

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

Лабораторная работа №3
“Изучение влияния различных типов аберраций на качество оптического
изображения”
6 вариант

Выполнил: Солодовников И.

Группа: Q4110

Проверила: Иванова Т.В.

Санкт-Петербург

2025

Задание

Цель работы:

Отработать навыки моделирования влияния различных aberrаций на изображение.

Задание:

Создать программу, моделирующую влияние aberrаций различного типа на ФРТ, ОПФ и произвольное изображение при некогерентном освещении.

Заданные условия:

Оптическая система:

- Зрачок круглый;
- Aberrации – один из членов разложения волновой aberrации в ряд по полиномам Цернике.

Величина коэффициента разложения aberrации в ряд подбирается таким образом, чтобы в итоге получились результаты:

- Aberrация отсутствует;
- Число Штреля ≈ 0.8 ;
- Число Штреля ≈ 0.2 ;
- Контраст 0.2 при частоте $s \approx 1$;
- Контраст 0.2 при частоте $s \approx 0.8$.

Численные параметры: размер матрицы $N=512$, длина волны $\lambda=0.5 \mu\text{m}$, диаметр зрачка $D_{\text{зр}}=20$, коэффициенты $A=A'=0.5$

Вариант работы: 6

В разложении волновой aberrации присутствует только астигматизм 3-го

порядка: $W(\rho, \phi) = C22R22(\rho)\cos(2*\phi)$, где $R22(\rho) = \rho^2$

Результаты

Моделирование без aberrаций ($C = 0.000$, Число Штреля: 1.0021)

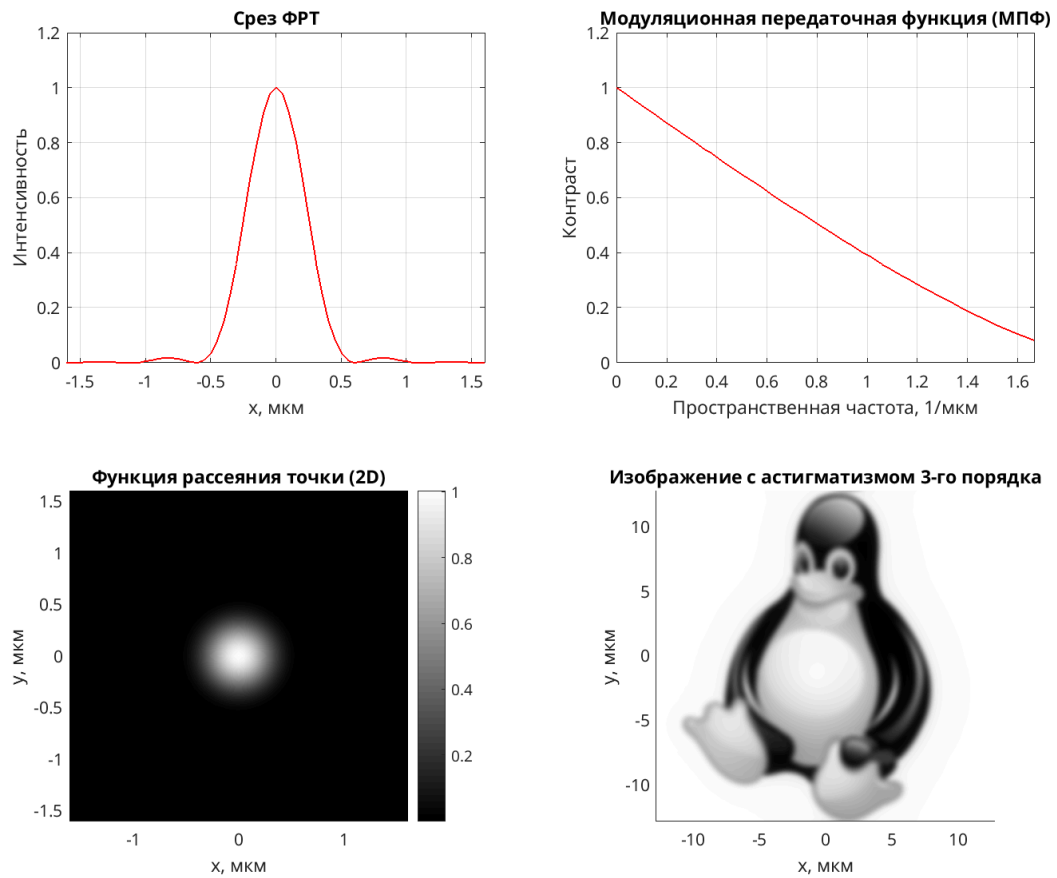


Рисунок 1. Моделирование Моделирование без aberrаций

Моделирование при контрасте 0.2 на частоте $s \approx 0.8$ ($C = 0.013$, Число Штреля: 1.0010)

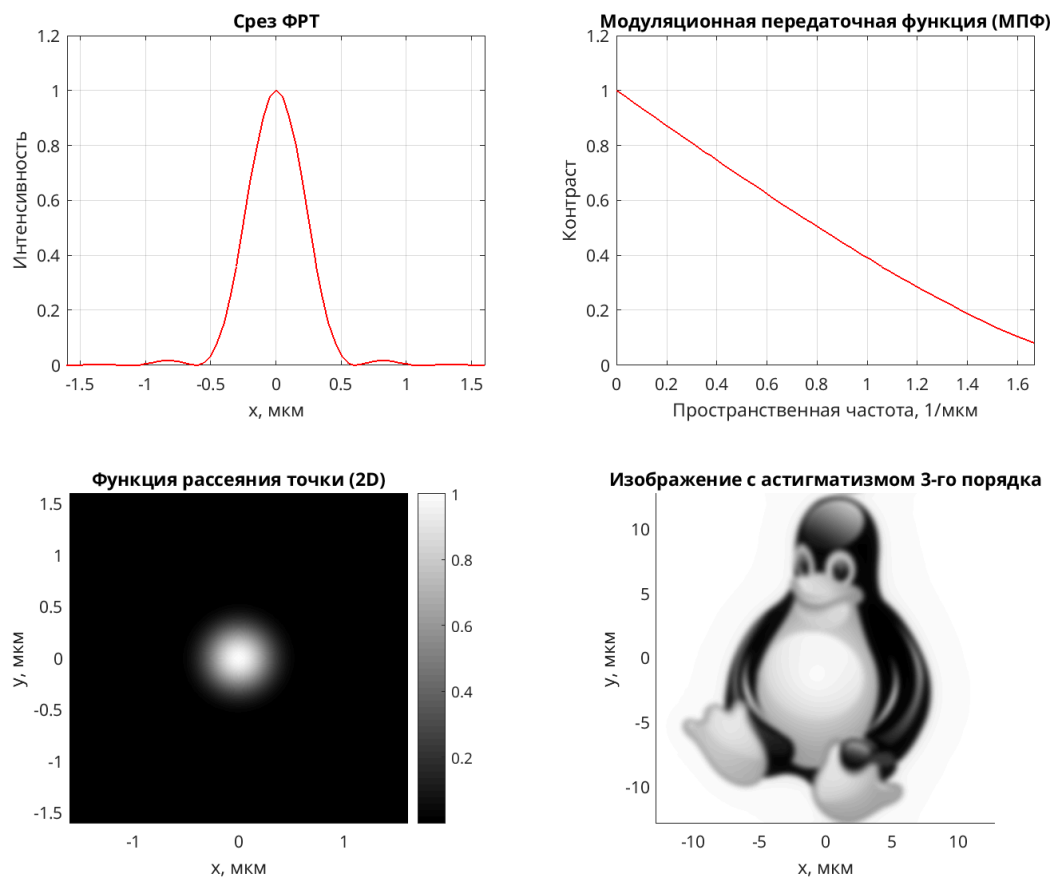


Рисунок 2. Моделирование при контрасте 0.2 на частоте $s \approx 0.8$

Моделирование при контрасте 0.2 на частоте $s \approx 1.0$ ($C = 0.028$, Число Штреля: 0.9968)

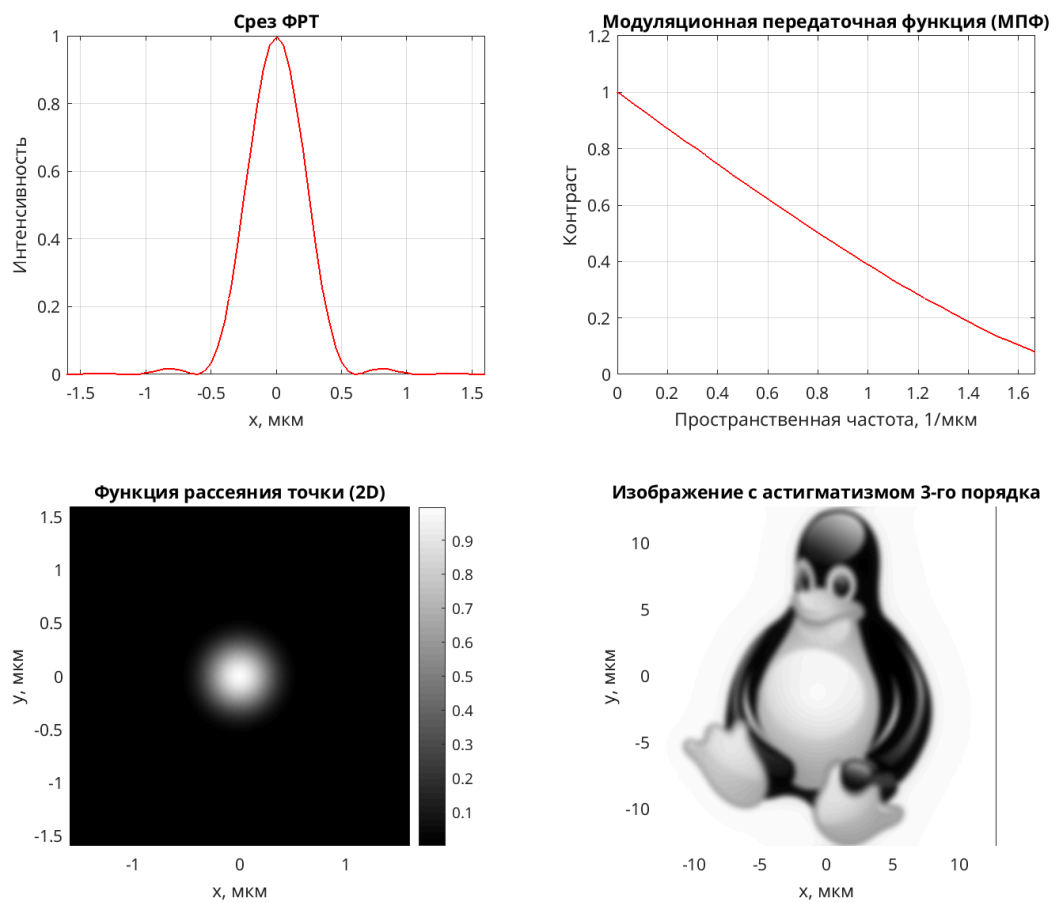


Рисунок 3. Моделирование при контрасте 0.2 на частоте $s \approx 1.0$

Моделирование с числом Штреля ≈ 0.5 ($C = 0.324$, Число Штреля: 0.4973)

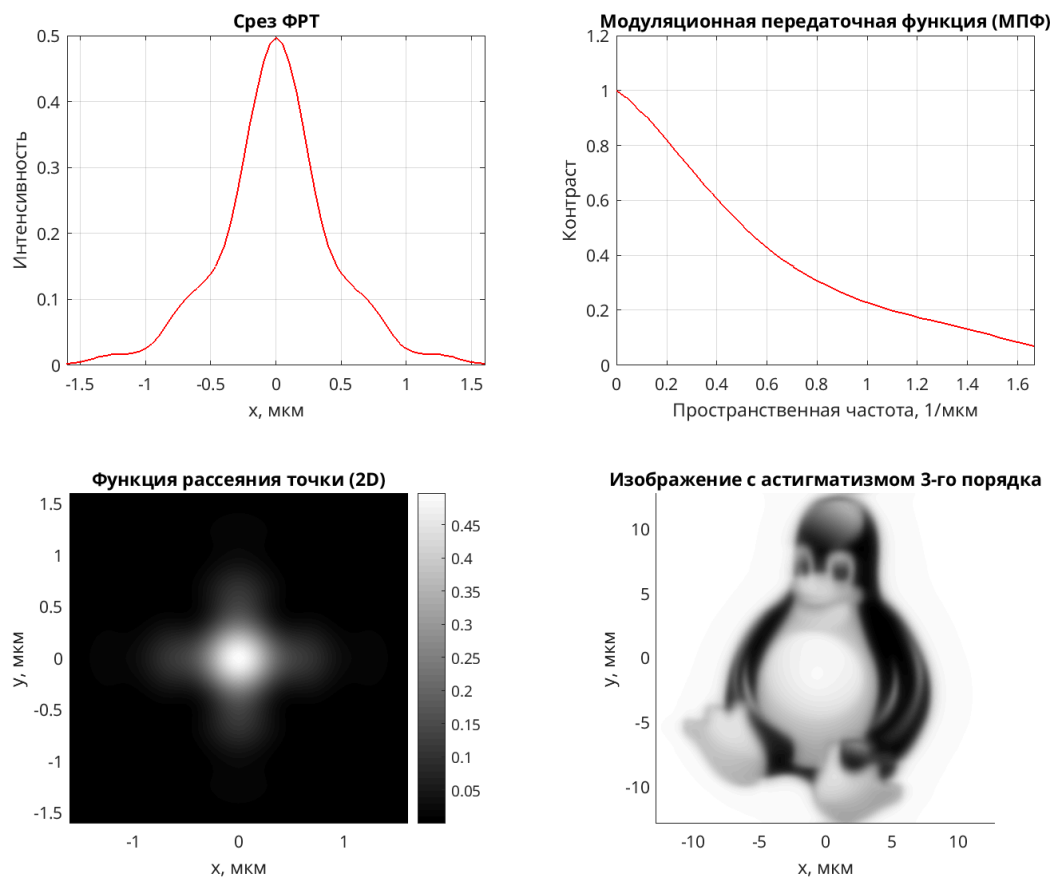


Рисунок 4. Моделирование с числом Штреля ≈ 0.5

Моделирование с числом Штреля ≈ 0.8 ($C = 0.183$, Число Штреля: 0.8029)

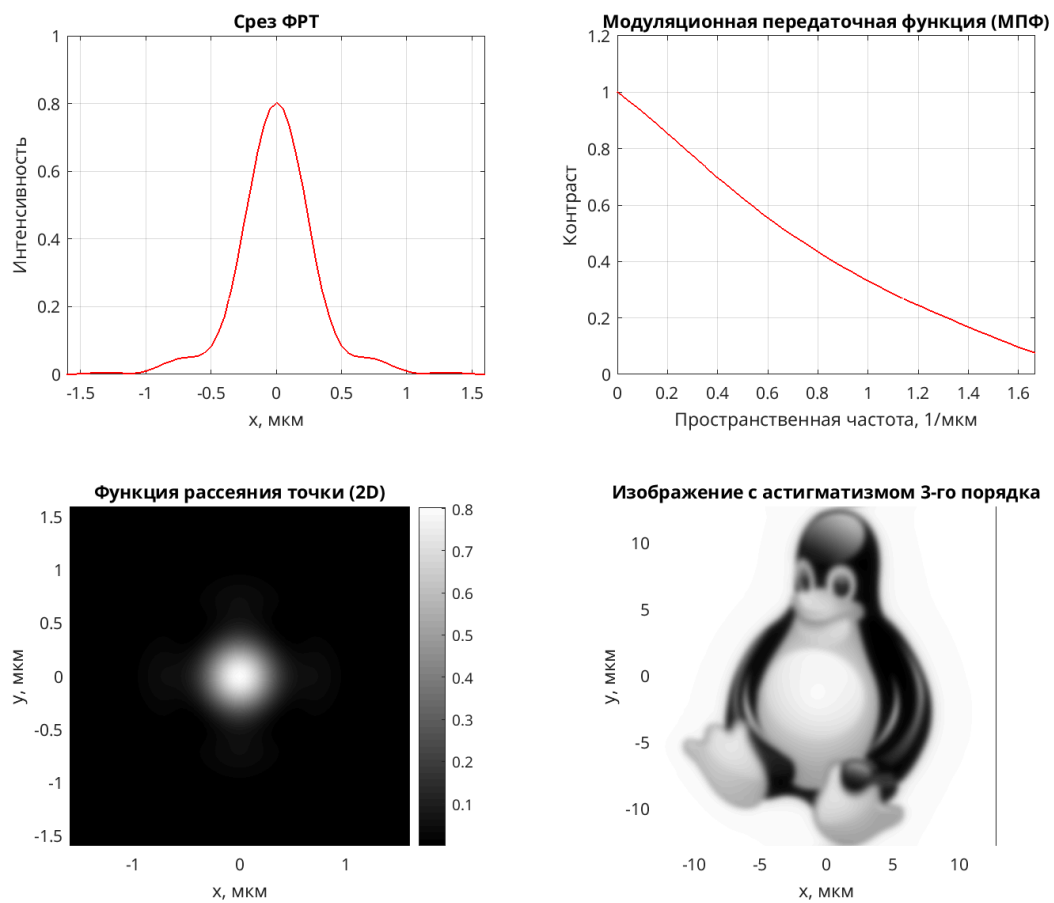


Рисунок 5. Моделирование с числом Штреля ≈ 0.8

Выводы

Этот код моделирует, как астигматизм (абберрация, при которой световые лучи в разных плоскостях фокусируются в разных точках) влияет на качество изображения. Увеличение коэффициента абберрации приводит к:

- Снижению числа Штреля (мера качества оптической системы)
- Уменьшению контраста на высоких пространственных частотах
- Размытию и деформации итогового изображения

Такое моделирование позволяет предсказать качество изображения в реальных оптических системах и определить допустимые значения аббераций.

Приложение

main.m

```
% Код моделирования астигматизма 3-го порядка (вариант б)
clc; clear; close all;
% Загрузка изображения Tux.jpg напрямую
try
    item = double(imresize(rgb2gray(imread('Tux.jpg')), [512, 512]));
catch
    error('Ошибка: Файл Tux.jpg не найден. Убедитесь, что он находится в рабочей директории.');
```

end

```
% Создание директории для сохранения, если её нет
save_dir = 'результаты_моделирования';
if ~exist(save_dir, 'dir')
    mkdir(save_dir);
    disp(['Создана директория "' save_dir '" для сохранения результатов']);
end

% Параметры моделирования
N = 512;          % Размер сетки
A = 0.5;          % Апертура
lambda = 0.5;     % Длина волны, мкм
D_zr = 20;        % Диаметр зрачка
% Вычисление шагов дискретизации
step_zr = D_zr / N;
step_it = 1/(N * step_zr);
step_im = step_it * lambda / A;
% Создание координатных сеток
[im_axis_X, im_axis_Y] = meshgrid(-(N/2)*step_im:step_im:(N/2-1)*step_im, ...
    -(N/2)*step_im:step_im:(N/2-1)*step_im);
pupil = zeros(N);
[p_x, p_y] = meshgrid(-(N/2)*step_zr:step_zr:(N/2-1)*step_zr, ...
    -(N/2)*step_zr:step_zr:(N/2-1)*step_zr);
% Вычисление углов в полярной системе координат
fi = zeros(N);
for i = 1:N
    for j = 1:N
        if (p_y(i,j) == 0)
```

```

    if (p_x(i,j) >= 0)
        fi(i,j) = pi / 2;
    else
        fi(i,j) = -pi / 2;
    end
else
    if (p_y(i,j) >= 0)
        fi(i,j) = atan(p_x(i,j) / p_y(i,j));
    else
        fi(i,j) = pi + atan(p_x(i,j) / p_y(i,j));
    end
end
end
end
end
% Расчет параметров
ro = sqrt(p_x.^2 + p_y.^2);
ro_p_x = ro.*sin(fi);
ro_p_y = ro.*cos(fi);
% Формирование зрачка
for i = 1:N
    for j = 1:N
        if sqrt(ro_p_x(i,j)^2 + ro_p_y(i,j)^2) < 1
            pupil(i,j) = 1;
        end
    end
end
end
% Функция для расчета метрик качества изображения при заданном коэффициенте
C
function [strehl, contrast_s08, contrast_s10] = calculate_metrics(C, pupil, ro, fi, N,
step_zr, step_it)
    % Вычисление аберрации (астигматизм 3-го порядка)
    aberr = exp(2*pi*1i*C*(ro.^2).*cos(2*fi));

    % Применение аберрации к зрачковой функции
    pupil_aberr = pupil .* aberr;

    % Расчет ФРТ
    FRT_ = (step_zr/step_it)*(fftshift(ifft2(fftshift(pupil_aberr))))*N);
    FRT_abs = (abs(FRT_).^2)/(pi^2);

```

```

% Расчет ОПФ
D = (step_it/step_zr)*(fftshift(fft2(fftshift(FRT_abs)))/N);
D_norm = D*pi;
D_abs = abs(D_norm);

% Вычисление числа Штреля
center_idx = N/2 + 1;
strehl = FRT_abs(center_idx, center_idx);

% Вычисление контраста на частотах s=0.8 и s=1.0
% Находим ближайшие индексы
freq_08_idx = round(0.8 * center_idx / 2) + center_idx;
freq_10_idx = round(1.0 * center_idx / 2) + center_idx;

if freq_08_idx > N
    freq_08_idx = N;
end
if freq_10_idx > N
    freq_10_idx = N;
end

contrast_s08 = D_abs(center_idx, freq_08_idx);
contrast_s10 = D_abs(center_idx, freq_10_idx);
end

% Функция поиска оптимального коэффициента C
function C_opt = find_optimal_C(target_type, target_value, pupil, ro, fi, N, step_zr,
step_it)
    % Поиск оптимального коэффициента C для заданного целевого параметра
    C_min = 0.01;
    C_max = 2.0;
    C_steps = 100;
    C_values = linspace(C_min, C_max, C_steps);

    min_diff = Inf;
    C_opt = 0;

    fprintf('Поиск оптимального коэффициента для %s = %.2f\n', target_type,
target_value);
    fprintf('C\t\t%s\t\tПазница\n', target_type);
    fprintf('-----\n');

```

```

for i = 1:length(C_values)
    C = C_values(i);
    [strehl, contrast_s08, contrast_s10] = calculate_metrics(C, pupil, ro, fi, N, step_zr,
step_it);

    switch target_type
        case 'Штрель'
            current_value = strehl;
        case 'Контраст_s08'
            current_value = contrast_s08;
        case 'Контраст_s10'
            current_value = contrast_s10;
    end

    diff = abs(current_value - target_value);

    if mod(i, 10) == 0 || diff < min_diff
        fprintf('%0.3ft%0.4ft\t%0.4fn', C, current_value, diff);
    end

    if diff < min_diff
        min_diff = diff;
        C_opt = C;
    end
end

% Уточнение результата вокруг найденного значения
C_min = max(0, C_opt - 0.05);
C_max = C_opt + 0.05;
C_values = linspace(C_min, C_max, 20);

fprintf('\nУточнение результата:\n');
fprintf('C\t\t%s\t\tРазница\n', target_type);
fprintf('-----\n');

for i = 1:length(C_values)
    C = C_values(i);
    [strehl, contrast_s08, contrast_s10] = calculate_metrics(C, pupil, ro, fi, N, step_zr,
step_it);

```

```

switch target_type
    case 'Штрель'
        current_value = strehl;
    case 'Контраст_s08'
        current_value = contrast_s08;
    case 'Контраст_s10'
        current_value = contrast_s10;
end

diff = abs(current_value - target_value);

fprintf('%0.3f\t%0.4f\t%0.4f\n', C, current_value, diff);

if diff < min_diff
    min_diff = diff;
    C_opt = C;
end
end

fprintf('\nНайденный оптимальный коэффициент C = %0.3f\n\n', C_opt);
end

% Функция для визуализации результатов моделирования
function visualize_results(C, pupil, ro, fi, item, im_axis_X, im_axis_Y, N, step_zr, step_it,
step_im, p_x, title_text, save_dir)
    % Вычисление аберрации (астигматизм 3-го порядка)
    aberr = exp(2*pi*1i*C*(ro.^2).*cos(2*fi));

    % Применение аберрации к зрачковой функции
    pupil_aberr = pupil .* aberr;

    % Некогерентное изображение
    fft_intens = 1/N * (fftshift(fft2(fftshift(abs(item)))));
    fft_func_rasp = N * fftshift(fft2(fftshift(abs(fftshift(ifft2(fftshift(pupil_aberr))).^2)));
    func_rasp_img = fft_intens .* fft_func_rasp;
    intens_rasp_img = N * (fftshift(ifft2(fftshift(func_rasp_img))));
    intens_rasp_img = flipud(intens_rasp_img);

    % Расчет ФРТ и ФПМ
    FRT_ = (step_zr/step_it)*(fftshift(ifft2(fftshift(pupil_aberr)))*N);

```

```

FRT_abs = (abs(FRT_).^2)/(pi^2);
D = (step_it/step_zr)*(fftshift(fft2(fftshift(FRT_abs)))/N);
D_norm = D*pi;
D_abs = abs(D_norm);

% Вывод числа Штреля
center_idx = N/2 + 1;
strehl_value = FRT_abs(center_idx, center_idx);

% Вычисление контраста на частотах s=0.8 и s=1.0
freq_08_idx = round(0.8 * center_idx / 2) + center_idx;
freq_10_idx = round(1.0 * center_idx / 2) + center_idx;

if freq_08_idx > N
    freq_08_idx = N;
end
if freq_10_idx > N
    freq_10_idx = N;
end

contrast_s08 = D_abs(center_idx, freq_08_idx);
contrast_s10 = D_abs(center_idx, freq_10_idx);

fprintf('Параметры для C = %.3f:\n', C);
fprintf('- Число Штреля: %.4f\n', strehl_value);
fprintf('- Контраст при s=0.8: %.4f\n', contrast_s08);
fprintf('- Контраст при s=1.0: %.4f\n\n', contrast_s10);

% Подготовка к визуализации
x_max = step_im*N/2;
p_max = step_zr*N/2;

% Создание фигуры
figure('Position', [200, 200, 1000, 800]);
sgtitle([title_text sprintf(' (C = %.3f, Число Штреля: %.4f)', C, strehl_value)],
'FontSize', 14);

% Срез ФРТ
subplot(2,2,1)
plot(im_axis_X(center_idx,:), FRT_abs(:, center_idx), 'Color', 'r', 'LineWidth', 1.3)

```

```

xlim([-x_max/8, x_max/8])
grid on
title('Срез ФРТ')
xlabel('x, мкм');
ylabel('Интенсивность');

% ФПМ/МПФ
subplot(2,2,2)
plot(p_x(center_idx,:), D_abs(center_idx,:), 'Color', 'r', 'LineWidth', 1.3)
xlim([0, p_max/6])
xticks(0:0.2:p_max/6)
grid on
title('Модуляционная передаточная функция (МПФ)')
xlabel('Пространственная частота, 1/мкм');
ylabel('Контраст');

% Полноценная ФРТ (2D)
subplot(2,2,3)
pcolor(im_axis_X, im_axis_Y, FRT_abs)
colormap(hot)
axis equal tight
shading interp
xlim([-x_max/8, x_max/8])
ylim([-x_max/8, x_max/8])
title('Функция рассеяния точки (2D)')
xlabel('x, мкм');
ylabel('y, мкм');
colorbar;

% Некогерентное изображение
subplot(2,2,4)
pcolor(im_axis_X, im_axis_Y, intens_rasp_img)
colormap(gray)
axis equal tight
shading interp
title('Изображение с астигматизмом 3-го порядка')
xlabel('x, мкм');
ylabel('y, мкм');

% Формирование имени файла без пробелов и специальных символов

```

```

filename = strrep(title_text, ' ', '_');
filename = strrep(filename, '~', '');
filename = strrep(filename, '.', '_');

% Сохранение изображения
save_path = fullfile(save_dir, [filename '_C' num2str(C) '.png']);
saveas(gcf, save_path);
fprintf('Сохранено изображение: %s\n', save_path);
end

% Поиск оптимальных коэффициентов
disp('----- Поиск оптимальных коэффициентов -----');
C_strehl_08 = find_optimal_C('Штрель', 0.8, pupil, ro, fi, N, step_zr, step_it);
C_strehl_05 = find_optimal_C('Штрель', 0.5, pupil, ro, fi, N, step_zr, step_it);
C_contrast_s10 = find_optimal_C('Контраст_s10', 0.2, pupil, ro, fi, N, step_zr, step_it);
C_contrast_s08 = find_optimal_C('Контраст_s08', 0.2, pupil, ro, fi, N, step_zr, step_it);
% Отображение найденных коэффициентов
disp('----- Оптимальные коэффициенты -----');
fprintf('Для числа Штреля  $\approx 0.8$ : C = %.3f\n', C_strehl_08);
fprintf('Для числа Штреля  $\approx 0.5$ : C = %.3f\n', C_strehl_05);
fprintf('Для контраста 0.2 при s  $\approx 1.0$ : C = %.3f\n', C_contrast_s10);
fprintf('Для контраста 0.2 при s  $\approx 0.8$ : C = %.3f\n', C_contrast_s08);
% Визуализация результатов для всех случаев
disp('----- Визуализация результатов -----');
% Случай 1: Без аберраций (C = 0)
visualize_results(0, pupil, ro, fi, item, im_axis_X, im_axis_Y, N, step_zr, step_it, step_im,
p_x, 'Моделирование без аберраций', save_dir);
% Случай 2: Число Штреля  $\approx 0.8$ 
visualize_results(C_strehl_08, pupil, ro, fi, item, im_axis_X, im_axis_Y, N, step_zr, step_it,
step_im, p_x, 'Моделирование с числом Штреля  $\approx 0.8$ ', save_dir);
% Случай 3: Число Штреля  $\approx 0.5$ 
visualize_results(C_strehl_05, pupil, ro, fi, item, im_axis_X, im_axis_Y, N, step_zr, step_it,
step_im, p_x, 'Моделирование с числом Штреля  $\approx 0.5$ ', save_dir);
% Случай 4: Контраст 0.2 при частоте s  $\approx 1.0$ 
visualize_results(C_contrast_s10, pupil, ro, fi, item, im_axis_X, im_axis_Y, N, step_zr,
step_it, step_im, p_x, 'Моделирование при контрасте 0.2 на частоте s  $\approx 1.0$ ', save_dir);
% Случай 5: Контраст 0.2 при частоте s  $\approx 0.8$ 
visualize_results(C_contrast_s08, pupil, ro, fi, item, im_axis_X, im_axis_Y, N, step_zr,
step_it, step_im, p_x, 'Моделирование при контрасте 0.2 на частоте s  $\approx 0.8$ ', save_dir);
disp('Моделирование завершено. Все результаты сохранены в папке:');
disp(fullfile(pwd, save_dir));

```