

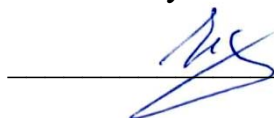
МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Тульский государственный университет»

Политехнический институт  
Кафедра «Промышленная автоматика и робототехника»

Утверждено на заседании кафедры  
«Промышленная автоматика  
и робототехника»  
«17» января 2023 г., протокол № 2

И.о. заведующего кафедрой



О.А. Ерзин

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ  
ПО ПРОВЕДЕНИЮ ПРАКТИЧЕСКИХ РАБОТ  
ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)**

Программные средства обработки информации

основной профессиональной образовательной программы  
высшего образования – программы бакалавриата

по направлению подготовки

29.03.03 Технология полиграфического и упаковочного производства

с направленностью (профилем)

Технология полиграфического производства

Формы обучения: заочная


Идентификационный номер образовательной программы: 290303-01-23

Тула 2023 год

**ЛИСТ СОГЛАСОВАНИЯ**  
**методических указаний по проведению практических занятий**  
**дисциплины (модуля)**

**Разработчик:**

Яковлев Б.С., доцент, канд. техн. наук  
(ФИО, должность, ученая степень, ученое звание)

  
(подпись)

## **СОДЕРЖАНИЕ**

Практическое занятие №1	
Моделирование представления градации изображения	4
Практическое занятие №2	
Моделирование квантования сигнала изображения по уровню	7
Практическое занятие №3	
Моделирование размытия при отображении изобразительной информации. Взаимосвязь различных функций, описывающих размытие.	10
Практическое занятие №4	
Моделирование размытия при отображении изобразительной информации с применением пространственно-спектральных методов.	16
Практическое занятие №5	
Воздействие размытия на отображение одномерной штриховой детали изображения.	24
Практическое занятие №6	
Моделирование флуктуаций изображения и коррекция шумовых характеристик.	28
Практическое занятие №7	
Основные модели фильтрации в репродукционной системе одновременной форматной обработки и расчет воздействия фильтрации на воспроизведение изображения.	33
Практическое занятие №8	
Модель фильтрации в системе поэлементной обработки изображения и расчет воздействия фильтрации на воспроизведение изображения.	41

## 1. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ РАБОТЫ

**Цель работы:** Моделирование градационных характеристик изображения.

**Задачи работы:** произвести моделирование изменения градационного содержания изображения, произвести анализ полученных результатов.

## 2. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Один из видов информации, содержащейся в изображении - это информация о градации или градационная характеристика изображения. Под градацией понимается изменение яркостей или оптических плотностей, которое субъективно или объективно наблюдается между различными сюжетными участками изображения, и которое позволяет выделить и воспринять эти сюжетные участки. Такое изменение обычно относят к достаточно большим по линейным размерам и площади сюжетным участкам изображения. Изменение яркости и оптической плотности в изображении также называют изменением тонов.

Последовательность изменения тонов или градации изображения может быть разной. Можно представить два одинаковых по сюжету изображения, для которых изменение яркости или оптической плотности между двумя одинаковыми участками изображения в одном будет больше, чем в другом. В таком изображении выделение рассматриваемого участка сюжета будет более контрастным. Изменение, перепад яркостей, тонов одного изображения относительно изменения, перепада яркостей, тонов другого изображения может быть больше по всему изображению. Такое изображение будет иметь больший интервал яркостей или оптических плотностей, т.е. большую разность между максимальной и минимальной яркостью  $\Delta B = B_{\max} - B_{\min}$  или между максимальной и минимальной оптической плотностью изображения:  $\Delta D = D_{\max} - D_{\min}$ . Интервал  $\Delta B$  или  $\Delta D$  называют также динамическим диапазоном. Изображение с большим интервалом  $\Delta B$  или  $\Delta D$  в целом будет выглядеть более контрастным. Для простоты на рис. 1.1 представлено изменение тонов как ступенчатое, хотя обычно оно происходит непрерывно, постепенно.

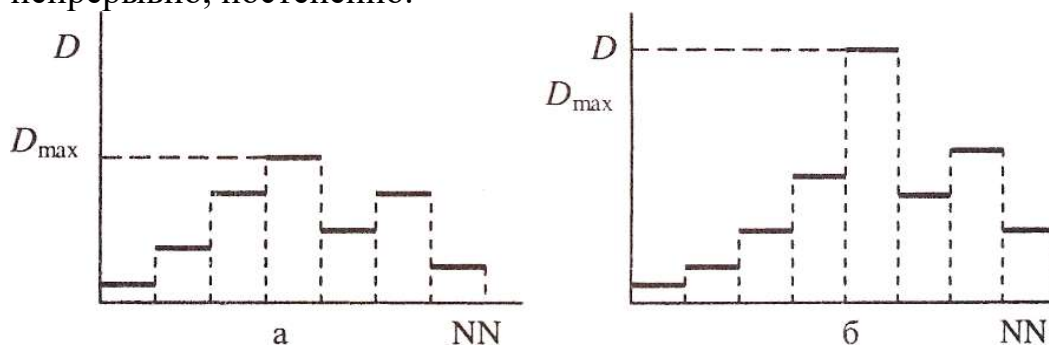


Рисунок 1.1. Воспроизведение градаций с общим контрастом:  
а - малым; б - большим

Можно ввести понятие градиента для обозначения изменения контраста изображения. Градиент - это скорость приращения оптической плотности изображения:  $g = \Delta D / \Delta N$ , где  $\Delta N$  - обозначение сравниваемых участков. Можно оценить соотношение градиентов для первого и второго изображений:  $g_1 = \Delta D_1 / \Delta N_1$  и  $g_2 = \Delta D_2 / \Delta N_2$ . Так как в данном случае  $\Delta N_1$  тождественно  $\Delta N_2$ , то  $g_1 / g_2 = \Delta D_1 / \Delta D_2$ . Возможно, что оба изображения имеют одинаковый интервал оптических плотностей

между самым темным и самым светлым участком изображения, но одно из них имеет большие изменения оптической плотности между сюжетно одинаковыми участками в светлых тонах изображения, которые называются светами, а другое в темных тонах, которые называют тенями (рис. 1.2). Различные по тону участки изображения можно назвать градационными зонами. Помимо светов и теней, можно также выделить промежуточную между ними градационную зону - зону полутонов.

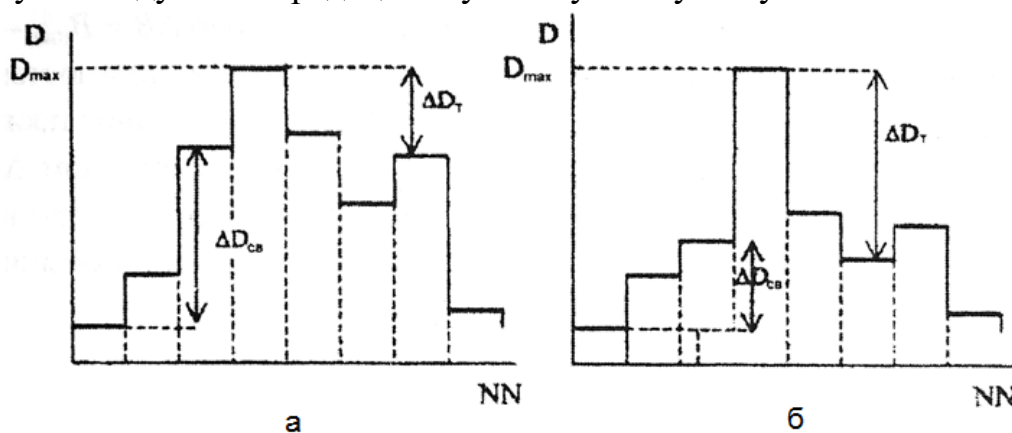


Рисунок 1.2. Воспроизведение градаций изображения с контрастом: а - большим в светах и малым в тенях; б - большим в тенях и малым в светах.

В случае равенства интервалов разных реализаций одинакового сюжета нельзя сказать, что какое-то изображение более контрастно, но очевидно, что контраст этот будет разным в разных градационных зонах изображения. Характер изменения тонов (градаций) изображения можно назвать градационной характеристикой этого изображения, а скорость изменения тонов - градиентом градационной характеристики.

Таким образом, под градационной характеристикой изображения понимают как общее изменение яркостей или оптических плотностей в изображении, так и характер распределения этого изменения воспроизводимых тонов по градационным зонам внутри интервала.

Как уже отмечалось, обычно изменение тонов в изображении будет не ступенчатым, скачкообразным (см. рис. 1.1 и 1.2), а постепенным, непрерывным. Тогда градационную характеристику сложно построить как функцию двух координат, так как участки изображения строго не определены. Однако ее можно оценить, сопоставляя  $D$  или  $B$  одинаковых точек изображения, или построив гистограммы двух сюжетно одинаковых изображений.

Гистограмма - это график зависимости частоты появления в изображении точек с какой-либо величиной оптической плотности  $\rho_D$  от величины этой оптической плотности  $D$ . Реально определяются значения  $D$  через равные пространственные промежутки. Каждое  $D_i$  оценивается в некотором малом интервале.

Поскольку площадь, занимаемая участками (деталью сюжета), не изменяется, и условия получения гистограмм - т.е. координаты отсчетов  $D$  не изменяются, то сравнение двух гистограмм будет характеризовать и разность градаций двух изображений.

### 3. МЕТОДИКА И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1) Провести измерение оптических плотностей  $D$  изображений оригиналов и анализ полученных градационных характеристик изображений.

2) Оценить полученные интервалы  $AD$  и отношение градиентов в градационных зонах изображения.

- 3) Построить и провести анализ гистограмм полученных изображений.
- 4) Прodelать указанные операции с использованием компьютера и опции «Гистограмма».
- 5) Сделать выводы о градационных характеристиках изображений и определить их влияние на форму гистограмм.

#### **4. ОБОРУДОВАНИЕ И МАТЕРИАЛЫ**

- 1) ПЭВМ со специальным ПО.
- 2) Проектор.
- 3) Калькулятор.
- 4) Карандаш, линейка, резинка, миллиметровая бумага.

#### **5. СОДЕРЖАНИЕ И ФОРМА ОТЧЕТА**

- 1) Краткое содержание основных теоретических положений работы.
- 2) Перечень основных операций и результаты наблюдений.
- 3) Анализ полученных результатов и выводы.

**Практическое занятие № 2 (2 часа)**  
**МОДЕЛИРОВАНИЕ КВАНТОВАНИЯ**  
**СИГНАЛА ИЗОБРАЖЕНИЯ ПО УРОВНЮ**

### 1. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ РАБОТЫ

**Цель работы:** изучение квантованного по уровню сигнала изображения, связи условий квантования с качеством изображения.

**Задачи работы:** исследование влияния параметров квантования сигнала на качество воспроизводимой изобразительной информации, оценка зависимости параметров сигнала и пороговых характеристик восприятия от параметров квантования сигнала.

### 2. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

В настоящее время при получении изображений в разных системах регистрации, при передаче изобразительной информации по каналам связи широко применяются цифровые методы. В основе этих методов лежит дискретизация и квантование изображения. В данной работе изучается метод представления градации сигнала изображения в квантованном по уровню виде и влияние квантования на качество изображения.

При использовании цифровых методов передачи изобразительной информации полутоновое изображение преобразуется в дискретное как в пространстве, так и по уровню сигнала. Такое изображение может быть оцифровано с помощью аналого-цифровых преобразователей. При аналого-цифровом преобразовании весь диапазон возможных значений входного сигнала  $E$  разбивается на  $N$  уровней. В каждом интервале квантования со значениями сигнала  $E$  на входе от  $E_{i,\min}$  до  $E_{i,\max}$  (номер интервала принимает значения  $i = 1, 2, \dots, N-1$ , он преобразуется в сигнал на выходе с постоянным значением  $S_i$ . Как показано на рис. 2.1, каждому интервалу входного сигнала  $E_{i,\min}$  до  $E_{i,\max}$  соответствует квантованное значение выходного сигнала  $S_i$ :

$$S = S_i, \text{ если } E_{i,\min} < E < E_{i,\max} \quad (2.1)$$

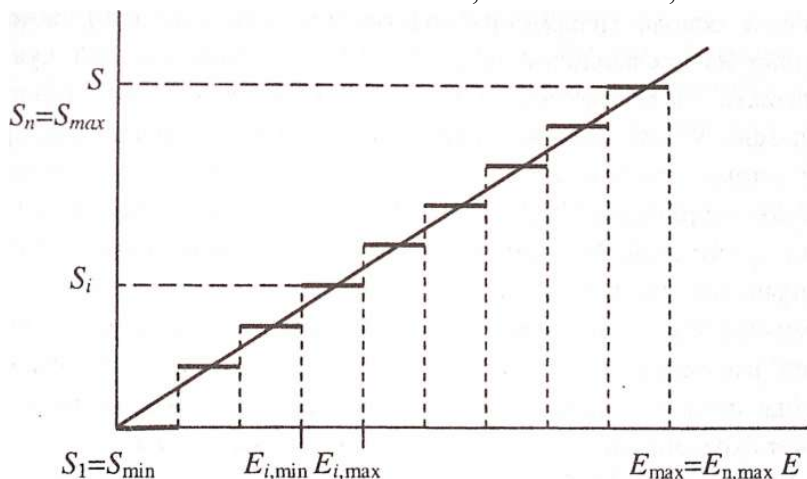


Рисунок 2.1. Преобразование входного сигнала  $E$  в выходной квантованный  $S$ .

Величина  $N$ , (число уровней квантования) ограничивается числом разрядов аналого-цифрового преобразователя. Так для восьми разрядного аналого-цифрового преобразователя  $N = 256$ .

При выборе числа уровней квантования изображений важно учитывать пороговые характеристики зрительного анализатора. Зрительный анализатор человека способен различать перепад яркостей деталей изображения  $\psi E$  в том случае, если он превышает

некоторое пороговое значение  $\psi$ . Зрительное восприятие человека подчиняется закону Вебера - Фехнера. Установлено, что пороговая величина, обратная контрастной чувствительности глаза, равна  $\psi = \Delta E / E = 0,02$ . Число уровней  $N$ , на которое целесообразно разделить диапазон оптических плотностей на полутоновом изображении в пределах действия закона Вебера - Фехнера, определяется по формуле:

$$N = \frac{1}{\psi} \int_{E_{\min}}^{E_{\max}} dE / E = \frac{1}{\psi} \ln(E_{\max} / E_{\min}), \quad (2.2)$$

где  $E_{\min}$  и  $E_{\max}$  минимальное и максимальное значение яркости изображения (уровней входного сигнала).

На реальных черно-белых полутоновых изображениях на непрозрачной основе (например, полиграфических оттисках), контраст обычно не превышает  $K = E_{\max} / E_{\min} = 100$ . При контрастной чувствительности глаза  $1/\psi = 50$ , на таких изображениях можно различить примерно  $N = 50 \ln 100 = 230$  градаций (интервалов яркости). Это приводит к тому, что в качестве стандарта необходимого числа градаций обычно принимают  $N = 256$ , т.е. ближайшее число, которое может быть представлено в двоичном коде с числом разрядов  $n = 8$ . Однако на практике число градаций часто может быть уменьшено без существенного ухудшения качества изображения. Необходимое число градаций изображения зависит от контраста изображения, от назначения и вида печатной продукции, и, например, для газетной продукции может быть ограничено даже 16-ю уровнями квантования.

При воспроизведении цветных изображений вследствие зависимости величины контрастной чувствительности глаза от спектрального состава излучения число необходимых уровней квантования также может быть ограничено, и составлять, например, для желтой краски 8-16, для пурпурной 64-128 и для голубой 64-128.

По сути, квантованная шкала позволяет представить непрерывную градацию (несчетное множество) тонов аналогового изображения ограниченным числом ступеней, число которых должно быть настолько велико, чтобы эта ступенчатость не была визуаль-но заметна.

### 3. МЕТОДИКА И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1) Вывести с помощью компьютера на цветной монитор цветное изображение оригинала с максимальным числом уровней квантования  $N = 256$  во всех трех каналах RGB.

2) Проанализировать, как меняется качество полутонового изображения при изменении числа уровней квантования.

3) Вызвать из памяти компьютера подпрограмму, позволяющую изменить число уровней квантования. Последовательно, изменяя значения  $N$  на 128, 64, 32, 8, 4 и 2 определить число уровней квантования, соответствующее заметной потере деталей оригинала и ухудшению качества изображения.

4) С помощью компьютерной подпрограммы-редактора в режиме редактирования увеличивать число уровней квантования  $N$  на 1-2 ступени до тех пор, пока искажения полутонового изображения пропадут.

5) Получить и проанализировать гистограммы полученных изображений при разном числе уровней квантования.

### 4. ОБОРУДОВАНИЕ И МАТЕРИАЛЫ

1) ПЭВМ со специальным ПО.



- 2) Проектор.
- 3) Калькулятор.
- 4)) Карандаш, линейка, резинка, миллиметровая бумага.

## **5. СОДЕРЖАНИЕ И ФОРМА ОТЧЕТА**

- 1) Краткое описание основных теоретических положений работы.
- 2) Перечень основных операций и полученные результаты наблюдения.
- 3) Анализ полученных результатов и выводы.

**МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗМЫТИЯ ПРИ ОТОБРАЖЕНИИ ИЗОБРАЗИТЕЛЬНОЙ  
ИНФОРМАЦИИ.**

**ВЗАИМОСВЯЗЬ РАЗЛИЧНЫХ ФУНКЦИЙ, ОПИСЫВАЮЩИХ РАЗМЫТИЕ**

**1. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ РАБОТЫ**

**Цель работы:** изучить основные функции, описывающие размытие: функцию размытия линии (ФРЛ), краевую функцию (КФ) и пару преобразований КФ - ФРЛ.

**Задачи работы:** осуществить расчет и построение КФ по заданной ФРЛ и ФРЛ по заданной КФ.

**2. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ**

Точность передачи мелких деталей наряду с тоно- и цветовоспроизведением определяет качество получаемого изображения. Вместе с тем, отдельные звенья систем и системы обработки и передачи информации в целом отличаются общим фундаментальным свойством - размытием или инерционностью. Например, в случае ярко светящейся точки бесконечно малых размеров объектив в плоскости наилучшей фокусировки формирует ее оптическое изображение, которое представляет собой некоторое пятно размытия с постепенно убывающей интенсивностью от центра к краям пятна. При этом форма распределения интенсивности в пятне размытия характеризует свойство конкретного звена (в нашем примере объектива) или системы в целом воспроизводить детали яркости малых размеров, т.е. определяет потери резкости в изображении мелких деталей.

Для систем, обладающих свойствами линейности и изотропности, размытие описывается посредством ряда взаимосвязанных функций. Для упрощения расчетов, а также методов экспериментальной оценки, эти функции рассматриваются применительно к так называемым типовым одномерным объектам. К ним относятся следующие.

**1. Край полуплоскости** - это резкая прямолинейная граница между освещенной и неосвещенной частями пространства, например, край лезвия ножа и т.п. (рис. 3.1)

Математически край полуплоскости можно записать:

$$\begin{aligned} B(x) &= 0 \text{ при } x < 0 \\ B(x) &= 1 \text{ при } x \geq 0 \end{aligned} \quad (3.1)$$

где  $B(x)$  - распределение интенсивности в направлении  $x$ , перпендикулярном направлению края полуплоскости.

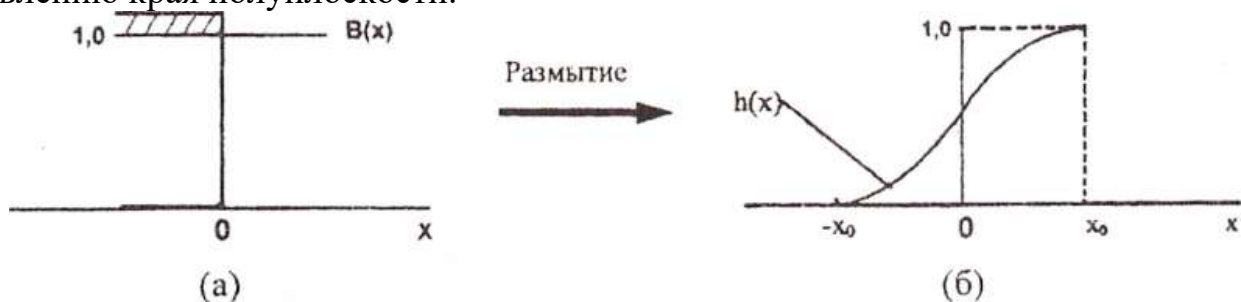


Рисунок 3.1. Край полуплоскости  $B(x)$  - (а);

изображение края полуплоскости в системе с размытием ( $h(x)$  - краевая функция) - (б).

**2. Бесконечно узкая щель (светящаяся полоска)** с бесконечно большой интенсивностью; математически описывается как одномерная  $\delta$ -функция (рис. 3.2).

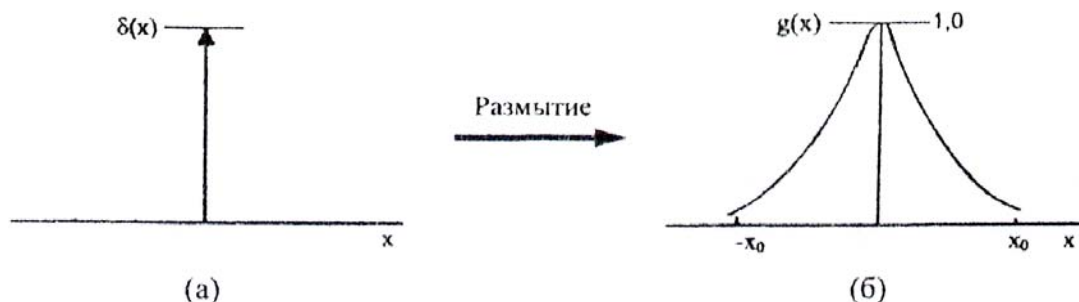


Рисунок 3.2. Одномерная дельта-функция  $\delta(x)$  - (а) и функция размытия линии  $g(x)$  - (б).

**3. Периодическая одномерная структура**, например, периодическая П-образная решетка (рис. 3.3)

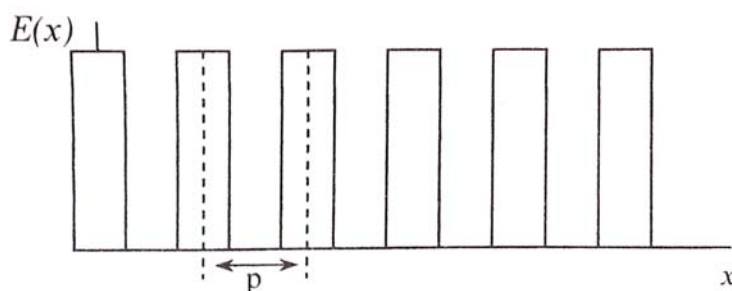


Рисунок 3.3. Распределение интенсивности для одномерное П-образной решетки:  $E(x)$  - распределение интенсивности в направлении  $x$ , перпендекулярном направлению линий структуры;  $p$  - период решетки.

Распределение интенсивности в периодической одномерной линейчатой структуре можно описать с помощью выражения:

$$E(x) = E(x + np), \text{ где } n = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (3.2)$$

Поскольку реальные системы отображения информации обладают размытием, то исходные функции (край полуплоскости, бесконечно узкая щель, и т.д.) будут отображаться с искажениями их начальной формы. Этим исходным сигналам будут соответствовать распределения интенсивности, дающие информацию о размытии:

1. Краевая функция (КФ),  $h(x)$ , описывающая распределение интенсивности в изображении края полуплоскости (см. рис. 3.1, б).

2. Функция размытия линии (ФРЛ),  $g(x)$ , описывающая распределение интенсивности в изображении бесконечно узкой щели (см. рис. 3.2, б).

Краевая функция, функция размытия линии взаимосвязаны, и одна может быть найдена из другой.

КФ рассчитывается посредством интегрирования ФРЛ:

$$h(x_i) = \int_{-\infty}^{x_i} g(x) dx \quad (3.3)$$

где  $-x_0, x_0$  - начало и конец зоны перехода соответственно;  $x_i$  - текущее значение  $x$  внутри зоны перехода  $[-x_0; x_0]$ .

Зона перехода КФ равна ширине ФРЛ (отрезки  $[-x_0; x_0]$  на рис. 3.1, б и рис. 3.2, б равны).

Очевидно, ФРЛ может быть найдена по известной КФ с помощью дифференцирования КФ:

$$g(x_i) = \frac{dh(x_i)}{dx} \quad (3.4)$$

В практических расчетах значение интеграла (3.3) на отрезке  $[-x_0; x_0]$  обычно нормируется к единице:

$$\int_{-x_0}^{x_0} g(x) dx = 1 \quad (3.5.a)$$

или

$$g_{\max}(x) = 1 \quad (3.5.6)$$

Для изотропных звеньев (систем) ФРЛ симметрична относительно оси ординат, т.е. является четной функцией:

$$g(-x) = g(x) \quad (3.6)$$

Из уравнений (3.5) и (3.6) следует, что:

$$h(0) = 0,5 \quad (3.7)$$

и далее:

$$h(-x) + h(x) = 1,0 \quad (3.8)$$

КФ и ФРЛ чаще всего не описываются с помощью простых интегрируемых (дифференцируемых) функций. Поэтому при вычислении КФ или ФРЛ обычно используют методы приближенного интегрирования или дифференцирования.

Для построения КФ по известной ФРЛ отрезок оси абсцисс под кривой ФРЛ разбивают на  $n$  равных отрезков, а для точек деления находят значения ординат интегрируемой функции (ФРЛ). Затем по формуле трапеции находят значение интеграла:

$$\int_{-x_0}^{x_0} g(x) dx = \Delta x (g(x_1) + g(x_2) + \dots + g(x_n)) \quad (3.9)$$

Чем больше  $n$ , тем точнее интегрирование.

**Пример.** Рассчитать КФ по заданной ФРЛ. Пусть задана ФРЛ на отрезке  $[-6;6]$  мкм. Значения ФРЛ приведены в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Значения ФРЛ на отрезке  $[-6;6]$  мкм

$x$ , мкм	0,0	0,5 - 0,5	1,0 - 1,0	1,5 - 1,5	2,0 - 2,0	2,5 - 2,5	3,0 - 3,0	3,5 - 3,5	4,0 - 4,0	4,5 - 4,5	5,0 - 5,0	5,5 - 5,5	6,0 :6,0
$g(x)$		0,80	1,00	0,29	0,22	0,7	0,14	0,12	0,10	0,09	0,07	0,06	0,05

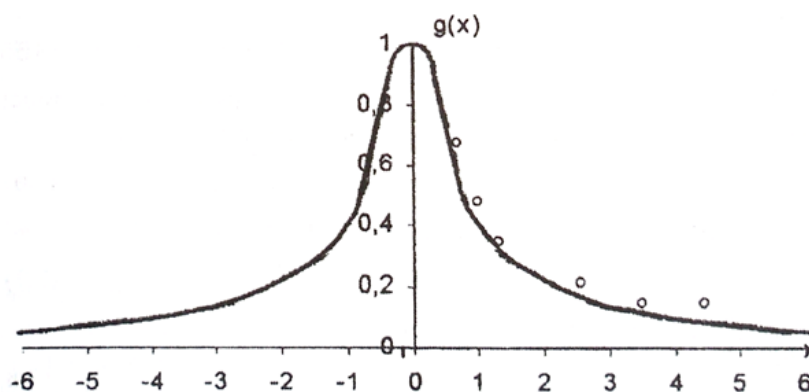


Рисунок 3.4. Функция размытия линии.

График функции представлен на рис. 3.4. В данном примере зона размытия ФРЛ  $[-x_0; x_0]$  разделена на 24 части. Для точек деления найдены значения  $g(x_n)$ . Последовательным суммированием площадей элементарных трапеций (или прямоугольников) находят приближенное значение площадей, начиная от точки  $(-x_0)$  до текущего значения  $x_n$ . Ход вычислений приведен в табл. 3.2.

Таблица 3.2

Расчет КФ по заданной ФРЛ

№ п/п	$X_i$	$g(x_i)$	$\sum g(x_i)$	$h(x_i)$	$x$
0				0,000	-6,0
1	-5,75	0,050	0,050	0,009	-5,5
2	-5,25	0,065	0,115	0,020	-5,0
3	-4,75	0,080	0,195	0,034	-4,5
4	-4,25	0,090	0,285	0,050	-4,0
5	-3,75	0,105	0,390	0,068	-3,5
6	-3,25	0,125	0,515	0,090	-3,0
7	-2,75	0,150	0,665	0,116	-2,5
8	-2,25	0,190	0,855	0,150	-2,0
9	-1,75	0,250	1,105	0,193	-1,5
10	-1,25	0,325	1,430	0,250	-1,0
11	-0,75	0,506	1,936	0,339	-0,5
12	-0,25	0,920	2,856	0,500	0
13	0,25	0,920	3,776	0,661	0,5
14	0,75	0,506	4,282	0,750	1,0
15	1,25	0,325	4,607	0,807	1,5
16	1,75	0,250	4,857	0,850	2,0
17	2,25	0,190	5,047	0,884	2,5
18	2,75	0,150	5,197	0,910	3,0
19	3,25	0,125	5,322	0,932	3,5
20	3,75	0,105	5,427	0,950	4,0
21	4,25	0,090	5,517	0,966	4,5
22	4,75	0,080	5,597	0,980	5,0
23	5,25	0,065	5,662	0,991	5,5
24	5,75	0,050	5,712	1,000	6,0

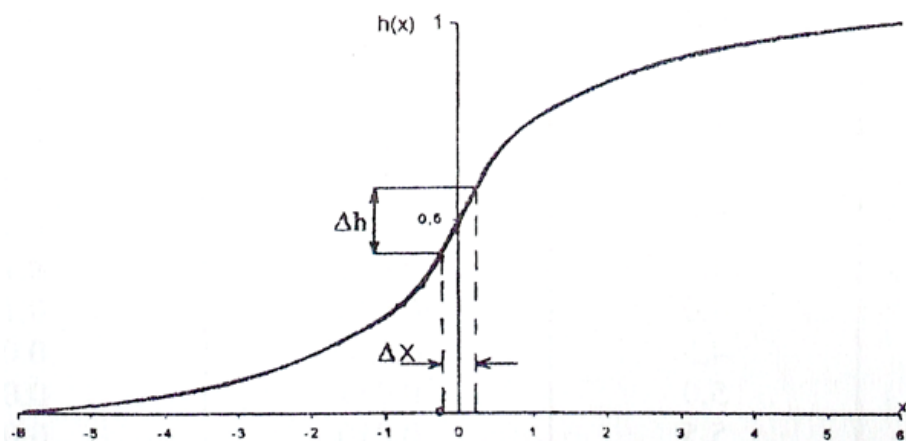


Рисунок 3.5. Краевая функция. Пример определения градиента  $\Delta h(x_{12})$ .

Для расчета ФРЛ по известной КФ произвольного вида применяют графическое дифференцирование, соответственно уравнению:

$$g(X_n) = \frac{\Delta h(X_n)}{\Delta X} \quad (3.10)$$

Ось абсцисс делят на  $n$  равных частей, в точках кривой, соответствующих точкам деления, проводят касательные к кривой и находят градиенты касательных. Полученные градиенты и выражают функцию размытия.

В таблице приведены результаты расчетов ФРЛ по вычисленной ранее КФ (см. рис. 3.4 - точки на кривой).

Таблица 3.3

Расчет ФРЛ по заданной КФ

$n$	$x$	$\Delta h(x_n)$	$g(x_n)$
1	-0,6	0,008	0,05
2	-5,5	0,010	0,06
3	-5,0	0,011	0,07
4	-4,5	0,014	0,09
5	-4,0	0,016	0,10
6	-3,5	0,018	0,12
7	-3,0	0,024	0,15
8	-2,5	0,028	0,18
9	-2,0	0,035	0,22
10	-1,5	0,046	0,29
11	-1,0	0,069	0,40
12	-0,5	0,128	0,80
13	0,0	0,160	1,00
14	0,5	0,128	0,80
15	1,0	0,063	0,40
16	1,5	0,046	0,29
17	2,0	0,035	0,22
18	2,5	0,028	0,18
19	3,0	0,024	0,15
20	3,5	0,018	0,12
21	4,0	0,016	0,10
22	4,5	0,014	0,09
23	5,0	0,011	0,07

24	5,5	0,010	0,06
25	6,0	0,008	0,05

Следует отметить, что вычисления КФ по ФРЛ и обратно (ФРЛ по КФ) в силу симметрии ФРЛ и с учетом нормировок КФ могут быть, при достижении навыка вычислений, сокращены в два раза.

### **3. МЕТОДИКА И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ**

- 1) Построить КФ по заданной ФРЛ.
- 2) Построить ФРЛ по заданной (расчетной по п.4.1) КФ.

### **4. ОБОРУДОВАНИЕ И МАТЕРИАЛЫ**

- 1) ПЭВМ со специальным ПО.
- 2) Проектор.
- 3) Калькулятор.
- 4) Карандаш, линейка, резинка, миллиметровая бумага.

### **5. СОДЕРЖАНИЕ И ФОРМА ОТЧЕТА**

- 1) Краткое описание цели и методики работы.
- 2) Кривые, полученные посредством расчетов, для КФ и ФРЛ.
- 3) Анализ полученных результатов (сравнение расчетной и заданной ФРЛ).

**МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗМЫТИЯ ПРИ ОТОБРАЖЕНИИ ИЗОБРАЗИТЕЛЬНОЙ  
ИНФОРМАЦИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ  
ПРОСТРАНСТВЕННО-СПЕКТРАЛЬНЫХ МЕТОДОВ**

**1. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ РАБОТЫ**

**Цель работы:** изучить основные способы получения ФПМ и основные преобразования ФРЛ-ФПМ.

**Задачи работы:** изучить основы методов оценки ФПМ с использованием экспериментальных данных и расчетных способов, рассчитать и построить графики ФПМ по заданной ФРЛ и наоборот, по известной ФПМ для синусоидального сигнала  $T_{\nu}^{\sim}$  рассчитать и построить график ФПМ для прямоугольного сигнала  $T_{\nu}^{-}$  и наоборот.

**2. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ**

Наряду с КФ и ФРЛ для описания размытия в системе отображения изобразительной информации используется одна из важнейших характеристик линейных систем - функция передачи модуляции (ФПМ). Эта функция, также как и ранее рассмотренные функции (см. лаб. раб. №3), содержит ту же информацию о размытии, а все эти функции могут быть найдены одна из другой с помощью соответствующих математических преобразований.

Необходимость перехода от одной функции к другой обусловлена тем, что при принципиально одинаковом информационном содержании разных функций они обладают различными практическими свойствами. Например, отличительным свойством метода ФПМ является простота расчета передаточной характеристики системы по известным ФПМ ее отдельных звеньев. Кроме того, определение ФПМ обычно более доступно и точно, чем определение ФРЛ или краевой функции.

ФПМ может быть определена либо с использованием соответствующих экспериментальных данных, либо пересчетом по известной функции ФРЛ или КФ, либо непосредственно расчетным путем на основе теоретических посылок.

ФПМ определяет величину коэффициента передачи контраста в изображении одномерной решетки с синусоидальным распределением зависимости от пространственной частоты этой решетки. Численно коэффициент передачи контраста  $T_{\nu}$  синусоидального сигнала для пространственной частоты  $\nu$  равен отношению коэффициента модуляции в изображении  $M_{\nu}^{uz}$  к коэффициенту в объекте  $M_{\nu}^{ob}$ .

$$T_{\nu} = \frac{M_{\nu}^{uz}}{M_{\nu}^{ob}} \quad (4.1)$$

Коэффициенты модуляции, в свою очередь, равны:

$$M_{\nu}^{ob} = \frac{E_{\max}^{ob} - E_{\min}^{ob}}{E_{\max}^{ob} + E_{\min}^{ob}} \quad (4.2)$$

и

$$M_{\nu}^{ob} = \frac{E_{\max}^{uz} - E_{\min}^{uz}}{E_{\max}^{uz} + E_{\min}^{uz}} \quad (4.3)$$



Где  $E_{\max}^{об}$ ,  $E_{\min}^{об}$ ,  $E_{\max}^{уз}$ ,  $E_{\min}^{уз}$  - максимальное и минимальное значения интенсивности синусоидальной решетки частоты  $\nu$  в объекте и в изображении.

Для экспериментальной оценки ФПМ используют тест-объект, содержащий набор одномерных решеток различной пространственной частоты  $\nu$ , при этом могут использоваться решетки с синусоидальным или прямоугольным профилем распределения интенсивности. С помощью этого тест-объекта находят значения  $T_\nu$  для различных частот или, другими словами, кривую ФПМ ( $T_\nu = f(\nu)$ ).

Если коэффициент модуляции тест-объекта для решеток всех частот постоянный ( $M_\nu = const$ ), и средняя интенсивность в изображении также постоянная, что всегда выполняется для обычно применяемых тест-объектов, то для расчета ФПМ достаточно на данной пространственной частоте найти отношение амплитуды интенсивности в изображении  $\Delta E_\nu$  к амплитуде интенсивности в объекте  $\Delta E_{\nu_0}$  на частоте, близкой к нулевой  $\nu_0$ , т.е. на частоте, при которой  $\Delta E_{\nu_0}^{уз} = \Delta E_{\nu_0}^{об}$ :

$$T_\nu = \frac{\Delta E_{\nu}^{уз}}{\Delta E_{\nu_0}^{уз}} \quad (4.4)$$

Для расчета ФПМ по функции размытия линии применяют методы приближенного гармонического анализа. Известно, что ФПМ и ФРЛ математически связаны парой преобразований Фурье. Для некоторой пространственной частоты косинус - преобразование Фурье (если ФРЛ - функция четная) имеет вид:

$$T_\nu^c = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} g(x) \cos 2\pi \nu x dx}{\int_{-\infty}^{\infty} g(x) dx} \quad (4.5)$$

Коэффициент передачи контраста на данной частоте можно найти, проводя графическое приближенное интегрирование числителя и знаменателя. Для нахождения числителя ось ординат помещаем в максимум функции размытия. Максимум косинусоиды заданной частоты  $\nu_1$  также располагаем на оси ординат. Ось абсцисс делят на  $n$  равных частей. В точках деления считывают значения ординат ФРЛ и косинусоиды, и, далее, вычисляют произведения этих величин. Процедура показана на рис. 4.1.

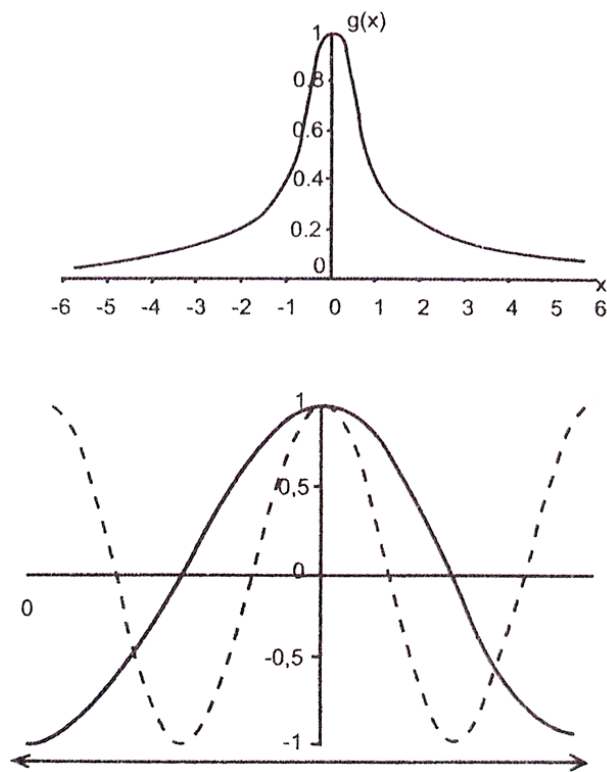


Рисунок 4.1. К расчету ФПМ по известной ФРЛ.

Затем выполняют алгебраическое суммирование найденных произведений и получают значение числителя уравнения (4.5). Суммируя ординаты в точках деления под кривой  $g(x)$ , находим площадь под кривой ФРЛ или знаменатель уравнения (4.5). В заключение находим  $T_{\nu_2}$  (для частоты  $\nu_2$ ). Повторяя расчеты для косинусоид других частот, получают ряд точек - значений ФПМ на различных пространственных частотах, и строят кривую ФПМ в координатах  $T_\nu = f(\nu)$ .

В более общем случае несимметричной ФРЛ аналогичные расчеты проводят также и для синусоид различных частот и получают синус - преобразование Фурье.

Пример расчета ФПМ для нескольких частот по заданной ФРЛ приведен в табл. 4.1.

Таблица 4.1

## Расчет ФПМ по заданной ФРЛ

			$v_1$		$v_2 = 2v_1$		$v_3 = 3v_1$		$v_4 = 4v_1$		$v_5 = 5v_1$	
$x$ , МКМ	$n$	$g(x)$	$\cos X$	$g(x) \cos X$	$\cos 2X$	$g(x) \cos 2X$	$\cos 3X$	$g(x) \cos 3X$	$\cos 4X$	$g(x) \cos 4X$	$\cos 5X$	$g(x) \cos 5X$
-6,0	24	0,025	-1,00	-0,025	1,00	0,025	-1,00	-0,025	1,00	0,025	-1,00	-0,025
-5,5	1	0,060	-0,97	-0,058	0,87	0,052	-0,71	-0,043	0,50	0,030	-0,26	-0,016
-5,0	2	0,070	-0,87	-0,061	0,50	0,035	0,00	0,000	-0,50	-0,035	0,87	0,061
-4,5	3	0,085	-0,71	-0,060	0,00	0,000	0,71	0,060	-1,00	-0,085	0,71	0,060
-4,0	4	0,100	-0,50	-0,050	-0,50	-0,050	1,00	0,100	-0,50	-0,050	-0,50	-0,050
-3,5	5	0,116	-0,26	-0,030	-0,87	-0,101	0,71	0,082	0,50	0,058	-0,97	-0,112
3,0	6	0,140	0,00	0,000	-1,00	-0,140	0,00	0,000	1,00	0,140	0,00	0,000
-2,5	7	0,172	0,26	0,045	-0,87	-0,150	-0,71	-0,122	0,50	0,086	0,97	0,167
-2,0	8	0,220	0,50	0,110	-0,50	-0,110	-1,00	-0,220	-0,50	-0,110	0,50	0,110
-1,5	9	0,290	0,71	0,210	0,00	0,000	-0,71	-0,206	-1,00	-0,290	-0,71	-0,206
-1,0	10	0,400	0,87	0,348	0,50	0,200	0,00	0,000	-0,50	-0,200	-0,87	-0,348
-0,5	11	0,800	0,97	0,776	0,87	0,696	0,71	0,568	0,50	0,400	0,26	0,208
0,0	12	1,000	1,00	1,000	1,00	1,000	1,00	1,000	1,00	1,000	1,00	1,000
0,5	13	0,800	0,97	0,776	0,87	0,696	0,71	0,568	0,50	0,400	0,26	0,208
1,0	14	0,400	0,87	0,348	0,50	0,200	0,00	0,000	-0,50	-0,200	-0,87	-0,348
1,5	15	0,290	0,71	0,210	0,00	0,000	-0,71	-0,206	-1,00	-0,290	-0,71	-0,206
2,0	16	0,220	0,50	0,110	-0,50	-0,110	-1,00	-0,220	-0,50	-0,110	0,50	0,110
2,5	17	0,172	0,26	0,045	-0,87	-0,150	-0,71	-0,122	0,50	0,086	0,97	0,167
3,0	18	0,140	0,00	0,000	-1,00	-0,140	0,00	0,000	1,00	0,140	0,00	0,000
3,5	19	0,116	-0,26	-0,030	-0,87	-0,101	0,71	0,082	0,50	0,058	-0,97	-0,112
4,0	20	0,100	-0,50	-0,050	-0,50	-0,050	1,00	0,100	-0,50	-0,050	-0,50	-0,050
4,5	21	0,085	-0,71	-0,060	0,00	0,000	0,71	0,060	-1,00	-0,085	0,71	0,060
5,0	22	0,070	-0,87	-0,061	0,50	0,035	0,00	0,000	-0,50	-0,035	0,87	0,061
5,5	23	0,060	-0,97	-0,058	0,87	0,052	-0,71	-0,043	0,50	0,030	-0,26	-0,016
6,0	24	0,025	-1,00	-0,025	1,00	0,025	-1,00	-0,025	1,00	0,025	-1,00	-0,025
Суммы		5,956		3,410		1,914		1,388		0,938		0,698
$T_v$		1,00		0,57		0,32		0,22		0,16		0,12

Отметим, что приобретение навыка вычислений по приведенной схеме для симметричной ФРЛ позволяет уменьшить объем вычислений за счет рассмотрения половины ФРЛ, например, в интервале  $[0,6]$ .

На рис. 4.2 приведена  $T_v$ , рассчитанная в соответствии с рассмотренным выше способом.

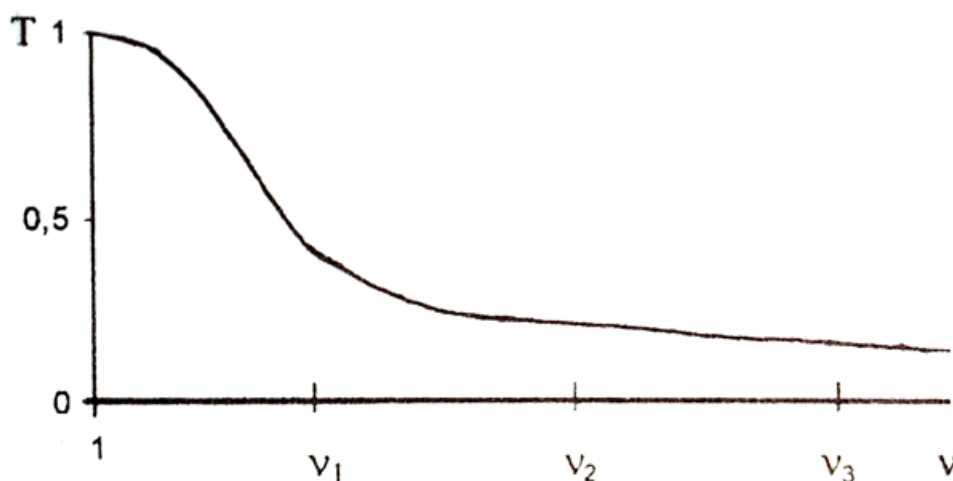


Рисунок 4.2. ФПМ, рассчитанная по ФРЛ.

Для вычисления ФРЛ по ФПМ также воспользуемся методами приближенного гармонического анализа. Для некоторого значения  $x_n$  абсциссы обратное косинус-преобразование Фурье запишется:

$$g(x_n) = \frac{0,5 + \sum_{n=1}^n T_{nv_1} \cos 2\pi n v_1 x}{0,5 + \sum_{n=1}^n T_{nv_1}} \quad (4.6)$$

Для уменьшения объема вычислений рассмотрим построение ФРЛ на интервале  $(0; x_0)$ , который также разделим на 12 частей. В точках деления проводим перемножение значений косинуса на соответствующие значения ФПМ. Затем, в соответствии с формулой Фурье-преобразований периодической функции, в этих же точках осуществляем суммирование вычисленных произведений для различных  $n v_1$  прибавляя  $0,5 \cdot a_0 = 0,5$ . В заключение, проводим нормировку согласно формуле (4.6).

В табл. 4.2 приведен численный пример вычисления ФРЛ по известной ФПМ.

Таблица 4.2

Расчет ФРЛ по заданной ФПМ

№	$X$	$v_1$		$v_2 = 2v_1$		$v_3 = 3v_1$		$v_4 = 4v_1$		$v_5 = 5v_1$		$0,5 + \sum T_{nm} \cos$	$g(x_n)$
		$\cos X$	$T_{v1} \cos X$	$\cos 2X$	$T_{v2} \cos 2X$	$\cos 3X$	$T_{v3} \cos 3X$	$\cos 4X$	$T_{v4} \cos 4X$	$\cos 5X$	$T_{v5} \cos 5X$		
0	0,0	1,00	0,57	1,00	0,32	1,00	0,23	1,00	0,160	1,00	0,120	1,900	11,00
1	0,5	0,97	0,55	0,87	0,28	0,71	0,16	0,50	0,080	0,26	0,031	1,601	0,84
2	1,0	0,87	0,50	0,50	0,16	0,00	0,00	-0,50	-0,085	-0,87	-0,104	1,976	0,51
3	1,5	0,71	0,40	0,00	0,00	-0,71	-0,16	-1,00	-0,160	-0,71	-0,085	0,495	0,26
4	2,0	0,50	0,29	-0,50	-0,16	-1,00	-0,23	-0,50	-0,080	0,50	0,060	0,380	0,20
5	2,5	0,26	0,15	-0,87	-0,28	-0,71	-0,16	0,50	0,080	0,97	0,116	0,408	0,21
6	3,0	0,00	0,00	-1,00	-0,32	0,00	0,00	1,00	0,160	0,00	0,000	0,340	0,18
7	3,5	-0,26	-0,15	-0,87	-0,28	0,71	0,16	0,50	0,080	-0,97	-0,116	0,194	0,10
8	4,0	-0,50	-0,29	-0,50	-0,16	1,00	0,23	-0,50	-0,080	-0,50	-0,060	0,120	0,06
9	4,5	-0,71	-0,40	0,00	0,00	0,71	0,16	-1,00	-0,160	0,71	0,085	0,185	0,10
10	5,0	-0,87	-0,55	0,50	0,16	0,00	0,00	-0,50	-0,080	0,87	0,104	0,184	0,10
11	5,5	-0,97	-0,56	0,87	0,38	-0,71	-0,16	0,50	0,080	-0,26	-0,031	0,119	0,063
12	6,0	-1,00	-0,57	1,00	0,32	-1,00	-0,23	1,00	0,160	1,00	-0,124	0,060	0,032

Результаты вычислений нанесены на график ФРЛ (рис. 4.3) и обозначены кружочками (о). Рис. 4.3 показывает удовлетворительное соответствие расчетных данных. Ошибка вычислений не превышает 5%. Для более точного построения необходимо увеличить число принятых для расчета частот  $n \nu_1$  по кривой ФПМ.

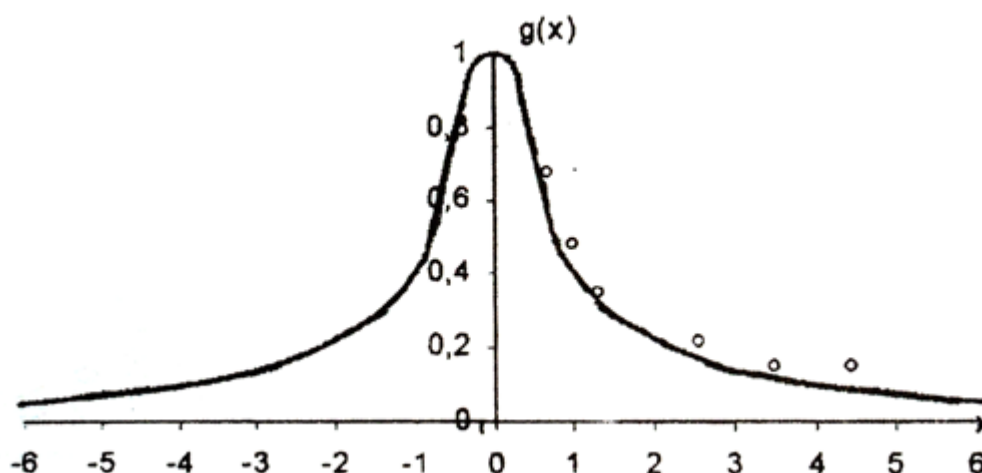


Рисунок 4.3. ФРЛ и обратный пересчет ФРЛ по ФПМ.

В связи со сложностью изготовления тест-объектов с синусоидальным распределением интенсивности, на практике чаще используют тест-объекты с решетками, создающими прямоугольное распределение интенсивности на входе исследуемой системы. Возможность их применения основана на том, что прямоугольный сигнал может быть разложен в ряд Фурье по синусоидальным составляющим. Это приводит к выражению, позволяющему вычислить ФПМ для синусоидального сигнала  $T_v^-$  по известной ФПМ для прямоугольного сигнала  $T_v^+$ . Расчет проводится по формуле Колтмена:

$$T_v^- = \frac{\pi}{4} (T_v^+ + \frac{T_{3v}^+}{3} - \frac{T_{5v}^+}{5} + \frac{T_{7v}^+}{7} + \dots) \quad (4.7)$$

Если известна ФПМ для синусоидального сигнала  $T_v^-$ , а необходимо определить ФПМ для прямоугольного сигнала, то пересчет осуществляют по формуле:

$$T_v^+ = \frac{4}{\pi} (T_v^- - \frac{T_{3v}^-}{3} + \frac{T_{5v}^-}{5} - \frac{T_{7v}^-}{7} + \dots) \quad (4.8)$$

Пример расчета ФПМ для прямоугольного сигнала. Пусть  $T_v^+$  описывается функцией  $\sin X$ , характерной для сканирующей щелевой апертуры:

$$T_v^+ = \frac{\sin(\pi \nu l)}{\pi \nu l} \quad (4.9)$$

где  $l = 0,01$  мм – ширина щели.

Расчеты  $T_v^-$  представлены в табл 4.3.

Расчет ФПМ

$\nu, \text{мм}^{-1}$	$\pi \nu l = X, \text{град.}$	$\sin X$	$\pi \nu l = X, \text{рад.}$	$\sin X / X$
0	0	0,00	0,00	1,00
10	36	0,59	0,63	0,94
20	72	0,95	1,26	0,76
30	108	0,95	1,88	0,50
40	144	0,59	2,51	0,23
50	180	0,00	3,14	0,00
60	216	-0,59	3,77	-0,16
70	252	-0,95	4,40	-0,22
75	270	-1,00	4,71	-0,21
80	288	-0,95	5,02	-0,19
90	324	-0,59	5,65	-0,10
100	360	0,00	6,28	0,00
125	450	1,00	7,85	0,13
175	1350	-1,00	10,99	-0,09

Далее, по формуле (4.7), вычисляем  $T_{\nu}^{-}$ . В качестве примера приведены расчеты для нескольких частот, а кривая  $T_{\nu}^{-}$  представлена на рис. 4.4 пунктиром.

$$T_{10}^{-} = \frac{4}{\pi} \left( 0,94 - \frac{0,50}{3} + \frac{0,00}{5} - \frac{-0,22}{7} + \frac{-0,10}{9} \right) = 1,00$$

$$T_{30}^{-} = \frac{4}{\pi} \left( 0,50 - \frac{-0,10}{3} \right) = 0,68$$

$$T_{40}^{-} = \frac{4}{\pi} \left( 0,23 - \frac{0,13}{3} \right) = 0,24$$

Решим также обратную задачу и вычислим по рассчитанной  $T_{\nu}^{-}$  ФПМ для синусоидального сигнала  $T_{\nu}^{-}$  с помощью формулы (4.8).

Пример расчета для нескольких частот приведен ниже, а расчетные точки нанесены на кривую  $T_{\nu}^{-}$ . Видим хорошее соответствие между кривой  $T_{\nu}^{-}$ , рассчитанной по формуле (4.9), и данными, полученными при расчетах по формуле Колтмена.

$$T_{10}^{-} = \frac{\pi}{4} \left( 1,00 + \frac{0,68}{3} - \frac{0,00}{5} + \frac{-0,30}{7} + \frac{0,10}{11} \right) = 1,00$$

$$T_{30}^{-} = \frac{\pi}{4} \left( 1,00 + \frac{-0,21}{3} + \frac{0,00}{5} + \frac{0,08}{7} \right) = 0,73$$

$$T_{40}^{-} = \frac{\pi}{4} \left( 0,68 + \frac{-0,14}{3} - \frac{0,00}{5} \right) = 0,49$$

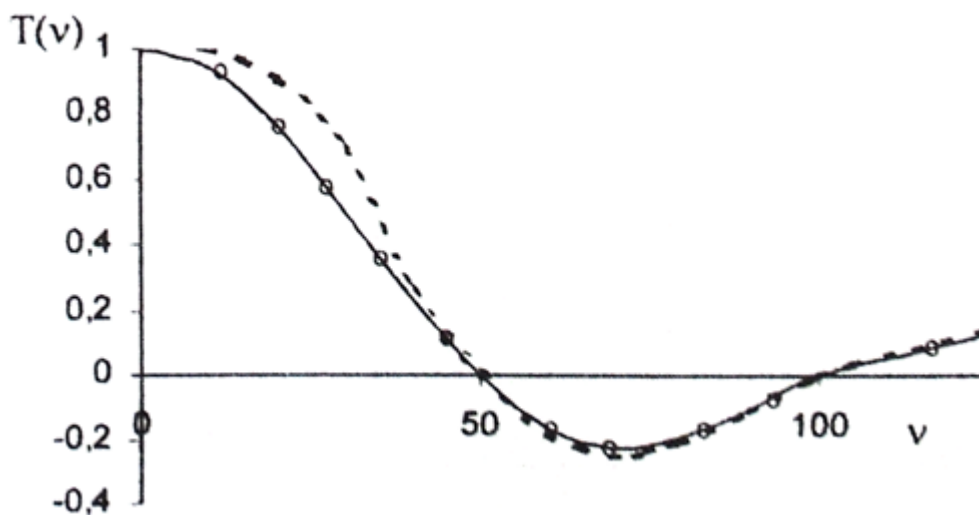


Рисунок 4.4.  $T_v^{\sim}$  - сплошная линия и  $T_v^{-}$  - пунктир; о – расчетные точки  $T_v^{\sim}$ , вычисленные по формуле Колтмена из  $T_v^{-}$ .

### 3. МЕТОДИКА И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

- 1) Рассчитать и построить график ФПМ по заданной ФРЛ.
- 2) Рассчитать и построить график ФРЛ по заданной ФПМ.
- 3) Рассчитать и построить график ФПМ для прямоугольного сигнала по заданной ФПМ для синусоидального сигнала.
- 4) Рассчитать и построить график ФПМ для синусоидального сигнала по известной ФПМ для прямоугольного сигнала.

### 4. ОБОРУДОВАНИЕ И МАТЕРИАЛЫ

- 1) ПЭВМ со специальным ПО.
- 2) Проектор.
- 3) Калькулятор.
- 4) Карандаш, линейка, резинка, миллиметровая бумага.

### 5. СОДЕРЖАНИЕ И ФОРМА ОТЧЕТА

- 1) Краткое описание цели и методика работы.
- 2) Графики рассчитанных ФПМ и ФРЛ.
- 3) Графики рассчитанных  $T_v^{\sim}$  и  $T_v^{-}$ .
- 4) Анализ полученных результатов.

**ВОЗДЕЙСТВИЕ РАЗМЫТИЯ НА ОТОБРАЖЕНИЕ ОДНОМЕРНОЙ  
ШТРИХОВОЙ ДЕТАЛИ ИЗОБРАЖЕНИЯ**

**1. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ РАБОТЫ**

**Цель работы:** изучить пару преобразований КФ - ФПМ и метод построения распределения интенсивности.

**Задачи работы:** изучить метод перехода от ФПМ к КФ, изучить метод перехода от КФ к ФПМ, изучить способ построения профиля интенсивности в изображении мелкой штриховой детали с использованием КФ.

**2. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ**

К важным задачам относится расчет распределения интенсивности в изображении одиночной (отдельной) мелкой штриховой детали, воспроизводимой в системе с размытием.

Непосредственное применение ФПМ или расчет воспроизведения в соответствии с интегральными преобразованиями по прямой теореме свертки в данном случае достаточно трудоемок. Проще и нагляднее эта задача решается с использованием КФ. Таким образом, возникает необходимость в преобразовании ФПМ в КФ.

Кроме того, с другой стороны, в ряде случаев при исследовании системы или ее отдельных звеньев бывает невозможным размещение в объекте периодического тест-объекта, но в то же время в самом объекте имеются отдельные детали с резкими краями. Анализ таких деталей позволяет получить КФ. Следовательно, в этом случае для оценки передаточных свойств возникает необходимость в решении обратной задачи - переходе от КФ к ФПМ.

Остановимся подробнее на преобразованиях от ФПМ к КФ, и, наоборот, от КФ к ФПМ. Для расчета ФПМ по известной КФ первоначально находят ФПМ для прямоугольного сигнала, а затем пересчитывают ее в ФПМ для синусоидального сигнала (см. лаб. раб. № 4).

Если известен график КФ, то алгоритм поиска ФПМ на данной частоте  $\nu$  можно представить как последовательность шагов:

- рассчитывают отрезок  $\Delta x = 1/2\nu$  (мм или мкм)
- разделяют зону перехода КФ на отрезки с шагом  $\Delta x$ ; этот процесс начинается с размещения отрезка  $\Delta x$  симметрично оси ординат графика КФ (или симметрично оси значений КФ); назовем этот отрезок  $\Delta x$  центральным; и далее вправо и влево от краев центрального отрезка  $\Delta x$  вновь откладываются отрезки  $\Delta x$  (см. рис. 5.1);
- оси абсцисс из точек, соответствующих концам отрезков  $\Delta x$ , восстанавливают перпендикуляры до пересечения с краевой функцией; точки пересечения индексируют (например, в буквенной форме) (см. рис. 5.1);
- значениям КФ, приходящимся на концы центрального отрезка, соответствует пара значений  $E^{\max}$ ; значениям КФ, приходящимся на отрезки, которые расположены вправо и влево от центрального, соответствуют пары значений  $E^{\min}$ ; за ними влево и вправо от отрезков  $E^{\min}$  вновь расположены отрезки  $E^{\max}$ ; процесс следования значений  $E^{\max}$  и  $E^{\min}$  для данной частоты  $\nu$  периодически повторяется необходимое число раз пока не перекроется вся зона перехода КФ (см. рис. 5.1);
- рассчитывают значения ФПМ для прямоугольного сигнала на данной частоте  $\nu$  по формуле:



$$T_v^- = \frac{E_v^{\max} - E_v^{\min}}{E_v^{\max} + E_v^{\min}} \quad (5.1)$$

где  $E^{\max}$  и  $E^{\min}$  рассчитываются как суммы разностей ординат отрезков маркированных соответственно либо  $E^{\max}$  либо  $E^{\min}$ .

Для примера, приведенного на рис. 5.1 имеем:

- для частоты  $\nu = 10 \text{ мм}^{-1}$ ;

$$E^{\max} = (I - H) \quad (5.2)$$

$$E^{\min} = (H - G) + (K - I)$$

- для частоты  $\nu = 20 \text{ мм}^{-1}$ ;

$$E^{\max} = (D - C) + (B - A) + (F - E) \quad (5.3)$$

$$E^{\min} = (C - B) + (E - D)$$

Результаты расчетов для данных частот приведены в таблице 5.1.

В соответствии с рассмотренным алгоритмом выполняют построения и расчеты значений ФПМ для других частот.

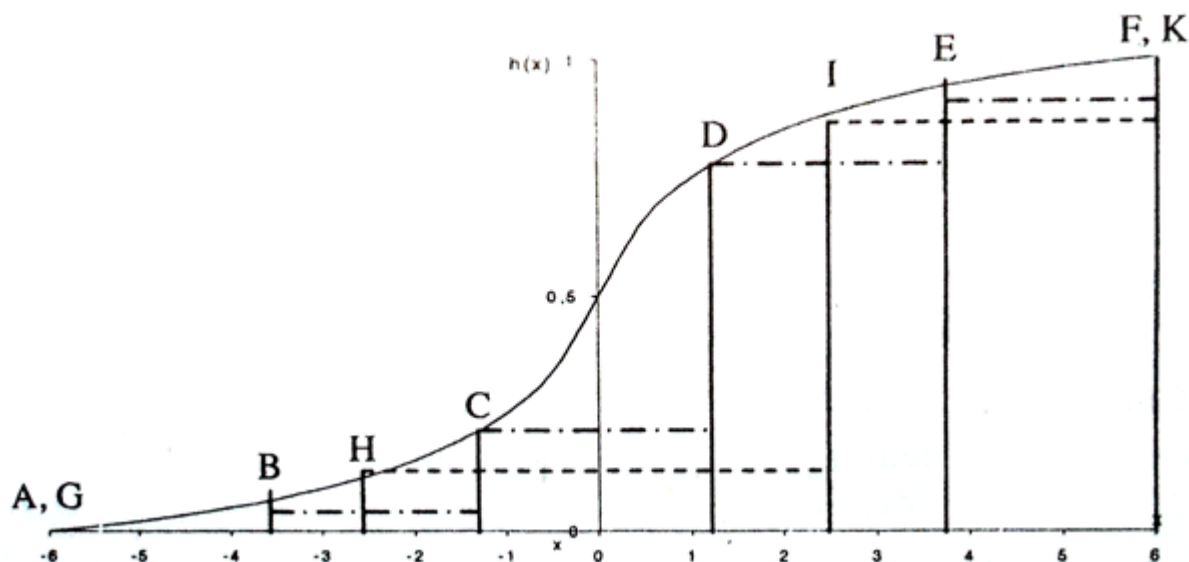


Рисунок 5.1. К расчету  $T_v^-$  по КФ. G, H, I, K – и штриховые вспомогательные линии – к расчету  $T_{10}^-$ . A, B, C, D, E, F и штрих-пунктирные вспомогательные линии – к расчету  $T_{20}^-$ .

В табл. 5.1 приведен пример расчета  $T_v^-$  для двух частот по КФ, (см. рис. 5.1). Для вычислений использованы формулы (5.1-5.3).

Таблица 5.1

Расчет  $T_v^-$  по КФ.

$\nu, \text{ мм}^{-1}$	$p/2 = 1/2\nu$	$E_{\max}$	$E_{\min}$	$T_v^-$
10	0,050	$0,91 - 0,09 = 0,82$	$0,09 + (1 - 0,91) = 0,18$	0,64
20	0,025	$(0,81 - 0,19) + (0,19 - 0,03) + 0,03 + 0,03 = 0,68$	$(0,19 - 0,03) + (0,96 - 0,81) = 0,31$	0,38

Если необходимо перейти от  $T_v^-$  к  $T_v^+$ , то пользуются формулой Колтмена.

Для расчета КФ по известной ФПМ сначала пересчитывают ФПМ для синусоидального сигнала в ФПМ для прямоугольного сигнала (см. лаб. раб. № 4).

Следующий шаг - построение КФ по рассчитанной  $T_v^-$ . Здесь используем формулу, в соответствии с которой значение ординаты КФ в точке  $x$ , т.е., при  $x = 1/4v$  равно:

$$h(x) = \frac{T_v^- + T_{v/3}^- + 2}{4} \quad (5.4)$$

где  $T_v^-$  - коэффициент передачи модуляции на произвольной частоте  $v$ ;  $T_{v/3}^-$  - коэффициент передачи модуляции на частоте, вдвое меньшей частоты  $v$ .

Ординату точки КФ с абсциссой  $x = -1/4v$  находят из известного соотношения  $h(-x) = 1 - h(x)$  (см. лаб. раб. № 3).

Повторяя расчеты для различных  $v$ , производят построение всей КФ. При этом, очевидно, что точки начала ( $-x_0$ ) и окончания ( $x_0$ ) зоны перехода, в которых  $h(-x_0) = 0$  и  $h(x_0) = 1$ , определяются по предшествующей началу спада ФПМ частоте  $v_0$ , где еще  $T_{v_0}^- = 1$ , а затем следует спад ФПМ, т.е. ФПМ становится меньше единицы ( $T_v^- < 1$ ).

На рис. 5.2 показаны ФПМ  $T_v^-$  и соответствующая ей  $T_v^-$ .

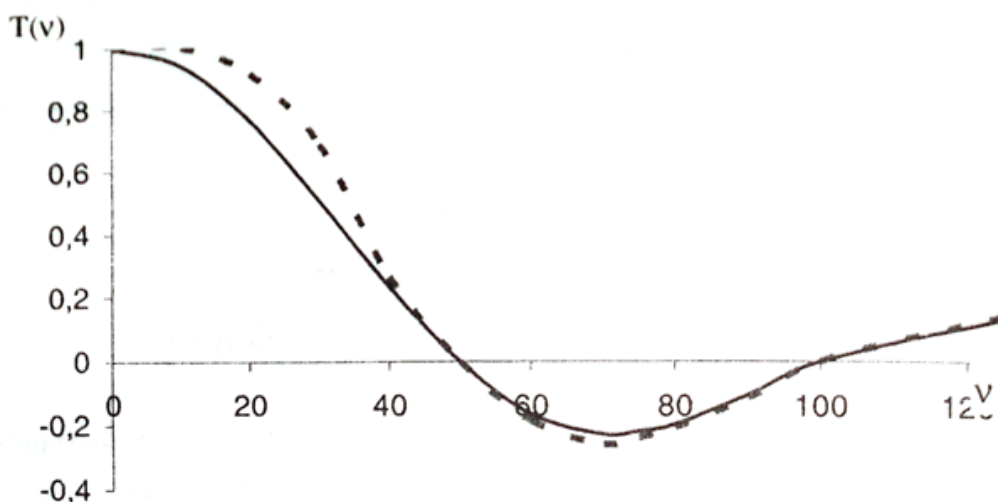


Рисунок 5.2.  $T_v^-$  - сплошная линия.  $T_v^-$  - пунктирная линия.

Далее по рассчитанной ФПМ  $T_v^-$  по формуле (5.4) находят  $h(x)$  - КФ. В табл. 5.2 для нескольких значений  $x$  приводится численный пример расчета.

Таблица 5.2

К расчету КФ по известной  $T_v^-$

$v, \text{мм}^{-1}$	$x = 1/4v, \text{мм}$	$h(x)$ (см. ф-лу (3.4))	$h(-x) = 1 - h(x)$
10	0,0250 -0,0250	$(0,64+3)/4-(1-1)/4=0,91$	$1-0,91=0,09$
20	0,0125 -0,0125	$(0,38+3)/4-(1-0,92)/4=0,81$	$1-0,81=0,19$

В линейной системе с размытием распределение интенсивности в изображении мелкой детали методом КФ рассчитывают:

- для штриха как сумму двух противоположно направленных КФ, центры симметрии которых смещены на расстояние, равное ширине штриха  $l$ , т.е.  $E_{\Sigma} = E_1 + E_2$  (где  $E_1$  и  $E_2$  - противоположно направленные КФ);
- для просвета как сумму двух противоположно направленных КФ, центры симметрии которых смещены на расстояние, равное ширине просвета  $l$ , за вычетом единицы т.е.  $E_{\Sigma} = E_1 + E_2 - 1$ .

Значение интенсивности на геометрической границе обозначим как  $E_{гп}$ .

На рис. 5.3 показано построение мелких деталей (широких штриха и просвета) и отмечены важные для воспроизведения мелких деталей точки -  $E_{гп}, E_u$ .



Рисунок 5.3. К построению профиля интенсивности отдельной мелкой штриховой детали.

### 3. МЕТОДИКА И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

- 1) Рассчитать ФПМ для синусоидального сигнала по заданной КФ. Построить график.
- 2) Рассчитать КФ по заданной ФПМ для синусоидального сигнала. Построить график.
- 3) Построить график распределения интенсивности в изображении штриха (широкий, узкий, очень узкий, суперузкий) в системе, размытие которой описывается КФ по п. 4.2.
- 4) Построить график распределения интенсивности в изображении просвета (широкий, узкий, очень узкий, суперузкий) в системе, размытие которой описывается КФ по п. 4.2.

### 4. ОБОРУДОВАНИЕ И МАТЕРИАЛЫ

- 1) ПЭВМ со специальным ПО.
- 2) Проектор.
- 3) Калькулятор.
- 4) Карандаш, линейка, резинка, миллиметровая бумага.

### 5. СОДЕРЖАНИЕ И ФОРМА ОТЧЕТА

- 1) Название и цель работы.
- 2) Краткое теоретическое обоснование.
- 3) Расчет и построение ФПМ по заданной КФ.
- 4) Расчет и построение КФ по заданной ФПМ.
- 5) Кривые распределения интенсивности в изображении просветов, воспроизводимых в системе, размытие которой описывается КФ по п.3.2.

6) Кривые распределения интенсивности в изображении штрихов, воспроизводимых в системе, размытие которой описывается КФ по п.3.2.

7) Анализ результатов и выводы.

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ФЛУКТУАЦИЙ ИЗОБРАЖЕНИЯ И КОРРЕКЦИЯ  
ШУМОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК**

**1. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ РАБОТЫ**

**Цель работы:** познакомиться с отдельными видами флуктуаций - шумов изображения, методами их описания, оценки, а также с некоторыми методами коррекции шумовых характеристик.

**Задачи работы:** промоделировать флуктуации шумовой структуры и выявить их взаимодействие с изображениями разного вида. Провести количественную оценку шумов и выявить зависимость сделанной оценки и качества изображения от условий анализа и величины шумов. Изучить методы изменения шумовых характеристик изображения в программе Photoshop.

**2. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ**

Одной из основных характеристик информации, содержащейся в изображении, является степень ее зашумленности, т.е. присутствие в изображении разного вида флуктуаций, нарушающих информационную структуру изображения. Эти флуктуации могут порождаться, например, зернистой структурой фотографического почернения, формирующего изображение, или царапинами, пятнами. Такие шумы носят случайный характер. В некоторых случаях флуктуации вынужденно вносятся в изображение на ранних этапах его обработки и могут носить детерминированный, т.е. не совсем случайный или даже регулярный характер. Например, также как шумы нужно рассматривать, если в качестве анализируемого и воспроизводимого изображения служит изображение, информационное поле которого сформировано строчной или точечной структурами. Наличие их при дальнейшем воспроизведении нежелательно и с этой точки зрения эти структуры представляют флуктуации, т.е. шумы изображения, нарушающие информационное поле. Так, можно интерпретировать и полутоновое изображение, полученное растровыми полиграфическими способами печати. Например, при воспроизведении иллюстрации из старой книги или журнала это растрованное изображение служит оригиналом. Оно имеет регулярную растровую структуру, которая мешает воспроизведению и с этой точки зрения может рассматриваться как нежелательные флуктуации, шумы изображения. Читатель как приемник печатного полутонового изображения не нуждается в его растровой структуре, создаваемой полиграфистами вследствие технологической необходимости, и чем менее она будет заметна, тем лучше будет восприниматься полутоновое изображение. Таким образом, и с этой точки зрения растровая структура является шумовой структурой. В отличие от случайной зернистой структуры почернения в фотографическом изображении, растровая шумовая структура будет в большей степени скоррелирована с изображением. В настоящее время круг изображений с регулярными, псевдослучайными и случайными растровыми структурами, которые можно рассматривать как шумовые при дальнейшем воспроизведении этого изображения, довольно широк и включает изображения, полученные ксерокопированием, цифровой фотографией, с помощью лазерных принтеров и т.п.

Поэтому при анализе изображения для выбора стратегии его передачи и воспроизведения очень важно уметь оценивать наличие шумов и их воздействие на изображение, а также определять качественную и количественную характеристику зашумленных изображений.

Возможны разные виды шумов. Наиболее часто встречаемый (случай флуктуации оптической плотности изображения вокруг его среднего значения по какому-либо произвольному закону, например, по нормальному. Плотность распределения оптической плотности изображения тогда равна:

$$p(D) = \frac{1}{\sqrt{p\sigma_D^2}} \exp\left[-\frac{(D_i - \bar{D})^2}{2\sigma_D^2}\right] \quad (6.1)$$

где  $\bar{D}$  - среднее значение оптической плотности,  $D_i$  - ее текущий отсчет (рис. 6.1).

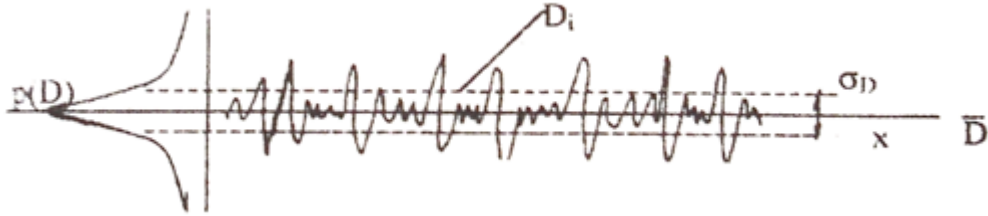


Рисунок 6.1. Флуктуации оптической плотности изображения.

Количественная характеристика таких шумов может быть выражена через параметр кривой распределения, а именно через средне-квадратичное отклонение  $\sigma_D$  от среднего:

$$\sigma_D = \sqrt{\sum (D_i - \bar{D})^2} \quad (6.2)$$

Величина  $D_i$  зависит от условий измерения, а именно от той площади, по которой проводится интегрирование значений  $D_i$ . Понятно, что если интегрирование значений проводится по большой площади, получаемые значения  $D_i$  равны или близки к  $\bar{D}$ . Чем меньше площадь измерений, тем больше до определенных пределов могут отличаться значения  $D_i$  от  $\bar{D}$ , тем больше  $\sigma_D$ . Площадь интегрирования определяется апертурой измерительного или считывающего устройства, и чем больше такая апертура, тем больше усредняются шумы изображения, тем меньше их влияние на получаемые результаты оценки изображения (рис. 6.2).

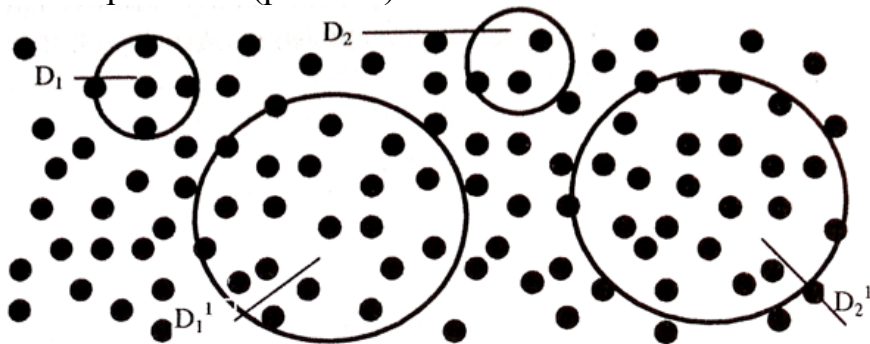


Рисунок 6.2. Усреднение оптической плотности изображения апертурой  $D_1 < D_2 \neq \bar{D}$ ;

$$D_1^1 \approx D_2^1 = \bar{D}.$$

Для того чтобы можно было оценить визуальное восприятие шумов, измерительное устройство должно воспроизводить функцию передачи модуляции человеческого глаза. Если изображение считывается в технической системе, используя разные условия его считывания, т.е. изменяя размеры считывающей апертуры, можно влиять на величину шума и отношение сигнал/шум. При этом необходимо помнить, что увеличивая апертуру, мы уменьшаем величину шума, но при этом ухудшаем ФПМ

систем считывания, и, следовательно, ухудшаем воспроизведение высокочастотных сигналов - резкость изображения.

В бинарном изображении, в котором могут быть только два уровня величины сигнала, шумы представляют собой бинарные случайные преобразования сигнала - случайный импульсный шум. Так, вместо сигнала с уровнем "черного" случайно возникает сигнал с уровнем "белого", и наоборот. Такие сигналы, инвертированные в противоположные, являются "ложными", шумовыми. Количественной оценкой шумов в этом случае может служить коэффициент зашумленности  $K_{шум}$  который определяется отношением количества "ложных" элементов  $N_{л}$  к общему числу элементов изображения  $N$  и рассчитывается:

$$K_{шум} = \frac{N_{л}}{N} = \frac{N_{л}}{N_{л} + N_{и}} \quad (6.3)$$

$N_{и}$  и  $N_{л}$  - число "истинных" и "ложных" элементов в изображении. При этом считается, что размеры элементов - черного и белого - равны и постоянны, меняется только их количество.

Однако, если считывание изображения производится приемником с апертурой, размер которой больше элемента изображения, происходит усреднение сигнала, полученного от нескольких элементов изображения, попавших в апертуру приемника. Величина полученного сигнала будет различна в зависимости от соотношения числа "черных" и "белых" элементов. Таким образом, при считывании бинарного изображения вместо двухуровневого сигнала будет получаться сигнал со множеством уровней. Такой сигнал в принципе может оцениваться с помощью сто, как это описано выше. Если система воспроизведения бинарна, такой многоуровневый сигнал должен быть снова приведен к двухуровневому. Это осуществляется методом порогового разделения. Например, все сигналы, уровень яркости которых меньше  $0,5(N_q > N_{\delta})$ , приравниваются к «черному», а все сигналы, уровень яркости которых больше  $0,5(N_q < N_{\delta})$ , приравниваются к «белому». Для такого преобразованного изображения снова может быть найден  $K_{шум}$ . Вследствие того, что  $K_{шум}$  в первичном изображении обычно значительно меньше 0,5, при таком преобразовании с использованием большой апертуры считывания  $K_{шум}$  вторичного изображения уменьшается. Это связано с тем, что «ложные» элементы, составляющие меньшинство на равномерном поле изображения, устраняются при усреднении и последующей бинаризации. С точки зрения зашумленности, полученный сигнал изображения улучшается. Однако, как и в предыдущем случае многоуровневого сигнала, увеличение апертуры считывания приводит к ухудшению воспроизведения высокочастотных сигналов изображения - мелких штрихов, резких краев деталей изображения и т.п.

На практике в программах обработки изображений используются методы воздействия на шумовые характеристики, подобные рассмотренным модельным методам. Например, в программе Photoshop предусмотрены специальные подпрограммы - фильтры, позволяющие повышать и понижать зашумленность обрабатываемых изображений. Для добавления шумовой структуры в изображение оригинала, например, в художественных целях, в программе Photoshop используют фильтр Add Noise (добавить шум), которые находятся в меню Filter/Noise (фильтр/шум).

Фильтр Add Noise имеет три настраиваемых параметра: Amount (уровень регулирования), Distribution (распределение), Monochromatic (монохроматичность):

- Amount. Параметр предоставляет регулировку в пределах от 0 до 500;

- **Distribution.** Распределение может носить случайный характер (Uniform), и, в частности, подчиняться нормальному закону Гаусса (Gaussian);

- **Monochromatic.** При включенном параметре Monochromatic шумовая структура формируется за счет изменения только яркостной составляющей сигнала, а при выключенном параметре Monochromatic - шумовая структура состоит из отдельных цветных пятен.

Меню Noise включает также три фильтра, подавляющих шумовую структуру изображения: Despeckle (петушь), Median (усреднение) и Dust & Scratches (пыль и царапины).

Самый простой фильтр Despeckle не имеет дополнительных настроек и отфильтровывает шумы изображения сразу после запуска.

Более сложный фильтр Median настраивается по параметру Radius (радиус) и корректирует сигнал текущего обрабатываемого пикселя изображения, добавляя к нему сигнал, усредненный на участке изображения, ограниченном заданным радиусом.

Наиболее сложный фильтр Dust & Scratches имеет два параметра настройки: Radius (радиус) и Threshold (порог).

Параметр Radius фильтра Dust & Scratches имеет назначение, подобное параметру Радиус фильтра Median, а параметр Threshold регулируется в пределах от 0 до 255 и определяет контраст изображения, при котором начинает работать фильтр. Чем меньше устанавливаемое значение Threshold, тем более эффективно работает фильтр Dust & Scratches.

Использование в программе Photoshop описанных фильтров позволяет в широких пределах изменять зашумленность обрабатываемых изображений в зависимости от предъявляемых к качеству воспроизведения требований.

### 3. МЕТОДИКА И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1) С помощью соответствующей программы на экране ПЭВМ моделируют изображение двух тестов, один из которых состоит из шрифтовых, а второй из штриховых элементов. Введением с клавиатуры номера теста осуществляют выбор заданного преподавателем теста.

2) Далее на экране ПЭВМ моделируют изображение равномерного белого поля. При введении с клавиатуры заданного коэффициента  $K_{шум}$  (здесь и далее  $K_{шум}$  выражается в %), изображение белого поля зашумляется в случайном порядке черными элементами.

3) На следующем этапе во втором окне экрана ПЭВМ формируют бесшумное изображение теста, а в третьем окне экрана синтезируют изображение теста и наложенной на него шумовой структуры.

4) Далее с клавиатуры вводят размер апертуры - число элементов, формирующих сторону квадратной апертуры. Анализируют качество считанного с помощью выбранной апертуры и бинаризованного затем изображения, выводимого в четвертом окне экрана ПЭВМ. Записывают полученное значение  $K_{шум}$ .

5) Изменяют размер апертуры и анализируют изменение качества получаемого изображения и величины  $K_{шум}$ .

6) В зависимости от задания, данного преподавателем, возможно повторение указанных в п.п. 4.1-4.5 операций для другого вида теста или величины  $K_{шум}$ .



7) Анализируют полученные результаты и делают выводы о влиянии структуры шума и условий считывания на качество получаемого изображения теста и величину  $K_{шум}$ .

8) В программе Photoshop открывают файл с тестом Test\_RSl.pdf.

9) Используя фильтр Add Noise, добавляют шум в изображение теста.

10) Используя фильтры Despeckle, Median и Dust & Scratches обрабатывают тестовое изображение. Визуально оценивают эффект изменения зашумленности изображения после фильтрации его данными фильтрами.

#### **4. ОБОРУДОВАНИЕ И МАТЕРИАЛЫ**

1) ПЭВМ со специальным ПО.

2) Проектор.

3) Калькулятор.

4) Карандаш, линейка, резинка, миллиметровая бумага.

#### **5. СОДЕРЖАНИЕ И ФОРМА ОТЧЕТА**

1) Краткое описание основных теоретических положений работы.

2) Задание, перечень основных операций и результаты наблюдений.

3) анализ полученных результатов и выводы.

**Практическое занятие № 7 (3 часа)**  
**ОСНОВНЫЕ МОДЕЛИ ФИЛЬТРАЦИИ**  
**В РЕПРОДУКЦИОННОЙ СИСТЕМЕ ОДНОВРЕМЕННОЙ**  
**ФОРМАТНОЙ ОБРАБОТКИ И РАСЧЕТ ВОЗДЕЙСТВИЯ ФИЛЬТРАЦИИ НА**  
**ВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ**

**1. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ РАБОТЫ**

**Цель работы:** изучить воздействие различных звеньев репродукционной системы одновременной форматной обработки, а также системы в целом на частотную фильтрацию изобразительной информации, воспроизводимой системой.

**Задачи работы:** изучить факторы, влияющих на фильтрацию изобразительной информации для различных звеньев системы, и изучение методов расчета воздействия этих звеньев на частотную фильтрацию. изучить методы расчета совместного воздействия различных звеньев системы на ее совокупные фильтрующие свойства и на воспроизведение изображения.

**2. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ**

Репродукционная техническая система, передавая изображение, производит преобразование, оказывая воздействие на воспроизведение информации. Это воздействие может быть как полезным, так и вредным, но оно существует объективно, и результаты этого воздействия могут быть названы естественными, или системными преобразованиями.

Одним из видов естественных преобразований в системе является фильтрация пространственных или временных частот в изображении. Описать эту фильтрацию можно с помощью функции передачи модуляции (ФПМ), которая, как правило, может рассматриваться в качестве фильтра нижних пространственных частот, осуществляющего снижение доли высокочастотных составляющих в пространственном Фурье-спектре изображения. Таким образом, ФПМ характеризует степень потери резкости изображения, его мелких деталей в результате естественных частотных преобразований в системе или ее отдельных звеньях.

Для оценки возможных свойств системы и путей ее совершенствования целесообразно уметь оценивать ФПМ отдельных ее звеньев. Тогда можно достаточно легко определить звено системы, которое может служить причиной неудовлетворительных свойств системы в целом. Такой анализ очень облегчает положение, что для линейной системы ее совокупная ФПМ может быть найдена простым перемножением ФПМ отдельных звеньев системы.

Во многих случаях предварительный анализ и выявление слабого звена системы, в большей степени ответственного за ухудшение частотных свойств передаваемого изображения, можно сделать за счет применения моделей фильтрации и созданных на основе этих моделей расчетных методов определения ФПМ отдельных звеньев системы.

Расчетные методы оценки ФПМ могут быть также положены в основу проектирования новых репродукционных систем.

Во многих случаях модели и расчетные методы оценки ФПМ звеньев базируются на фундаментальных основах, например, физической оптики. В других случаях расчетные методы оценки ФПМ представляют аналитические феноменологические модели физических явлений и требуют наличия некоторых экспериментальных данных. Но возможность такого моделирования и аналитического расчета ФПМ облегчает проектирование систем.

Рассмотрим возможность моделирования и расчета фильтрующих свойств отдельных звеньев системы воспроизведения (канала передачи). 3.1. Расчет ФПМ объектива.

### 2.1. Расчет ФПМ объектива.

Если объектив безабберационный и точно сфокусирован, т.е. размытие узких световых пучков и ФПМ в плоскости оптического изображения определяется только дифракцией излучения на апертуре объектива, ФПМ может быть рассчитана по формуле:

$$T_v^0 = \frac{2}{\pi} \left[ \arccos \frac{\lambda v}{2A} - \frac{\lambda v}{2A} \sqrt{1 - \left( \frac{\lambda v}{2A} \right)^2} \right] \quad (7.1)$$

где  $A$  - числовая апертура;  $\lambda$  - длина волны действующего излучения.

Если объектив расфокусирован, ФПМ его находят по формуле:

$$T_v^0 = \frac{2J_1(nvd)}{nvd}, \quad (7.2)$$

где  $d$  - диаметр пятна размытия,  $J_1$  - функция Бесселя первого рода порядка (табличные данные).

### 2.2. Расчет ФПМ фотографического слоя.

При использовании в качестве регистрирующего материала сильно рассеивающего (крупнозернистого) фотографического слоя, ФПМ его может быть просимоделирован формулой:

$$T_v^{\phi / \kappa z} = \frac{1}{1 + (nvk / 2.3)^2}, \quad (7.3)$$

где  $k$  - константа Фризера, характеризующая ослабление рассеянного света. Она определяет ширину функции размытия, т.е. с увеличением  $k$  увеличивается светорассеяние материала.

Если материал слабоссеивающий (мелкозернистый), ФПМ его моделируют по формуле:

$$T_v^{\phi / \kappa z} = \rho + \frac{1 - \rho}{1 + (\pi vk / 2.3)^2} \quad (7.4)$$

где  $\rho$  - доля нерассеянного света (безразмерная величина).

Графически ФПМ сильно- и слабоссеивающих сред имеет следующий вид (рис. 7.1).

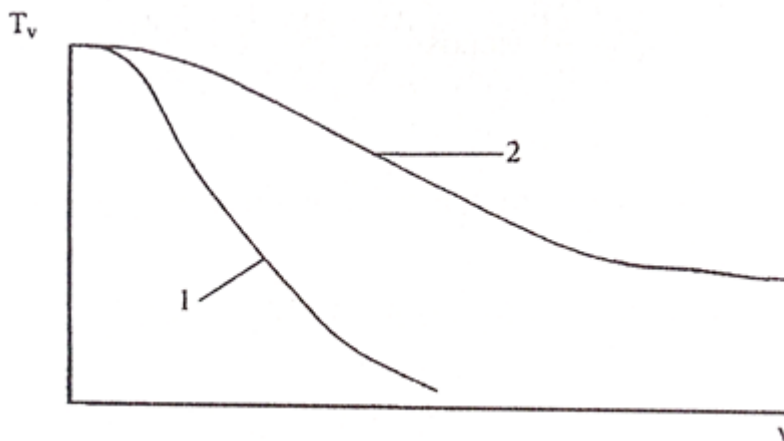


Рисунок 7.1. ФПМ сильно (1) и слабоссеивающей (2) фотопленок.

### 2.3. Расчет ФПМ контактно-копировального процесса.

Для процесса контактного копирования ФПМ контактной системы получения изображения (на основании теории дифракции в спектральном представлении) можно представить в следующем виде:

$$T^k(v) = \sin\left[\frac{\pi}{2}(1 - 2\lambda r v^2)S(v)\right] \quad (7.5)$$

Где  $\lambda$  - длина волны наиболее активничного света,  $r$  - расстояние от объекта до фотослоя – величина зазора,  $S(v)$  - одномерный спектр проекции светящегося элемента источника света на плоскости объекта, с вершиной проекции на фотослое.

Графическое формирование изображения в контактной системе представлено на рис. 7.2.

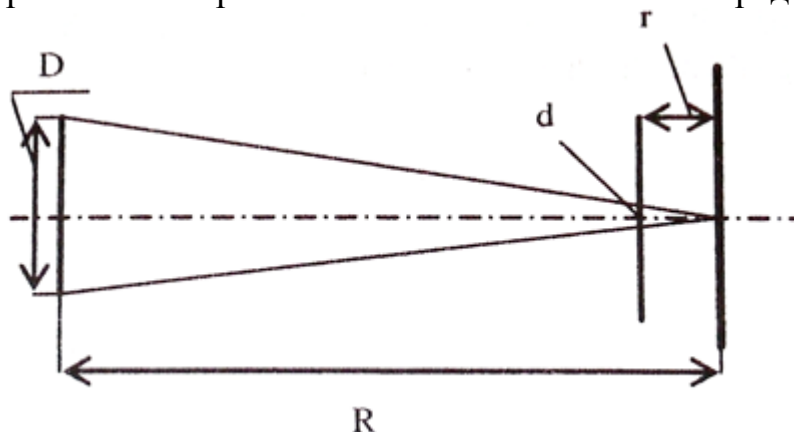


Рисунок 7.2. Контактнoкопировальная система:  $D$  - геометрический размер светящегося пятна источника излучения;  $R$  - расстояние от фотослоя до источника света;  $r$  - расстояние от оригинала до плоскости записи или зазор;  $d$  - проекция источника излучения на плоскость оригинала.

Из-за неполного контакта, неровностей и загрязнения поверхностей обычно между эмульсионным слоем фотоматериала и объектом в контактной системе присутствует воздушный зазор, иногда для специальных целей между фотоматериалом и объектом может быть размещены прокладки с показателем преломления  $n$ .

Размер пятна проекции  $d$ :

$$d = \frac{D n r}{R} \quad (7.6)$$

где  $D$  - геометрический размер светящегося пятна источника излучения;  $R$  - расстояние от фотослоя до источника света;  $n$  - показатель преломления промежуточного материала с толщиной  $r$ ; если зазор воздушный,  $n = 1$ .

Спектр круглой апертуры (функция sinc) рассчитывается по формуле:

$$S(v) = \frac{\sin(\pi v l)}{\pi v l} \quad (7.7)$$

где  $l$  - ширина светящегося тела по анализируемому направлению.

Спектр круглой апертуры определяется по формуле (функция Bessinc):

$$S(v) = \frac{2J_1(\pi v d)}{\pi v d}, \quad (7.8)$$

Где  $J_1(\pi v d)$  - функция Бесселя первого порядка первого рода (табличные данные).

## 2.4. Расчет ФПМ всей линейной системы передачи сигнала.

При оценке линейной системы, используя преимущества метода ФПМ, можно рассчитать ФПМ системы перемножением отдельных ее звеньев.

Например, если, цепь системы воспроизведения изображения включает оптическое звено и фотографический материал, используют следующую формулу:

$$T^c(\nu) = T^o(\nu) \cdot T^{\phi}(\nu) \quad (7.9)$$

где  $T^c(\nu)$  - ФПМ системы;  $T^o(\nu)$  - ФПМ оптического звена;  $T^{\phi}(\nu)$  - ФПМ регистрирующего звена.

## 2.5. Пример практического расчета воспроизведения изображения в многозвенной системе одновременной форматной обработки (контактно-копировальная система с записью на слаборассеивающую фотографическую пленку) с учетом фильтрующих свойств системы.

В рассматриваемом примере в качестве объекта воспроизведения выбран периодический объект, что позволяет уменьшить объем вычислений за счет замены интеграла Фурье рядом Фурье. Это дает возможность проводить расчеты на пространственных частотах, кратных основной частоте объекта.

**Дано.** 1. Периодический одномерный объект (оригинал) с симметричным распределением интенсивности по профилю отдельного элемента. Объект задан распределением оптических плотностей на полупериоде (этого достаточно вследствие симметричности объекта). Полупериод разделен на  $n$  равных частей. В точках деления оптические плотности составляют ряд:

$n$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$D$	0,00	0,01	0,06	0,12	0,22	0,37	0,55	0,80	1,05	1,23	1,30	1,30	1,22

2. Диаметр входного равномерно освещенного зрачка источника излучения, круговой формы,  $A = 40$  мм.

3. Величина зазора,  $r = 1$  мм.

4. Расстояние от плоскости входного зрачка до плоскости фотопленки,  $R = 1000$  мм.

5. Максимум актиничности системы,  $\lambda = 540$  нм.

6. Константа Фризера,  $k = 25$  мкм.

7. Доля нерассеянного света,  $\rho = 0,6$ .

**Определить.** Распределение интенсивности в экспонированном не проявленном изображении периодического объекта, воспроизводимого в контактно-копировальной системе с регистрацией на слаборассеивающую фотопленку.

**Решение.**

1. Осуществляют пересчет  $D^{об}(x)$  в  $E^{об}(x)$ . Данные пересчета приведены ниже.

$n$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$E^{об}(x)$	1,00	0,97	0,88	0,75	0,60	0,43	0,28	0,16	0,09	0,06	0,05	0,05	0,06

2. Проводят прямое преобразование Фурье периодической функции  $E^{об}(x)$ , для которой спектр Фурье является дискретным.

Данное распределение интенсивности  $E^{об}(x)$  - это четная периодическая функция.

Следовательно, ее спектр, во-первых, будет дискретным, и, во-вторых, он будет содержать только косинусоидальные составляющие, т.е.:

$$E^{об}(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^N a_n \cdot \cos 2\pi n x \quad (7.10)$$

где  $n=1,2,3$ ,  $a_0$  - постоянная составляющая;  $a_n$  - амплитуды гармонических составляющих.

При этом:

$$a_0 = \frac{2}{p} \int_{-p/2}^{p/2} E^{об}(x) dx$$

и

$$a_n = \frac{2}{p} \int_{-p/2}^{p/2} E^{об}(x) \cos 2\pi n x dx$$

9 я/2

Вычисления представлены в табл. 7.1.

Таблица 7.1

Расчет спектра распределения интенсивности периодического объекта

$x_n$	$E_n^{об}(x)$	$\cos X^*)$	$\cos 2X$	$\cos 3X$	$E_n^{об}(x) \cdot \cos$	$E_n^{об}(x) \cdot \cos 2X$	$E_n^{об}(x) \cdot \cos 3X$
0	0,50	1,00	1,00	1,00	0,50	0,50	0,50
1	0,97	0,97	0,87	0,71	0,94	0,84	0,69
2	0,88	0,87	0,50	0,00 -	0,77	0,44	0,00
3	0,75	0,71	0,00 -	0,71 -	0,53	0,00	-0,53
4	0,60	0,50	0,50 -	1,00 -	0,30	-0,30	-0,60
5	0,43	0,26	0,87 -	0,71	0,12	-0,37	-0,31
6	0,28	0,00 -	1,00 -	0,00	0,00	-0,28	0,00
7	0,16	0,26 -	0,87 -	0,71	-0,05	-0,14	0,11
8	0,09	0,50 -	0,50	1,00	-0,045 -	-0,045	0,09
9	0,06	0,71 -	0,00	0,71	0,043	0,00	0,043
10	0,05	0,87 -	0,50	0,00 -	-0,043 -	0,025	0,00
11	0,05	0,97 -	0,87	0,71 -	0,049	0,039	-0,036
12	0,06	1,00	1,00	1,00	-0,060	0,060	-0,060
$F^{об}(\nu)$	4,88				2,87	0,77	-0,103
$F_{отн}^{об}(\nu)$	$a_0 = 1,0$				$a_1 = 0,59$	$a_2 = 0,16$	$a_3 = 0,02$

\*)  $X = 2\pi \nu x$

Полученные значения для  $F^{об}(\nu)$ , как правило, для удобства дальнейших расчетов нормируют относительно максимального значения. В данном случае максимальное значение спектра (4,88) соответствует частоте  $\nu = 0$ . Значение 4,88 для нулевой частоты приравнивают к единице. Значения всех других спектральных составляющих получают посредством деления полученных значений для данной частоты на 4,88.

Таким образом, полученный спектр распределения интенсивности воспроизводимого объекта можно ограничить тремя основными гармоническими составляющими. Например, если пространственная частота объекта  $10 \text{ мм}^{-1}$ , спектр распределения интенсивности в рассматриваемом примере составляет ряд частот: 10, 20 и  $30 \text{ мм}^{-1}$ .

3. Определяют спектр проекции входного зрачка на плоскость объекта. Для этого рассчитывают по формуле (7.4) диаметр проекции входного зрачка на плоскость объекта:

$$d = \frac{40 \cdot 1}{1000} = 0,04 \text{ мм.}$$

Расчеты  $S(\nu)$  по формуле (7.8) показаны в табличной форме. Ход вычислений ясен из таб. 7.2. Отметим только, что  $S(\nu)$  достаточно определить на частотах, соответствующих частотам спектра интенсивности объекта  $F^{об}(\nu)$ .

Таблица 7.2

Расчет спектра проекции входного зрачка на плоскость объекта

$n$	$\nu, \text{мм}^{-1}$	$\pi d \nu$	$J_1(\pi d \nu)$	$2J_1(\pi d \nu) / d \nu$
0	0	0,00	0,00	1,00
1	10	1,26	0,51	0,81
2	20	2,51	0,49	0,39
3	30	3,77	0,05	0,03

4. По формуле (7.5) находим ФПМ системы контактного копирования. Вычисления представлены в табл. 7.3.

Таблица 7.3

Расчет ФПМ контактно-копировальной системы

$n$	$\nu, \text{мм}^{-1}$	$2r\lambda\nu^2$	$1 - 2r\lambda\nu^2$	$\pi / 2(1 - 2\lambda\nu) = Z$	$\sin Z$	$T^{kk}(\nu)$
0	0	0,000	1,000	90,00	1,00	1,00
1	10	0,108	0,892	80,30	0,99	0,80
2	20	0,432	0,568	51,10	0,77	0,30
3	30	0,972	0,028	2,52	0,04	0,00

5. По формуле (7.4) рассчитывают ФПМ слаборассеивающей фотографической пленки для заданных параметров рассеяния. Вычисления представлены в табл. 7.4.

Таблица 7.4

Расчет ФПМ фотопленки

$\nu, \text{мм}^{-1}$	$(k\nu)^2$	$T^{фнл}(\nu)$
0	0,000	1,00
10	0,063	0,96
20	0,250	0,87
30	0,560	0,80

**Примечание.** Данные табл. 7.3 показывают, что нет необходимости в нашем случае рассчитывать ФПМ пленки для частоты более  $30 \text{ мм}^{-1}$ . ФПМ контактно-копировальной системы для этой частоты равна нулю.

6. ФПМ системы соответствует, таким образом, следующим данным (см. для расчета формулу(7.9)) (табл. 7.5).

Таблица 7.5

Расчет ФПМ контактно-копировальной системы с записью на слаборассеивающую фотопленку

$\nu, \text{мм}^{-1}$	$T^{kk}(\nu)$	$T^{фнл}(\nu)$	$T^c(\nu)$
0	1,00	1,00	1,00
10	0,80	0,96	0,77
20	0,30	0,87	0,26

7. Вычисляют спектр интенсивности изображения объекта по формуле:

$$F_v^{u3} = F_v^{ob} \cdot T_v^c \quad (7.11)$$

Результаты вычислений представлены в табл. 7.6.

Таблица 7.6

Расчет спектра интенсивности изображения периодического объекта

$\nu, \text{мм}^{-1}$	$F^{ob}(\nu)$	$T^c(\nu)$	$F^{u3}(\nu)$
0	1,00	1,00	1,00
10	0,59	0,77	0,45
20	0,16	0,26	0,04

8. По значению  $F^{u3}(\nu)$  вычисляют распределение интенсивности  $E^{u3}(x)$  в изображении периодического объекта, т.е. осуществляют обратное преобразование Фурье согласно выражению:

$$E(x) = 0,5 + \sum_1^n F^{u3}(x) \cos 2\pi \nu x \quad (7.12)$$

Вычисленное распределение интенсивности - это распределение по профилю элемента периодического объекта (табл. 7.7). Здесь, как уже отмечалось, достаточно провести вычисления для полупериода, далее полученную кривую зеркально отобразить относительно оси ОУ, и, наконец, полученное распределение для периода многократно периодически повторять.

Таблица 7.7

Расчет распределения интенсивности в изображении периодического объекта

$x_n$	$F(10) \cos X$	$F(20) \cos 2X$	$0,5 + \sum F(\nu) \cdot \cos nX$	$E_{отн}^{u3}(x)$
0	0,45	0,04	0,99	1,00
1	0,44	0,03	0,97	0,98
2	0,39	0,02	0,91	0,92
3	0,32	0,00	0,82	0,83
4	0,23	-0,02	0,71	0,72
5	0,13	-0,03	0,60	0,61
6	0,00	-0,04	0,46	0,46
7	-0,13	-0,03	0,34	0,34
8	-0,23	-0,02	0,25	0,25
9	-0,32	0,00	0,18	0,18
10	-0,39	0,02	0,13	0,13
11	-0,44	0,03	0,09	0,09
12	-0,45	0,04	0,09	0,09



**Примечание:** 1. Значения  $\cos X$ ,  $\cos 2X$ , где  $X = 2\pi x$ , даны в табл. 7.1.

2. Значения полученной расчетной интенсивности чаще всего приводятся к единице в точке максимума (в данном случае максимум равно 0,99 в точке  $x = 0$ ). Относительные значения интенсивности для других точек находятся делением каждого расчетного значения интенсивности на 0,99.

9. В заключение строят профиль распределения интенсивностей в изображении периодического объекта. Вследствие периодичности объекта, и в силу того, что периодический объект является четной функцией (т.е. симметричной относительно оси ординат), такое построение достаточно выполнить на полупериоде одного центрального периода объекта, а затем зеркально отобразить в другую сторону от оси ординат (рис. 7.3).

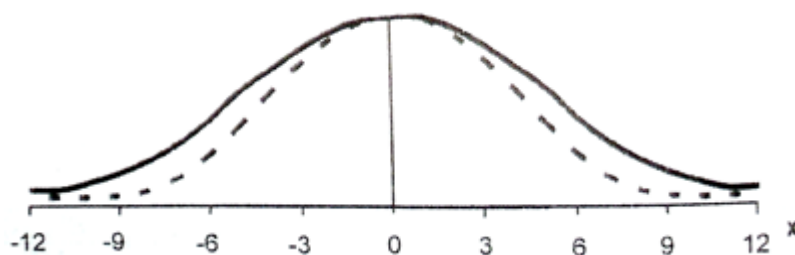


Рисунок 7.3. Распределение интенсивности периодического объекта (полупериод): ----- распределение в объекте; ————— распределение в изображении объекта.

### 3. МЕТОДИКА И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

- 1) Для заданных параметров системы программными средствами рассчитать ФПМ отдельных звеньев и системы в целом.
- 2) Построить распределения интенсивности в изображении и сравнить его с входным сигналом.
- 3) Для заданных переменных параметров системы изучить их влияние и дать оценку их воздействия на результат воспроизведения.

### 4. ОБОРУДОВАНИЕ И МАТЕРИАЛЫ

- 1) ПЭВМ со специальным ПО.
- 2) Проектор.
- 3) Калькулятор.
- 4) Карандаш, линейка, резинка, миллиметровая бумага.

### 5. СОДЕРЖАНИЕ И ФОРМА ОТЧЕТА

- 1) Название и цель работы.
- 2) Краткое теоретическое обоснование.
- 3) Заданные параметры системы, ФПМ отдельных звеньев системы с заданными параметрами, ФПМ системы.
- 4) Анализ влияния значений отдельных параметров на ФПМ соответствующего звена и ФПМ системы в целом.
- 5) Распределение интенсивности в изображении для анализируемой системы.
- 6) Оценка влияния значений отдельных параметров системы на распределение интенсивности в изображении.
- 7) Анализ полученных результатов и выводы.

**МОДЕЛЬ ФИЛЬТРАЦИИ В СИСТЕМЕ ПОЭЛЕМЕНТНОЙ ОБРАБОТКИ**  
**ИЗОБРАЖЕНИЯ И РАСЧЕТ ВОЗДЕЙСТВИЯ ФИЛЬТРАЦИИ НА**  
**ВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ**

**1. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ РАБОТЫ**

**Цель работы:** изучить воздействие основных факторов на частотную фильтрацию в системе поэлементной обработки изображений.

**Задачи работы:** изучить воздействия на воспроизведение заданного тест-изображения апертурной фильтрации при считывании изображения апертурами разного размера; изучить воздействия апертурной фильтрации на разные объекты; определить ФПМ фильтрующей апертуры.

**2. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ**

В системе поэлементной обработки изображений (СПОИ) главным фактором, определяющим частотную фильтрацию изображения, является апертурная фильтрация. В СПОИ информация считывается посредством сканирования. Сканирование поэлементное считывание изображения при использовании развертывающего элемента, который последовательно перемещается вдоль строки (строчная развертка) и по кадру (кадровая развертка). Получаемый в результате сканирования сигнал становится одномерным, так как он зависит от одной координаты времени. При сканировании на воспроизводимое изображение оказывают влияние искажения, вносимые объективом, и искажения, вносимые апертурой, формирующей сканирующее пятно при снижении.

Влияние ФПМ развертывающего элемента обычно значительно больше, чем влияние ФПМ объектива сканирующей головки для тех же частот.

Поэтому при расчете ФПМ оптической системы поэлементной обработки часто можно пренебречь искажениями, вносимыми объективом, а учитывать только искажения, создаваемые развертывающим элементом. Эти искажения называются апертурными искажениями или апертурной фильтрацией.

Сканирование в системе поэлементной обработки характеризуется следующими параметрами:

- Шаг развертки ( $\delta$ ) - равен расстоянию между серединами двух соседних строк на развертываемом изображении. Чем меньше шаг, тем более точно воспроизводятся мелкие детали изображения. Шаг связан с размерами и формой сканирующего элемента.

- Апертура развертывающей системы (отверстие сканирующего элемента) - выделяемый малый элемент изображения. Подбирается таким образом, чтобы поверхность оригинала плотно покрывалась линиями развертки без разрывов, т.е. в соответствии с шагом кадровой развертки.

Обычно выбирают круглую или прямоугольную форму сканирующей апертуры.

В оптимальном случае размер прямоугольного сканирующего элемента должен равняться шагу развертки.

Диаметр круглого сканирующего элемента должен быть больше шага развертки:  
 $d = (1,2 - 1,5)\delta$ .

Если развертывающий элемент будет меньше шага развертки, то увеличивается значение ФПМ в области высоких частот, т.е. улучшается точность считывания мелких деталей вдоль строки изображения. Однако при этом считывается не вся информация. В том случае, если развертывающий элемент больше шага развертки, изображение считывается полностью, но величина ФПМ в области высоких частот уменьшается.

Рассмотрим пример фильтрации при поэлементном считывании изображения апертурой определенного размера (рис. 8.1).

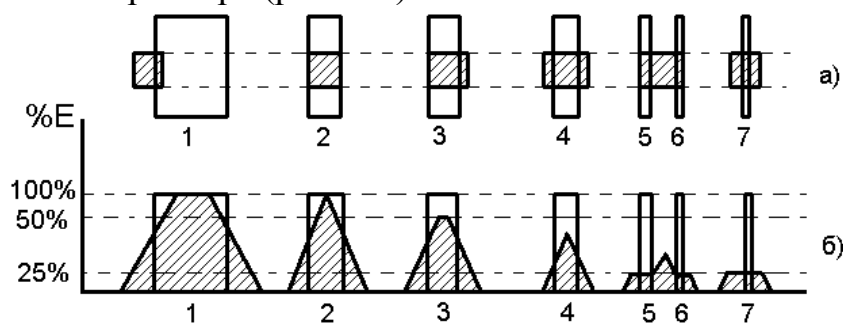


Рисунок 8.1. Сканирование деталей различной ширины: а - перемещение аперттуры вдоль траектории сканирования; б - интегральная освещенность, зарегистрированная в результате сканирования.

Пусть размер сканируемого просвета № 1 в 2 раза больше развертывающей аперттуры. При расположении аперттуры вне просвета освещенность, получаемая за аперттурой, равна нулю. При смещении аперттуры на четверть в сторону просвета освещенность, создаваемая за аперттурой, равна -  $\frac{1}{4}E_{\max}$ , а точка отсчета координаты будет равна координате центра аперттуры. Максимальное значение освещенности достигается тогда, когда вся площадь считывающей аперттуры (диафрагмы) расположена на белом поле просвета.

При сканировании просветов, размеры которых меньше развертывающего элемента, значения освещенности не достигают максимума. Чем меньше размер анализируемого просвета, тем меньше значение интегральной освещенности (см. рис. 8.1 - случаи 3,4,5, 6,7).

При сканировании двух узких просветов № 5, № 6, которые отстоят друг от друга на  $\frac{1}{2}$  ширины развертывающего элемента, они считываются одновременно одной аперттурой. В результате считывания-воспроизведения просветы сливаются в один просвет. Максимум этого сигнала расположен в неосвещенной точке изображения. Это объясняется тем, что в определенный момент времени в поле развертывающего элемента одновременно попадают два узких просвета, поэтому увеличивается интегральная освещенность за аперттурой. Таким образом, появляются ложные сигналы.

Следовательно, по мере перемещения развертывающего элемента вдоль одномерного сигнала происходит последовательное изменение интегральной освещенности за аперттурой диафрагмой. Резкие изменения входного светового сигнала становятся плавными в получаемом временном электрическом сигнале. Для некоторых соотношений величин просветов и размера аперттуры можно получить сигналы с уменьшенной амплитудой или «ложные» сигналы.

Математически апертурную фильтрацию и получаемые результаты можно описать с помощью операции свертки.

В системах поэлементного считывания одномерное исходное изображение  $E_1(x)$  свертывается с функцией размытия анализирующей аперттуры  $g(x')$ , где  $x'$  координата, соответствующая строчной развертке изображения. При этом происходит усреднение освещенности изображения по площади анализирующей аперттуры. Отфильтрованный сигнал  $E_2(x)$  рассчитывается с помощью операции свертки:

$$E_2(x) = \int_{-\infty}^{\infty} E_1(x - x')g(x')dx' \quad (8.1)$$

Более удобным является анализ проводимых преобразований в пространственно-спектральной области. Операция апертурной фильтрации соответствует перемножению спектра исходного сигнала изображения  $F_1(\omega_x)$  и функции передачи модуляции (ФПМ) апертюры  $T(\omega_x)$ . Спектр сигнала отфильтрованного изображения  $F_2(\omega_x)$  рассчитывается по формуле:

$$F_2(\omega_x) = F_1(\omega_x) \cdot T(\omega_x) \quad (8.2)$$

где  $\omega_x$  - пространственная частота ( $\omega = 2\pi/\rho$ ),  $\rho$  - период гармонической составляющей);  $F_1(\omega_x)$  - Фурье - преобразование от  $g(x')$ .

ФПМ зависит от ее формы и рассчитывается по формулам (7.7. и 7.8) лабораторной работы № 7.

ФПМ сканирующей апертюры осциллирует вокруг оси абсцисс и при частотах  $\omega_x$ , больших  $1/r$ , быстро стремится к нулю. Диапазон основной частоты пропускания этого фильтра находится в границах частот от 0 до  $1/r$ . Следовательно, при перемножении спектра исходного сигнала  $F_1(\omega_x)$  на ФПМ сканирующей апертюры  $T(\omega_x)$ , спектр получаемого изображения  $F_2(\omega_x)$  в высоких частотах также уменьшается. Таким образом, сканирующая апертюра выполняет роль фильтра нижних частот. Из этого следует, что чем больше радиус  $r$  апертюры, тем уже диапазон пропускания и тем более крупные детали изображения теряются в результате апертурной фильтрации.

Для получения реального вида сигнала после фильтрации необходимо провести обратное Фурье-преобразование. Обратное Фурье- преобразование при взаимодействии квадратной апертюры и прямоугольного сигнала дает сигнал трапециевидной формы (см. вышеприведенный пример).

### 3. МЕТОДИКА И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1) Получить задание по тест-изображению и проанализировать воздействие на воспроизведение этого тест-изображения частотной фильтрации при считывании изображения разными апертюрами.

2) Для заданной апертюры оценить ее воздействие на результат считывания различных тест-изображений.

3) Оценить ФПМ разных апертюр.

4) Проанализировать полученные результаты и сделать выводы.

### 4. ОБОРУДОВАНИЕ И МАТЕРИАЛЫ

1) ПЭВМ со специальным ПО.

2) Проектор.

3) Калькулятор.

4)) Карандаш, линейка, резинка, миллиметровая бумага.

### 5. СОДЕРЖАНИЕ И ФОРМА ОТЧЕТА

1) Краткое описание цели и основных теоретических положений работы.

2) Задание, перечень основных операций, результаты.

3) Анализ полученных результатов и выводы.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

### Основная литература

1. Пантюхина Е.В., Котляров В.С., Пантюхин О.В. Перспективные технологии изготовления пищевой упаковки: учебник. Тула: Изд-во ТулГУ, 2018. 212 с.
2. Серова В.Н. Материаловедение в полиграфическом и упаковочном производствах: учебное пособие / Серова В.Н. — Казань : Казанский национальный исследовательский технологический университет, 2017. — 332 с.
3. Мочалова Е.Н. Материаловедение и основы полиграфического и упаковочного производств : учебное пособие / Мочалова Е.Н., Мусина Л.Р.. — Казань : Казанский национальный исследовательский технологический университет, 2017. — 148 с.

### Дополнительная литература

1. Ильина О.В. Дизайн-конструирование тары и упаковки : учебное пособие / Ильина О.В.. — Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, 2017. — 48 с.
2. Ильина О.В. Конструирование и дизайн упаковки : учебное пособие / Ильина О.В. — Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, 2018. — 98 с.
3. Тара и упаковка [электронный ресурс]: журнал. — ISSN 0868-5568. Режим доступа: [https://elibrary.ru/title\\_about.asp?id=9731](https://elibrary.ru/title_about.asp?id=9731) - eLibrary.ru, по паролю.

### Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины (модуля)

1. <https://tsutula.bibliotech.ru/> - Электронный читальный зал “БИБЛИОТЕХ”: учебники авторов ТулГУ по всем дисциплинам. Режим доступа: по паролю.- Загл. с экрана
2. <https://www1.fips.ru> – Федеральный институт промышленной собственности [Электронный ресурс]. Режим доступа: свободный.- Загл. с экрана
3. <http://window.edu.ru> - Единое окно доступа к образовательным ресурсам: портал [Электронный ресурс]. Режим доступа: свободный.- Загл. с экрана
4. <http://cyberleninka.ru/> - НЭБ КиберЛенинка научная электронная библиотека открытого доступа. Режим доступа: свободный.- Загл. с экрана.