радиусу в цикле по 10 отсчетов на одну итерацию. Исключение составила первая итерация, в которой применено уменьшение на один отсчет.

Результаты расчетов сведены в табл. 1 для трех положений рассеивающего слоя. В первой колонке таблицы, приведены значения ϵ ФРТ, применяемой при восстановлении. Во второй колонке – ϵ восстановления инверсным фильтром. В следующих двух колонках содержится НСКО восстановления фильтром Винера при значениях параметра A , равных $0,00001$ и $0,0001$. В двух последних колонках содержится НСКО восстановления по методу регуляризации А.Н. Тихонова при значениях параметра регуляризации $\alpha = 1 \cdot 10^{-8}$ и $\alpha = 1 \cdot 10^{-9}$.

Из данных табл. 1 следует, что основная энергия ФРТ для ситуации, соответствующей рис. 1, *a* сосредоточена вблизи центрального отсчета, т.к. ее радиальное усечение от 127 до 7 отсчетов приводит к увеличению НСКО от 0,01 до 30,1%. Усечение ФРТ в этом случае приводит к плавному росту ошибки восстановления для всех разновидностей применяемых фильтров. При этом существенный рост ошибки восстановления наблюдается при достаточно большом усечении ФРТ – от 128 до 57 отсчетов или при достижении НСКО $> 3\%$.

Для второго типичного случая (рис. 1, *б*) характерна более широкая ФРТ со сложной формой крыльев, в связи с чем даже небольшое радиальное усечение, например до 117 отсчетов при ошибке 1,65%, делает невозможным применение инверсного фильтра. Хотя работоспособность фильтров с регуляризирующими добавками сохраняется, качество восстановления при этом получается невысоким.

Для компенсации искажений, возникающих в ситуации, соответствующей рис. 1, *в*, применение обратной фильтрации, по-видимому, нецелесообразно, т.к. даже при незначительном усечении ФРТ наблюдается существенное увеличение ошибки восстановления. Исходя из вида ФРТ и характера искажений, здесь, скорее, можно говорить о необходимости градационной, чем частотной коррекции.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что при восстановлении изображений, искаженных рассеивающими слоями, характеризующихся протяженными ФРТ, наблюдается высокая чувствительность точности результата к ошибкам в задании крыльев ФРТ. Применение фильтров с регуляризацией позволяет получать приближенное решение, ошибка которого зависит от точности исходной ФРТ и от положения рассеивающего слоя на линии визирования. Лучшие результаты могут быть получены для оптико-геометрических ситуаций, при которых рассеивающий слой локализуется в первом положении, т.е. когда ФРТ является гладкой, достаточно быстро спадающей функцией. Дальнейшие эксперименты проведены именно для этой ситуации (рис. 1, *a*).

Произведена оценка влияния диапазона и шума квантования (оператор D) , а также пространственного ограничения (оператор R), связанного с формированием кадра, на качество реставрации. В численном эксперименте использовались расчетная ФРТ для среды типа облака с $\tau = 3,75$, а также ФРТ, полученная в лабораторном эксперименте для модельной облачной среды с $\tau = 7,0$. Шаг квантования по пространству в обоих случаях – $0,24$ мм/отсчет.

Результаты численного эксперимента с использованием фильтра Винера (параметр $A = 0,00015$) представлены в табл. 2. Для получения согласованных оценок значение НСКО рассчитывалось после масштабирования восстановленного изображения в диапазон значений 8-разрядного АЦП и записи его в байтовом формате на магнитный диск. Искаженные изображения характеризовались значениями НСКО 65,7 и 150,6% для $\tau = 3,75$ и $7,0$ соответственно

Таблица 1

НСКО ФРТ %	НСКО восстановления, %				
	Инверсный фильтр	Фильтр Винера		Регуляризация Тихонова	
		$\Lambda=0,00001$	$\Lambda=0,0001$	$\alpha=1,0E-8$	$\alpha=1,0E-9$
1	2	3	4	5	6
$l=22$ мм					
0,01	0,0	3,6	17,9	19,9	8,0
0,18	0,3	3,6	17,9	19,9	8,0
0,44	0,8	3,8	18,1	19,9	8,1
0,86	1,9	4,5	18,5	20,0	8,4
1,66	4,5	6,6	19,7	20,6	9,6
2,72	8,7	10,4	21,9	21,9	12,3
3,89	13,5	15,0	24,9	24,3	16,3
5,37	19,6	20,8	29,1	28,0	21,6
7,52	27,4	28,3	34,9	33,7	28,9
10,96	38,1	38,7	43,5	42,4	39,1
16,03	51,8	52,2	55,1	54,5	52,4
23,01	68,3	68,3	69,8	69,6	68,6
30,06	80,7	80,8	81,3	81,7	80,8
$l=89$ мм					
0,16	17,0	14,0	37,9	26,2	10,9
1,65	898,0	14,7	38,0	26,8	32
3,51	934,4	17,0	38,5	28,8	36,8
5,92	196,8	21,6	39,5	32,8	53,4
9,53	90,8	27,2	42,1	35,8	54,7
12,83	173,4	31,1	45,5	38,2	40,4
15,54	228,0	37,5	49,9	42,6	43,1
18,04	483,3	44,9	53,9	50,4	101,7
20,40	355,4	49,6	58,2	52,8	59,7
22,79	108,4	56,7	63,1	59,0	65,2
25,61	117,0	63,7	68,6	65,8	75,7
31,24	1141,0	98,3	72,4	132,4	404,2
65,01	189,3	98,4	88,7	183,7	286,6
$l=229$ мм					
0,12	1,8	19,2	54,3	21,8	7,9
1,15	305,4	24,7	54,1	91,9	239,6
2,32	114,0	37,4	54,5	75,4	106,5
3,73	621,1	49,7	55,4	129,9	405,2
5,76	192,4	55,5	55,7	102,9	174,4
7,73	8426,6	209,5	58,1	1123,7	5145,4
9,54	1103,3	94,2	58,5	298,8	777,5
11,55	146,8	49,1	62,8	83,2	132,9
14,30	194,6	70,1	61,7	127,6	180,9
18,88	171,0	98,5	66,7	146,1	167,9
27,44	128,0	77,1	80,6	91,7	120,6
44,64	117,4	91,5	86,4	96,9	113,1
56,40	195,1	99,1	95,1	97,3	192,4

Из полученных результатов следует:

а) что даже в случае точно известной ФРТ и при отсутствии внешних источников шума неопределенность, порождаемая конечностью представления числа на выходе АЦП (шум квантования), приводит к значительной ошибке решения;

- б) расширение разрядной сетки АЦП слабо влияет на результат восстановления;
- в) формирование кадра вызывает рост ошибки восстановления также и в случае малоразмерного объекта, для которого амплитуда сигнала, вынесенного крыльями ФРТ за пределы кадра, составляет малую величину, лежащую ниже чувствительности АЦП.

Таблица 2

Разрядность АЦП	НСКО восстановления					
	$\tau=3,75$			$\tau=7,0$		
	<i>D</i>	<i>R</i>	<i>DR</i>	<i>D</i>	<i>R</i>	<i>DR</i>
5	34,9	23,1	34,9	72,1	61,1	72,1
6	29,2	23,1	29,2	64,3	61,1	64,3
8	24,0	23,1	24,0	61,2	61,1	61,2
10	23,3	23,1	23,3	61,2	61,1	61,2

Рассмотрим результаты восстановления изображения, зарегистрированного в лабораторном эксперименте. На рис. 2 представлены изображения объекта (*a*) и его искажение (*b*), которое характеризуется большим значением НСКО, равным 159,7%. На рис. 3, *a*, *b* изображены профили соответственно расчетной (для среды с $\tau = 7,6$) и измеренной (для среды $\tau = 7,0$) ФРТ. На рис. 4 представлены профили модельного объекта (кривая 1), изображения, искаженного в лабораторном эксперименте (2), результатов искажения модельного объекта с помощью измеренной (3) и расчетной (4) ФРТ. Как видим, измеренная ФРТ адекватно отражает процесс формирования искажений, при этом ошибка в пределах раstra 256×256 не превышает 15%. В то же время расчетная ФРТ содержит довольно большую ошибку, вследствие чего НСКО модельного искаженного изображения по отношению к зарегистрированному достигает на растре (256×256) 63,5%. Кажется бы, что с помощью измеренной ФРТ можно получить более качественное восстановление, однако этого не происходит вследствие необходимости осуществлять сглаживание (для борьбы с шумами, усечениями кадров изображения и ФРТ) посредством регуляризации восстанавливающего алгоритма. В итоге, использование расчетной и измеренной ФРТ дает практически одинаковый результат.

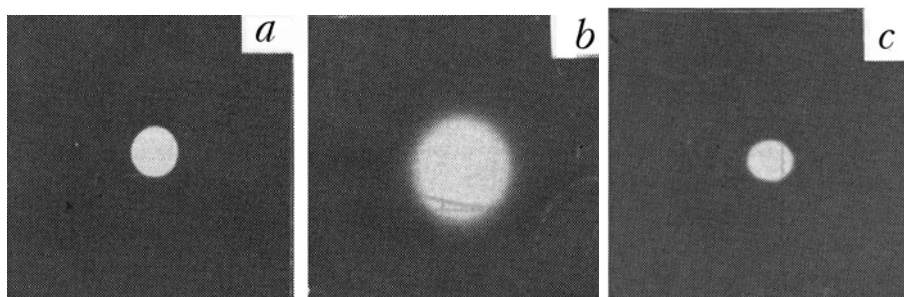


Рис. 2. Изображения тест-объекта

На рис. 2, *c* представлен результат восстановления искаженного изображения, зарегистрированного в лабораторном эксперименте (рис. 2, *b*). Восстановление произведено по методу регуляризации А.Н. Тихонова с использованием измеренной ФРТ. Выбор оптимального значения параметра регуляризации $\alpha_{\text{опт}}$ осуществлялся путем вычисления ряда регуляризованных решений $\hat{f}_{ij}^{\alpha_k}$, для которых рассчитывалась величина НСКО согласно (9). Значение α_k , для которого $\epsilon_k(\hat{f}_{ij}^{\alpha_k})$ достигает минимума, принималось за оптимальное. В результате найдено $\alpha_{\text{опт}} = 1,0 \cdot 10^{-7}$, с использованием которого получено сглаженное решение, характеризующееся величиной НСКО $\epsilon_{\text{опт}} = 43,6\%$. Профиль этого изображения представлен на рис. 5, *a*, а на рис. 5, *b* демонстрируется профиль изображения, полученного тем же фильтром, но с использованием расчетной ФРТ. Как видим, отличия имеются только в области выбросов, обусловленных явлениями Гиббса. При величине $\alpha = 0,1\alpha_{\text{опт}}$ наблюдается значительное возрастание шума, а при $\alpha = 10\alpha_{\text{опт}}$ происходит еще более сильное сглаживание. Значение НСКО для первого случая составляет 48,8%, а для второго — 58,4%.

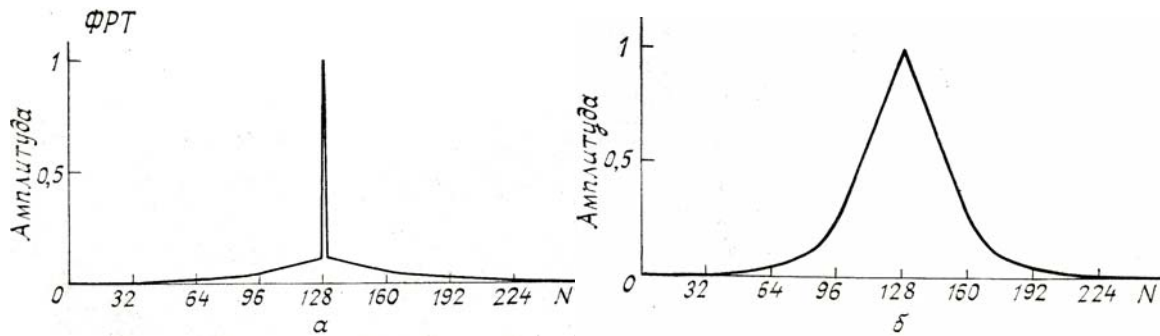


Рис. 3. Профили ФРТ

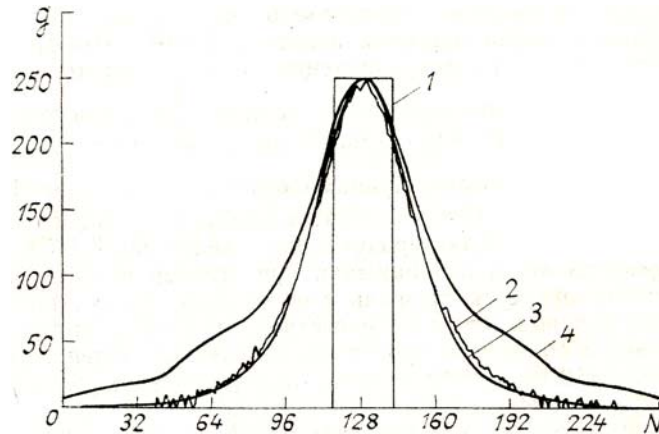


Рис. 4. Профили изображений

Таким образом, искажения изображений, регистрируемых в условиях атмосферно-оптической ситуации первого типа (когда рассеивающий слой средней оптической плотности располагается вблизи объекта), характеризуются большим значением НСКО. При этом использование линейных фильтров не позволяет компенсировать потерю высоких пространственных частот. В рассмотренной ситуации удается восстановить только средний диаметр объекта, измеренный на уровне 0,5 от максимальной амплитуды.

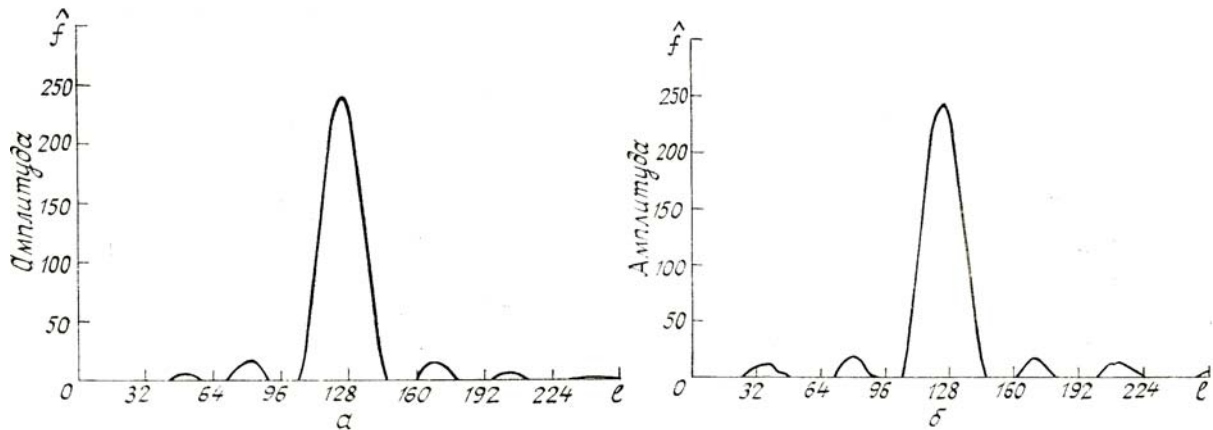


Рис. 5. Профили восстановленного изображения по методу регуляризации А.Н. Тихонова

1. Прэйт У. Цифровая обработка изображений //Перевод с английского. Т. 1. М.: Мир, 1982. 222 с.
2. Белов В.В., Борисов Б.Д., Макушкина И.Ю. //Оптика атмосферы. 1988. Т. 1. № 2. С. 18–25.
3. Борисов Б.Д. //Оптика атмосферы. 1988. Т. 1. № 6. С. 29–33.
4. Бертеро М., Поджо Т.А., Торре В. Некоторые задачи в предварительной обработке визуальной информации //ТИИЭР. 1988. Т. 76. № 8. С. 17–40.
5. Veriel L.R., Vescos J. //Appl. Opt. 1983. V. 22. № 18. P. 2772–2780.
6. Бейтс Р., Мак-Доннел М. Восстановление и реконструкция изображений. М.: Мир, 1989. 333 с.
7. Тихонов А.Н., Гончарский А.В., Степанов В.В., Ягола А.Г. Численные методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1990. 230 с.

V.V. Belov, B.D. Borisov, N.V. Molchunov. Some Aspects of the Problem on Linear Filtration of Images Distorted by Light Scattering in Media.

A possibility of using linear filters for restoration of the images distorted by light scattering in optically dense scattering formations is investigated. It is shown, using a spatially limited object as an example, that in the case of digitized images, having a noise component, a significant smoothing of the solution is required to compensate for the losses of the image quality due to the noise, errors in the pulse transient function of the distorting medium, as well as due to spatial relations connected with the formation of the picture area.