

ИНФОРМАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФУНКЦИИ ПЕРЕДАЧИ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПОСТРОЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ

Современные методы оценки качества сложных систем, формирующих изображения, неотделимы от конкретных задач, решаемых тем или иным прибором. Одним из назначений аппаратуры, использованной в качестве примера для рассмотрения в данной работе, является получение мелкомасштабных изображений поверхности в различных областях спектра излучений. При этом наибольшие трудности возникают при распознавании мелких малоконтрастных изображений.

Цель работы – разработка физико-технических основ оптической информационной технологии построения систем формирования изображения (СФИ).

В частности, предлагается методика определения функции передачи информации (ФПИ) оптической системы (экспериментальная).

Экспериментальное определение функции передачи оптических систем по пограничной кривой

Из имеющегося арсенала способов измерения авторам кажется перспективным способ, основанный на использовании пограничной кривой [1]. Фотосчитывание пограничной кривой можно осуществить с достаточной точностью; изготовление тест-объектов, реализующих резкий край, не вызывает значительных затруднений. Кроме того, возможно использование в качестве тестов реальных объектов с резким краем.

Структура аппаратных средств, обеспечивающая измерение распределения освещенности в изображении полуплоскости, показана на рис. 1, где 1 – зеркало; 2 – лампа; 3 – теплофильтр; 4 – диффузное стекло; 5 – тест-объект; 6 – объектив; 7 – щель; 8 – светофильтр; 9 – диффузное стекло; 10 – фотоумножитель. Испытуемый объектив 6 проецирует щель 7, помещенную перед фоторегистратором 10, изображение резкого края 5. Характеристика снимается при перемещении щели вместе с фоторегистратором (фотоумножитель) поперек изображения. Полученную таким образом пограничную кривую затем пересчитывают в ФПИ.

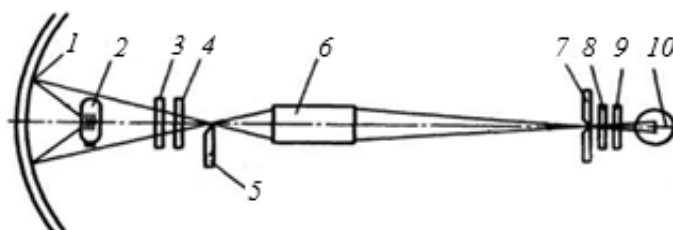


Рис. 1

Существует несколько способов определения с достаточной точностью ФПИ по пограничным кривым. Воспользуемся способом дифференцирования пограничной кривой [1]. Как было показано [2], ФПИ $W(i, \vartheta)$ и функция рассеяния линии $A(x)$ связаны соотношением

$$W(i, \vartheta) = \int_{-\infty}^{\infty} A(x) e^{-i2\pi\vartheta x} dx \quad (1)$$

Получение ФПИ этим способом сводится к определению функции рассеяния линии по пограничной кривой

$$A(x) = dH(x)dx, \quad (2)$$

где $H(x)$ – пограничная кривая.

При определении ФПИ фотосистемы по пограничной кривой эту нелинейность необходимо учитывать. С этой целью для фотоносителя, на котором получено изображение, необходимо определить зависимость коэффициента пропускания τ от экспозиции H , т. е. $\tau = f(H)$, и с учетом этой зависимости преобразовать пограничную кривую $\tau = f_1(x)$ в кривую $H = f_2(x)$. Линеаризованная таким образом пограничная кривая используется для дальнейших расчетов.

Определим характеристику, аналогичную ФПИ, по сигналам прямоугольной формы с использованием пограничной кривой [1]. Если имеется распределение яркости, изображенное на рис. 2, а (идеальный импульс прямоугольной формы), то его можно представить в виде разности двух ступенчатых функций (рис. 2, б, в). Учитывая это, изображение штриха конечной ширины, полученное реальной оптической системой, представляем в виде разности двух соответствующих пограничных кривых (рис. 3).

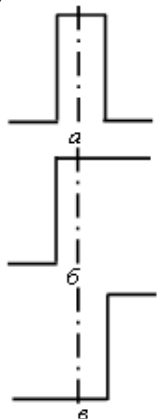


Рис. 2

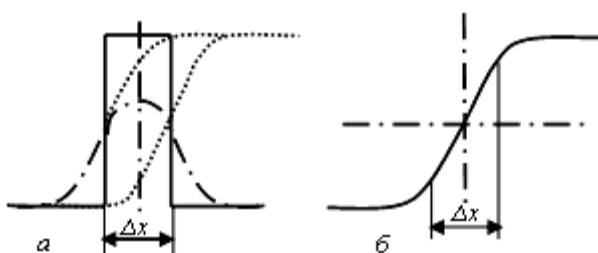


Рис.3

Интенсивность сигнала в центре штриха в этом случае определяем как разность интенсивностей в двух точках, пограничной кривой, отстоящих от центра этой кривой на расстоянии, равном половине ширины штриха $\Delta x/2$. В случае воспроизведения периодического прямоугольного сигнала пограничные кривые соседних штрихов могут перекрываться, тогда интенсивность сигнала в центре каждого штриха и в центре промежутков между ними будет определяться алгебраической суммой всех пограничных кривых в данных точках [1]. Для некоторой частоты $\mathcal{G}_n = 1/(2\Delta x)$ максимальную I_{\max} (в центре штриха) и минимальную I_{\min} (в центре промежутка между штрихами) интенсивности (рис. 4, а) определяем следующим образом:

$$I_{\max} = (I_B - I_A) + (I_D - I_C) + (I_F - I_E), \quad I_{\min} = (I_C - I_B) + (I_B - I_D).$$

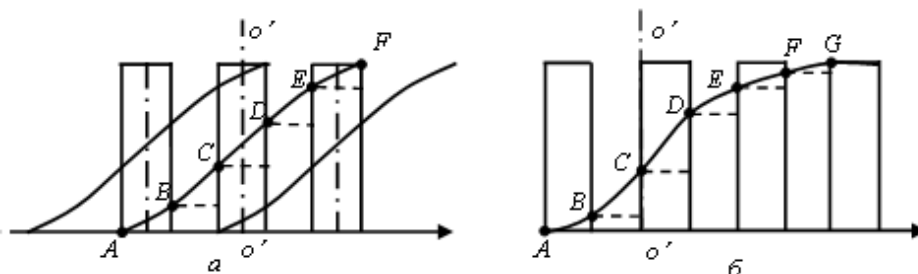


Рис. 4

Выражение для ФПИ периодических прямоугольных сигналов, аналогичное выражению в работе [2] для гармонических сигналов, имеет вид

$$W_n(\theta) = \sqrt{W_n^2 \sin(\theta) + W_n^2 \cos(\theta)}, \quad (3)$$

где $W_n \sin(\vartheta)$, $W_n \cos(\vartheta)$ – аналоги синусного и косинусного Фурье-преобразований [3, 4] импульсной функции системы (индекс « n » обозначает прямоугольный сигнал).

Сначала рассмотрим случай симметричной пограничной кривой, для которой $W_n \sin(\vartheta) = 0$ и $W_n(\vartheta) = W_n \cos(\vartheta)$. Значение ФПИ системы в этом случае запишем в виде $W_n(\vartheta_x) = W_n \cos(\vartheta_x) = (I_{\max} - I_{\min}) / (I_{\max} + I_{\min})$, где ϑ_x – частота прямоугольного периодического сигнала.

В случае пограничной кривой, асимметричной относительно центра, необходимо, кроме $W_n \cos(\vartheta)$, найти $W_n \sin(\vartheta)$. Значение $W_n \sin(\vartheta)$ определяем аналогичным образом, но для вычисления максимальной и минимальной интенсивностей пограничную кривую разбивают на одинаковые участки, равные ширине штриха, влево и вправо относительно ее центра (рис. 4, б). Тогда

$$I_{\max} = (I_Q - I_F) + (I_E - I_D) + (I_C - I_B), \quad I_{\min} = (I_F - I_E) + (I_D - I_C) + (I_B - I_D).$$

Значение $W_n \sin(\vartheta)$ определяется по формуле $W_n \sin(\vartheta) = (I_{\max} - I_{\min}) / (I_{\max} + I_{\min})$.

Аналогично определяются значения функций $W_n \sin(\vartheta)$ и $W_n \cos(\vartheta)$ для последовательно возрастающих частот, пока не будет достигнута частота, при которой значение каждой из этих функций станет пренебрежимо малым. Для определения синусной составляющей Фурье-преобразования необходимо функцию $W_n \sin(\vartheta)$ разложить в ряд Фурье для каждой частоты ϑ_k :

$$W_n \sin(\vartheta_k) = (4/\pi) [W \sin(\vartheta_k) - (1/3)W \sin(3\vartheta_k) + (1/5)W \sin(5\vartheta_k) - \dots]$$

Сигнал прямоугольной формы при разложении имеет конечное число гармонических составляющих, так как фотосистема воспроизводит только определенный диапазон пространственных частот.

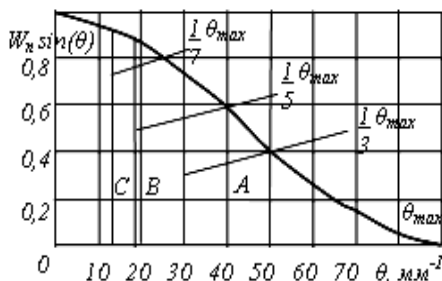


Рис. 5

Рассмотрим пример, изображенный на рис. 5. В диапазоне частот от ϑ_{\max} до $(1/3)\vartheta_{\max}$ (участок А) в Фурье-разложении сигнала прямоугольной формы имеется только основная гармоника, поэтому

$$W_n \sin(\theta) = (4/\pi)W \sin(\theta). \quad (4)$$

В пределах от $(1/3)\vartheta_{\max}$ до $(1/5)\vartheta_{\max}$ (участок В) в разложении будут 1-я и 3-я гармоники:

$$W_n \sin(\theta) = (4/\pi) [W \sin(\theta) + (1/3)W \sin(3\theta)]; \quad (5)$$

В пределах от $(1/5)\vartheta_{\max}$ до $(1/7)\vartheta_{\max}$ (участок С) в разложении будут 1-, 3- и 5-я гармоники:

$$W_n \sin(\theta) = (4/\pi) [W \sin(\theta) + (1/3)W \sin(3\theta) - (1/5)W \sin(5\theta)]. \quad (6)$$

В случае необходимости дальнейшее разбиение кривой ФПИ на отдельные области производится с кратностью высших составляющих ряда Фурье.

Таким образом, можно получить синусное Фурье-преобразование $W \sin(\vartheta)$ по значению функции $W_n \sin(\vartheta)$, если, начиная с максимальной пространственной частоты, воспроизводимой системой, приближаться к минимальной частоте, вводя при этом высшие гармонические составляющие по мере их попадания в полосу пропускания системы. Аналогично определяют косинусное Фурье-преобразование $W \cos(\vartheta)$ по известной функции $W_n \cos(\vartheta)$. Имея синусную и косинусную составляющие, ФПИ системы находят по формуле

$$W(\theta) = \sqrt{W^2 \cos(\theta) + W^2 \sin(\theta)} .$$

Рассмотрим численный пример определения ФПИ по пограничной кривой, проведенной в координатах $H = f(x)$ и имеющей некоторую асимметрию относительно своего центра рис. 6, а, б.

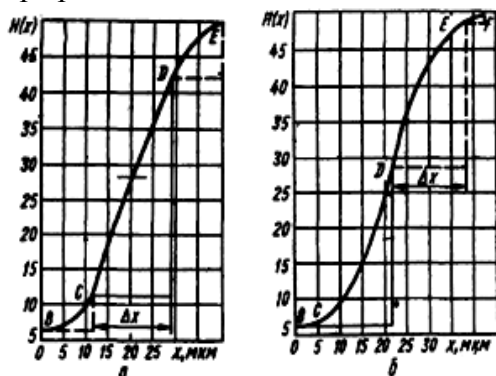


Рис. 6

Центральная точка пограничной кривой соответствует уровню средней экспозиции

$$H_{cp} = (H_{\max} + H_{\min}) / 2 = (50,5 + 8,5) / 2 = 29,5 .$$

Для определения значения функций $W_n \cos(\vartheta)$ и $W_n \sin(\vartheta)$ пограничную кривую необходимо разбить на интервалы. Интервал разбиения определяем по формуле $\Delta x = 1/(2\vartheta)$. В качестве примера определим значение функции $W_n \cos(\vartheta)$ и $W_n \sin(\vartheta)$ для пространственной частоты $\vartheta = 30 \text{ мм}^{-1}$. В этом случае интервал разбиения

$\Delta x = 1/(2\vartheta) = 1/(2 \cdot 30 \text{ мм}^{-1}) = 0,0167 \text{ мм} = 16,7 \text{ мкм}$. Разбиение пограничной кривой для определения значения функции $W_n \cos(\vartheta)$ на частоте $\vartheta = 30 \text{ мм}^{-1}$ изображено на рис. 6, а. Значения максимальной и минимальной интенсивностей соответственно

$$I_{\max} = I_D - I_C = (41,8 - 13) = 28,8, \quad I_{\min} = (I_E - I_D) + (I_C - I_B) = (50,5 - 41,8) + (13 - 6,5) = 15,2 .$$

Откуда $W_n \cos(30) = (I_{\max} - I_{\min}) / (I_{\max} + I_{\min}) = 0,31$. Значение величины $W_n \sin(\vartheta)$ определяем при разбиении пограничной кривой на участки согласно рис. 6, б:

$$I_{\max} = (I_D - I_C) + (I_F - I_E) = (28,5 - 6,7) + (50,5 - 49,4) = 22,9 ,$$

$$I_{\min} = (I_E - I_D) + (I_C - I_B) = (49,4 - 28,5) + (6,7 - 6,5) = 21,1$$

Откуда $W_n \sin(\vartheta) = (I_{\max} - I_{\min}) / (I_{\max} + I_{\min}) = 0,041$.

При разбиении кривой крайние участки разбиения (верхний и нижний) обычно откладывают меньшими величинами Δx , так как производная dH/dx вне зоны размытия пограничной кривой равна нулю.

Аналогично определяются значения функций $W_n \cos(\vartheta)$ и $W_n \sin(\vartheta)$ для других пространственных частот. Результаты вычислений этих функций приведены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

$\vartheta, \text{мм}^{-1}$	$\Delta x, \text{мкм}$	I_{\max}	I_{\min}	$W_n \cos(\vartheta)$
10	50	44	0	1
20	25	37,9	6,1	0,728
30	16,7	28,8	15,2	0,31
40	12,5	23	21	0,045
43	11,6	22	22	0

Таблица 2

$\vartheta, \text{мм}^{-1}$	$\Delta x, \text{мкм}$	I_{\max}	I_{\min}	$W_n \sin(\vartheta)$
10	50	22	22	0
20	25	22	22	0
30	16,7	22,9	21,1	0,041
40	12,5	24,4	19,6	0,109
50	10	24,4	19,6	0,109
60	8,5	23,6	20,4	0,073
70	7,95	22,9	21,1	0,016

По данным, приведенным в табл. 1, 2, построены кривые функций $W_n \cos(\vartheta)$ (рис. 7, а) и $W_n \sin(\vartheta)$ (рис. 7, б).

Для определения косинусного Фурье-преобразования площадь, ограниченную кривой $W_n \cos(\vartheta)$, разбиваем на участки в соответствии с рис 6.

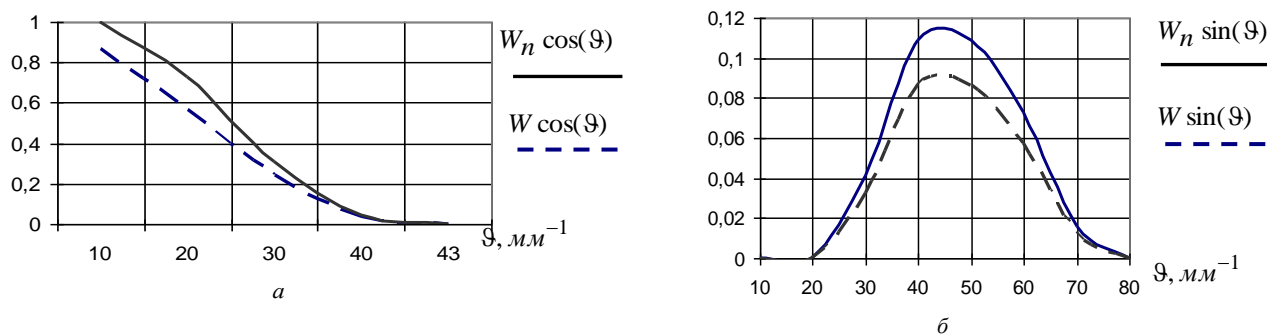


Рис. 7

В диапазоне пространственных частот от 43 до 143 $мм^{-1}$ значение $W_n \cos(\vartheta)$ определяется выражением (4); в диапазоне от 14,3 до 8,6 $мм^{-1}$ – по формуле (5); в диапазоне от 8,6 до 6,15 $мм^{-1}$ – по формуле (6). Аналогично разбиваем кривую $W_n \sin(\vartheta)$ (рис. 7,б).

В диапазоне пространственных частот от 80 до 26,6 $мм^{-1}$

$$W_n \sin(\theta) = (4/\pi)[W \sin(\theta) + (1/3)W \sin(3\theta)].$$

Значения косинусного $W \cos(\vartheta)$ и синусного $W \sin(\vartheta)$ Фурье-преобразований для всего диапазона воспроизводимых пространственных частот приведены в табл. 3, 4. Построены кривые функций $W \cos(\vartheta)$ (рис. 7,а) и $W \sin(\vartheta)$ (рис. 7,б).

Таблица 3

ϑ	10	20	30	40	48
$W \cos(\vartheta)$	0,866	0,567	0,245	0,035	0

Таблица 4

ϑ	10	20	30	40	50	60	70	80
$W \sin(\vartheta)$	0	0	0,032	0,086	0,086	0,057	0,012	0

Затем, используя формулу из работы [2], определяем значение ФПИ фотосистемы. Результаты вычислений приведены в табл. 5. Построенная по этим результатам, ФПИ фотосистемы изображена на рис. 8.

Таблица 5

ϑ	10	20	30	40	50	60	70	80
$W(\vartheta)$	0,866	0,567	0,247	0,093	0,086	0,057	0,012	0

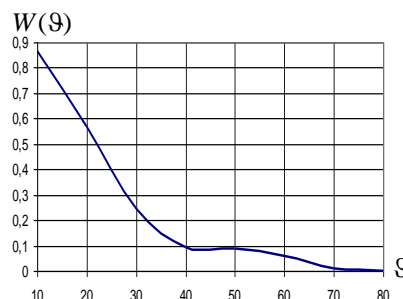


Рис. 8

Определение ФПИ систем с использованием уравнения Гаусса

Функция рассеяния линии, связанная с пограничной кривой уравнением (3), содержит в себе всю информацию об изобразительных свойствах исследуемого участка поля зрения оп-

тической системы. Используя прямое Фурье-преобразование, по известной функции рассеяния линии можно вычислить ФПИ с помощью уравнения (1), однако при этом требуется большое количество вычислений. Если же функцию рассеяния аппроксимировать аналитическим выражением, процесс получения ФПИ может быть значительно упрощен.

Используя работу [1], результирующую функцию рассеяния оптической системы с учетом факторов движения с достаточной точностью можно описать законом Гаусса:

$$A(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}, \quad (7)$$

где σ – постоянная Гаусса.

Учитывая это и используя Фурье-преобразование, получаем

$$W(g) = e^{-2\pi^2\sigma^2g^2}. \quad (8)$$

Формула (8) показывает, что ФПИ в этом случае однозначно определяется одним параметром – постоянной закона Гаусса σ . Выражение для нормированной функции рассеяния имеет вид

$$A_H = e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}, \quad (9)$$

при $x = \sigma$, $A_H = e^{-1/2} = 0,606$.

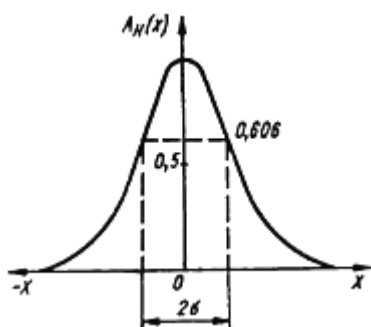


Рис. 9

Значение σ можно определить и графически, если известна функция рассеяния системы (рис. 9). Как видно из рисунка, постоянная σ соответствует половине ширины функции рассеяния на уровне 0,606 максимума.

Практически значение σ удобнее определять по пограничной кривой. Например, приравняв значение функции рассеяния максимальному градиенту нормированной пограничной кривой ($\varphi_{H \max}$) [1]:

$$(\varphi_{H \max}) = (dH/dx)_{\max} = 1/(\sigma\sqrt{2\pi}), \text{ получим } \sigma = 0,4/\varphi_{H \max}.$$

Параметр σ можно определить и другим способом. Проинтегрировав левую и правую части уравнения (7), получаем

$$H(x) = 1/(\sigma\sqrt{2\pi}) \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} dx. \quad (10)$$

При $\sigma = 1$ уравнение (10) переходит в уравнение Лапласа $\Phi(x)$:

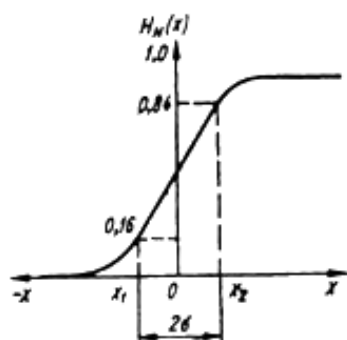


Рис. 10

$$H(x) = \Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{x^2}{2}} dx.$$

Задаваясь значениями $x_1 = -1$ и $x_2 = 1$, получаем $H(x_1) = 0,16$ и $H(x_2) = 0,84$. Таким образом, для определения σ необходимо на графике нормированной пограничной кривой (рис. 10) отметить точки на уровне 0,16 и 0,84 и спроецировать на ось x .

Для большей точности аппроксимации целесообразно определять параметр σ как способом вычисления максимального градиента пограничной кривой, так и графически по уровням 0,16 и 0,84 нормированной пограничной кривой. В формулу (10) в этом случае нужно подставить среднеарифметическое из всех полученных значений σ .

Рассмотрим пример определения ФПИ оптической системы по нормированной пограничной кривой, изображенной на рис. 11, а.

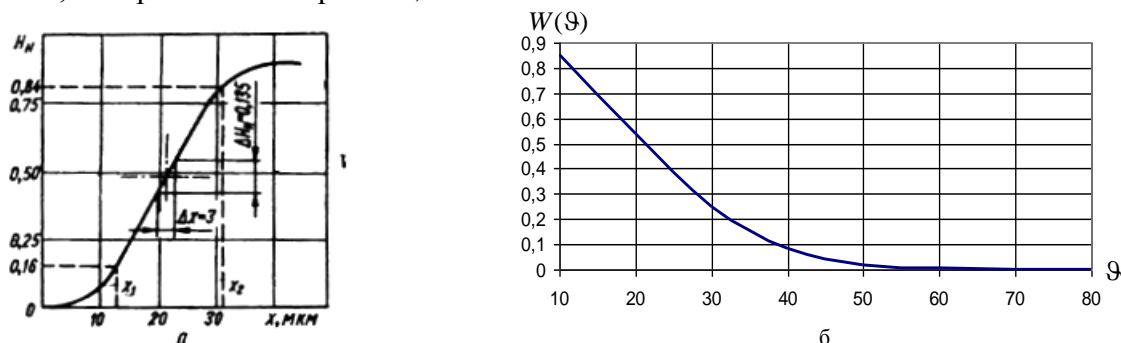


Рис. 11

Величина максимального градиента нормированной пограничной кривой соответствует средней точке кривой:

$$(\varphi_{H \max}) = (dH / dx)_{\max} = (\Delta H / \Delta x)_{\max} = \frac{0,57 - 0,435}{23 \cdot 10^{-3} - 20 \cdot 10^{-3}} = 45.$$

Значение постоянной $\sigma_1 = 0,4 / \varphi_{H \max} = 0,4 / 45 = 0,0089 \text{ мм}$; значение постоянной, определенное по уровням 0,16 и 0,84:

$$\sigma_2 = (x_2 + x_1) / 2 = (0,032 + 0,013) / 2 = 0,009 \text{ мм};$$

среднее значение $\sigma_{cp} = (\sigma_1 + \sigma_2) / 2 = 0,00895$.

ФПИ оптической системы определяется по формуле (8). Полученные при этом данные приведены в табл. 6, а на рис. 11, б изображен график ФПИ, построенный на основании этих данных.

Таблица 6

ρ	10	20	30	40	50	60	70	80
$W(\rho)$	0,85	0,54	0,25	0,082	0,02	0,004	0,0005	0,00005

Выводы

Предложена структура аппаратных средств для измерения ФПИ объектива. В основе принципа действия предложенной установки использовано непосредственное сканирование синусоидального тест-объекта и преобразование функции рассеяния точки. Установлено, что недостатком всех методов фотометрического сканирования изображения является то, что при их использовании необходима исчерпывающая информация о тест-объекте (контраст, форма, размер) и его освещенности. Показано, что использование синусоидальной миры позволяет применять простые математические преобразования, но такую миру сложно изготовить, и, наоборот, применение физически простых мир требует сложной математической обработки.

Список литературы: 1. Данилов, В.В., Жук, В.В. Сверхразрешение оптических систем // Современные информационные и электронные технологии. – Одесса. – 2005. – С. 42. 2. Богомаз, У.Г., Белик, Т.В., Данилов, В.В. Оптические информационные технологии построения систем формирования изображений // Вісн.Донец.ун-ту. Сер.А. Природн. науки. – 2013. – №1. – С. 164-173. 3. Шестов, Н.С. Выделение оптических сигналов на фоне случайных помех. – М.: Сов. радио, 1967. – 348с. 4. Сергиенко, А.Б. Цифровая обработка сигналов. – С.Пб.: Питер, 2003. – 604с.