מבוא לאופטיקה מודרנית ואלקטרואופטיקה

פרויקט גמר - חלק 2

סמסטר א' – תשפ"ד

18.03.2024

מגיש: עילי זיידל
ת.ז. 326708674

עילי זיידל
326708674

<u>מבוא לאופטיקה מודרנית ואלקטרואופטיקה</u>

<u>פרויקט גמר – חלק 2</u>

<u>מגיש: עילי זיידל</u>

<u>תאריך: 18.03.2024</u>

<u>סעיף 1 – חימום</u>

א. הגדירו פונקציית $circ$ במטלב.

נגדיר את פונקציית $circ$ עבור רדיוס R בצורה הבאה:

$$circ(r,R) = \begin{cases} 1\,, & \frac{r}{R} \le 1 \\ 0\,, & \frac{r}{R} > 1 \end{cases}$$

ב. ייצרו דגימות של המעגל ושמרו אותה במטריצה דו-ממדית.

$$R = (mod(674,5)+1)\cdot 10^{-2} = (4+1)\cdot 10^{-2} = 0.05m$$

$$L = 0.2m$$

$$N = 200$$

כעת נקבע את Δx לפי הנתונים:

$$\Delta x = \frac{L}{N} = 1\cdot 10^{-3}m$$

ניצור וקטור ערכי x ווקטור ערכי y:

$$x = -\frac{L}{2}:\Delta x:\frac{L}{2}-\Delta x$$

$$y = -\frac{L}{2}:\Delta y:\frac{L}{2}-\Delta y$$

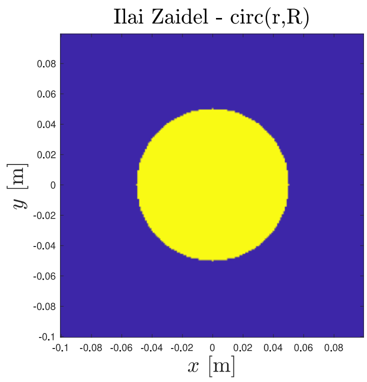
כעת, ניצור מטריצה $Circle$ מגודל $N\times N$ ולכל $x(i)$ ו-$y(j)$ נחשב:

$$r_{ij} = \sqrt{x(i)^2+y(j)^2}$$
$$circle_{ij} = circ(r_{ij},R)$$

עילי זיידל
326708674

ג. הציגו את התוצאה כתמונה.

נשרטט בעזרת הפונקציה $imagesc$:



אכן התקבל מעגל ברדיוס $R = 0.05m$.

ד. חשבו את ההתמרה של המטריצה והציגו את הערך המוחלט ב- $imagesc$ וב- $surf$.

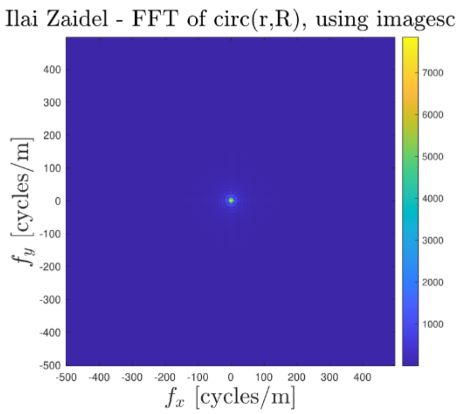
על מנת לחשב את ההתמרה של המטריצה נשתמש בפונקציה fft2 המקבלת את המטריצה ומחזירה את התמרת הפורייה של המטריצה ממימד 2 (לשתי משתנים). ניקח את הערך המוחלט של המטריצה החדשה, ונבצע fftshift על מנת שהנקודה $(f_x, f_y) = (0,0)$ תהיה במרכז המטריצה.

את טווח התדרים נגדיר באופן הבא:

$$f_x = -\frac{1}{2\Delta x} : \frac{1}{L} : \frac{1}{2\Delta x} - \frac{1}{L}$$

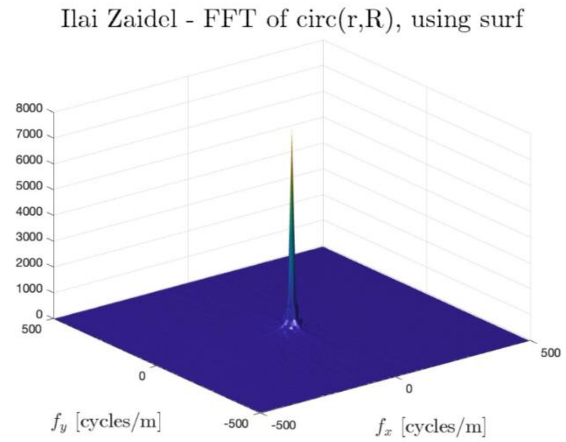
$$f_y = -\frac{1}{2\Delta y} : \frac{1}{L} : \frac{1}{2\Delta y} - \frac{1}{L}$$

נשרטט בעזרת $imagesc$:



עילי זיידל
326708674

כעת נשרטט בעזרת surf :



עילי זיידל
326708674

סעיף 2 – תבנית פראונהופר

בסעיף זה נחשב ונציג את פילוג העוצמה של תבנית פראונהופר של מפתח מעגלי, בהנחה שפוגע גל מישורי בעל אמפליטודת יחידה.

נחשב את אורך הגל:

$$\lambda = round\left(400 + \frac{674}{999} \cdot 900\right) = round(1007.2) = 1007nm$$

א. ציינו מה התנאי למרחק התצפית לקבלת תבנית פראונהופר ובחרו במרחק שהוא 5 פעמים יותר גדול:

ראינו שעל מנת לקבל צורה של **התמרת פורייה**, נרצה להשתמש בקירובים שיהפכו את הביטוי של השדה הכולל בקירוב פרנל לצורה הרצויה:

$$E(x,y,z) = \frac{e^{-ikz}}{-\lambda zi} \iint_{-\infty}^{\infty} E(x',y',0) e^{-\frac{ik_0}{2z}\left((x-x')^2+(y-y')^2\right)} \, dx'dy' =$$

$$= \frac{e^{-ikz}}{-\lambda zi} e^{\frac{-ik}{2z_0}(x^2+y^2)} \iint_{-\infty}^{\infty} E(x',y',0) e^{-\frac{ik_0}{2z}(x'^2-2xx'+y'^2-2yy')} \, dx'dy' =$$

$$= \frac{e^{-ikz}}{-\lambda zi} e^{\frac{-ik}{2z_0}(x^2+y^2)} \iint_{-\infty}^{\infty} E(x',y',0) e^{-\frac{i\pi}{\lambda z}(x'^2+y'^2)} e^{+\frac{2\pi i}{\lambda z}(xx'+yy')} \, dx'dy' =$$

$$= \frac{e^{-ikz}}{-\lambda zi} e^{\frac{-ik}{2z_0}(x^2+y^2)} \iint_{-\infty}^{\infty} E(x',y',0) e^{-\frac{i\pi}{\lambda z}(x'^2+y'^2)} e^{+2\pi i\left(\frac{x}{\lambda z}x'+\frac{y}{\lambda z}y'\right)} \, dx'dy' =$$

$$= \frac{e^{-ikz}}{-\lambda zi} e^{\frac{-ik}{2z_0}(x^2+y^2)} \iint_{-\infty}^{\infty} E(x',y',0) e^{-\frac{i\pi}{\lambda z}(x'^2+y'^2)} e^{+2\pi i(f_x x'+f_y y')} \, dx'dy' =$$

הערה: חישובים אלו נכונים עבור גל שנע **מימין לשמאל**.

כעת, נרצה להגיע לתבנית של התמרת פורייה (הפוכה או לא הפוכה – תלוי בכיוון התקדמות הגל) ולכן נרצה להזניח את האקספוננט:

$$e^{-\frac{i\pi}{\lambda z}(x'^2+y'^2)}$$

על מנת לעשות זאת, נדרוש את הקירוב הבא:

$$\frac{\pi}{\lambda z}(x'^2+y'^2) \ll \pi$$

נשים לב שהשקופית היא מעגל בעל רדיוס R ולכן נדרוש את הקירוב:

$$\frac{R^2}{\lambda z} \ll 1 \Rightarrow z \gg \frac{R^2}{\lambda} = \frac{0.05^2}{1007 \cdot 10^{-9}} = 2482.62m$$

נבחר במרחק הגדול פי 5, כלומר נבחר:

$$z_0 = 5 \cdot \frac{R^2}{\lambda} = 5 \cdot 2482.62m = 12413.108m = 12.413km$$

עילי זיידל
326708674

ב. רשמו את הביטוי האנליטי הסופי לפילוג העוצמה שאמורה להתקבל במרחק z_0.

נרצה למצוא את $E(x,y,z_0)$. כפי שראינו בסעיף הקודם (כעת הגל מתקדם **משמאל לימין**), השדה הכולל בקירוב פראונהופר מקיים את המשוואה הבאה:

$$E(x,y,z)=\frac{e^{ikz}}{\lambda zi}e^{\frac{ik}{2z}(x^2+y^2)}\mathcal{F}\{E(x',y',0)\}|_{f_x=\frac{x}{\lambda z},f_y=\frac{y}{\lambda z}}$$

נרצה לנחשב את התמרת הפורייה של השדה במישור השקופית. השקופית היא מעגל ברדיוס R, ולכן השדה במישור השקופית הינו:

$$E(x,y,0)=g(x,y)=circ\left(\frac{\sqrt{x^2+y^2}}{R}\right)$$

וההתמרה היא:

$$G(f_x,f_y)=\mathcal{F}\{g(x,y)\}=R\frac{J_1\left(2\pi R\sqrt{f_x^2+f_y^2}\right)}{\sqrt{f_x^2+f_y^2}}$$

אם נגדיר:

$$Jinc(x)\equiv\frac{J_1(2\pi x)}{x}$$

נקבל:

$$G(f_x,f_y)=R^2Jinc\left(R\sqrt{f_x^2+f_y^2}\right)$$

ולסיכום:

$$E(x,y,z_0)=\frac{e^{ikz_0}}{\lambda z_0 i}e^{\frac{ik}{2z_0}(x^2+y^2)}\mathcal{F}\{E(x',y',0)\}|_{f_x=\frac{x}{\lambda z_0},f_y=\frac{y}{\lambda z_0}}=$$
$$=\frac{e^{ikz_0}}{\lambda z_0 i}e^{\frac{ik}{2z_0}(x^2+y^2)}R^2Jinc\left(R\sqrt{f_x^2+f_y^2}\right)|_{f_x=\frac{x}{\lambda z},f_y=\frac{y}{\lambda z}}=$$
$$=\frac{e^{ikz_0}}{\lambda z_0 i}e^{\frac{ik}{2z_0}(x^2+y^2)}R^2Jinc\left(R\sqrt{\left(\frac{x}{\lambda z_0}\right)^2+\left(\frac{y}{\lambda z_0}\right)^2}\right)$$

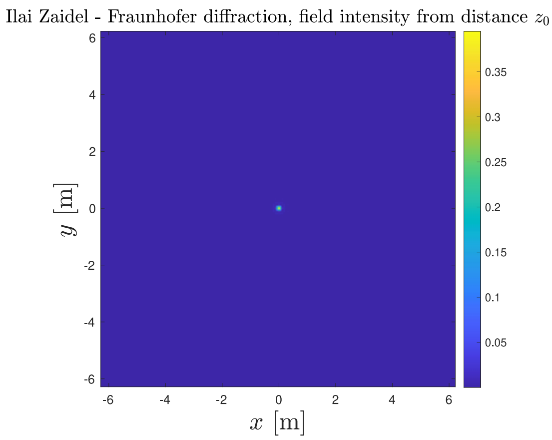
כעת נרצה להציג את הביטוי של **עוצמת השדה**:

$$I(x,y,z_0)=|E(x,y,z_0)|^2=\frac{R^4}{(\lambda z_0)^2}\left|Jinc\left(R\sqrt{\left(\frac{x}{\lambda z_0}\right)^2+\left(\frac{y}{\lambda z_0}\right)^2}\right)\right|^2$$

עילי זיידל
326708674

ג. הציגו את הביטוי האנליטי שחישבתם.

נשרטט את הגרף של העוצמה בדומה לסעיפים הקודמים, בעזרת הפונקציה $imagesc$. נקבל את הגרף הבא:



ניתן לראות שקיבלנו תוצאה דומה לגרף בסעיף 1.

ד. הציגו חתך חד-ממדי של הפילוג וחשבו את ה-$FWHM$. ציינו במפורש איך ה-$FWHM$ מושפע ממרחק התצפית, הרדיוס ואורך גל.

נרצה לשרטט חתך של עוצמת השדה ולחשב את ה-$FWHM$. נשים לב שעבור מישור $y = 0$, יש לנו רק $N =$ 200 דגימות בציר ה-x. אם נרצה לחשב את ה-$FWHM$, לא נוכל למצוא שתי דגימות בציר ה-x הנמצאות בדיוק בנקודת Half Maximum. לכן, נצטרך לבצע **אינטרפולציה**, כלומר להגדיל את תדר הדגימה מבלי לשנות את המידע הקיים. נשתמש בפונקציה $interpn$ המקבלת את ווקטור ציר ה-x ווקטור העוצמה בנקודה $y = 0$, ומחזירה את הווקטורים לאחר אינטרפולציה, לפי כמות דגימות לבחירתנו. על מנת לבצע את פעולה זו ולחשב את ה-$FWHM$ נכתוב את הפונקציה $interp\_FWHM(intensity, x)$ המחזירה את ווקטור העוצמה (במישור $y = 0$) ווקטור x לאחר אינטרפולציה, ומחשבת את ה-$FWHM$.

על מנת לחשב את ה-$FWHM$, תחילה נמצא את ה-$width$ על ידי:

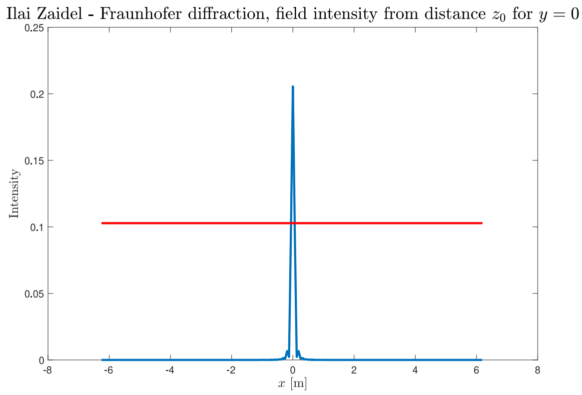
$$h = \max(I(x))$$

כאשר $I(x) = Intensity$.

בעזרת המטלב, נמצא את הנקודות x_1 ו-x_2 עבורן $I(x_1) = I(x_2) = \frac{h}{2}$. לבסוף,

$$FWHM = x_2 - x_1$$

נשרטט את החתך עבור $y = 0$. נוסיף ישר בגובה $\frac{h}{2}$ על מנת לראות את נקודות החיתוך שלו עם עוצמת השדה. ה-$FWHM$ הן נקודות החיתוך של הישר עם גרף הפונקציה.



נחשב את ה-$FWHM$ בעזרת הפונקציה $interp\_FWHM(intensity, x)$. נקבל:

$$FWHM = 0.119.2m = 119.2mm$$

כעת, נרצה לראות כיצד מושפע ה-$FWHM$ מכל אחד מהפרמטרים.

<u>השפעת רדיוס המפתח R על ה-$FWHM$:</u>

נריץ את הקוד עבור:

$$\lambda = 1007nm, \qquad z_0 = 12413.10m$$
$$\tilde{R} = 0.01m$$

נקבל:

$$FWHM_{smallerR} = 0.642 = 642mm$$

כלומר קיבלנו שעבור **רדיוס R קטן יותר**, ה-$FWHM$ **גדל**. נשים לב שאם נקטין את הרדיוס התמונה תהא יותר חדה ונקבל אור בעוצמה גדולה יותר, לכן ה-$FWHM$ גדל. יש ביניהם יחס הפוך.

<u>השפעת מרחק התצפית z_0 על ה-$FWHM$:</u>

נריץ את הקוד עבור:

$$\lambda = 1007nm, \qquad R = 0.05m$$
$$\tilde{z_0} = z_0/100$$

כאשר z_0 הוא מרחק התצפית המקורי.

נקבל:

$$FWHM_{smallerZ_0} = 0.001 = 1mm$$

כלומר קיבלנו שעבור מרחק תצפית z_0 **קטן יותר**, ה-$FWHM$ **קטן**. קשר זה הגיוני מכיוון שאם מגדילים את z_0 התמונה יותר נמרחת כי האור התרחק יותר, ולכן ה-$FWHM$ גדל יחד איתו. יש ביניהם קשר ישר של הקטנה והגדלה.

השפעת אורך הגל λ על ה-$FWHM$:

נריץ את הקוד עבור:

$$z_0 = 12413.10m, \qquad R = 0.05m$$
$$\tilde{\lambda} = \frac{\lambda}{2}$$

כאשר λ הוא אורך הגל המקורי.

נקבל:

$$FWHM_{smallerR} = 0.058 = 58mm$$

כלומר קיבלנו שעבור **אורך גל λ קטן יותר**, ה-$FWHM$ **קטן**. נשים לב שנקודות ההתאבכות רחוקות יותר כשאורך הגל גדל, ולכן נקבל תמונה "מרווחה" יותר, ומכאן ש-$FWHM$ גדל עם אורך הגל. כלומר הם גדלים וקטנים יחד.

עילי זיידל
326708674

סעיף 3 – תבנית פרנל

בשאלה זו, נכתוב פונקציה המחשבת את תבנית העקיפה לפי קירוב פרנל.

א. הגדירו את הפונקציות $F(x)$ **ו-**$iF(x)$.

נגדיר את הפונקציות הבאות:

```
function Fx = F(x)
    Fx = fftshift(fft2(ifftshift(x)));
end

function iFx = iF(x)
    iFx = fftshift(ifft2(ifftshift(x)));
end
```

הפונקציה fftshift עושה הזזה בציר התדר כך שהנקודה $(f_x, f_y) = (0,0)$ תהיה במרכז ציר f_x וציר f_y, כלומר במרכז הגרף/המטריצה.

הפונקציה ifftshift מחזיר את הנקודה $(f_x, f_y) = (0,0)$ להיות **במיקום המקורי** של ההתמרה. כלומר, עושה את הפעולה ההפוכה מהפונקציה fftshift.

ב. כתבו את הפונקציה propFresnel המחשבת את השדה במרחק z **מהשקופית, לפי קירוב פרנל.**

ניזכר שהנוסחה לקירוב פרנל היא:

$$E(x,y,z) = \frac{e^{ikz}}{\lambda z i} e^{\frac{ik}{2z}(x^2+y^2)} \mathcal{F}\left\{E(x',y',0)e^{\frac{ik}{2z}(x'^2+y'^2)}\right\}\Big|_{f_x=\frac{x}{\lambda z}, f_y=\frac{y}{\lambda z}}$$

נחשב את השדה במרחק z, כאשר $u_1 = E(x',y',0)$. נשים לב ש-x', y' הם הצירים במישור השקופית, כלומר:

$$x' = -\frac{L}{2} : \Delta x : \frac{L}{2} - \Delta x, \qquad y' = -\frac{L}{2} : \Delta y : \frac{L}{2} - \Delta y$$

כמו בסעיף 1.

במישור הצפייה במרחק z מתקיים:

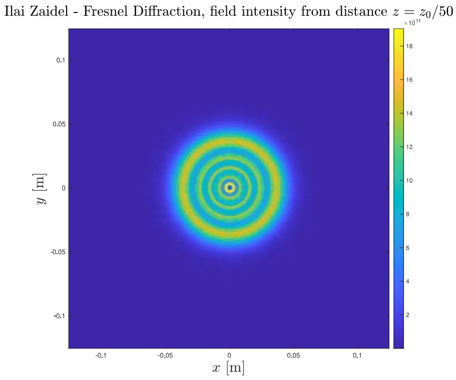
$$f_x = -\frac{1}{2\Delta x} : \frac{1}{L} : \frac{1}{2\Delta x} - \frac{1}{L}, \qquad f_y = -\frac{1}{2\Delta y} : \frac{1}{L} : \frac{1}{2\Delta y} - \frac{1}{L}$$

והצירים x, y מחושבים על ידי: $x = f_x \lambda z$, $y = f_y \lambda z$.

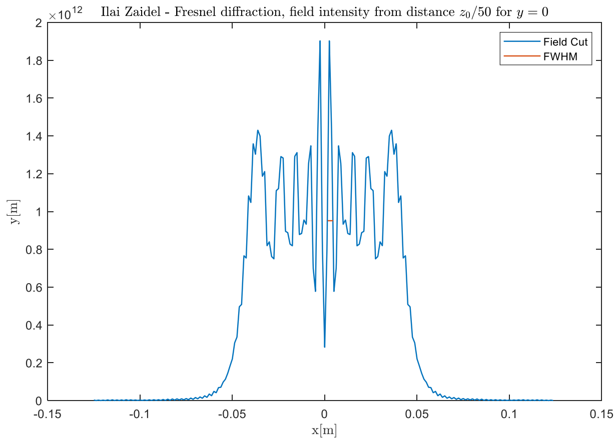
הפונקציה המלא מופיעה בנספחים.

ג. חשבו והציגו את פילוג העוצמה של תבנית פרנל המתקבל במרחק $z_1 = \frac{z_0}{50}$. **חשבו את ה-**$FWHM$.

נפעיל את הפונקציה שכתבנו בסעיף ב. ממנה נקבל את השדה הנמדד במרחק $\frac{z_0}{50}$ מהשקופית. נשרטט את התפלגות עוצמת השדה ונקבל את הגרף הבא:



על מנת להבין היטב את התוצאה שהתקבלה, נשרטט חתך. בדומה לסעיפים הקודמים, נמצא את ערכי העוצמה במישור $y = 0$, ונעשה אינטרפולציה לערכי העוצמה ולערכי ציר ה-x על מנת להקל בתהליך חישוב ה-$FWHM$. נסמן את ה-$FWHM$ ונקבל את החתך הבא:

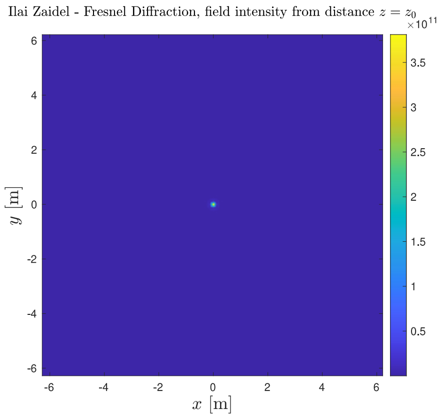


נחשב את ה-$FWHM$ ונקבל:

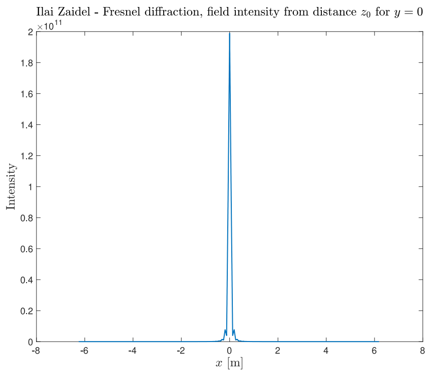
$$FWHM = 0.00290 = 29mm$$

ד. חשבו והציגו את פילוג העוצמה של תבנית פרנל המתקבלת במרחק $z_1 = z_0$. חשבו את ה-$FWHM$. השוו עם שאלה 2 סעיף ד.

כעת נציג את הגרפים עבור מרחק z_0. נקבל את הגרף הבא:



קיבלנו בדיוק את אותו גרף שקיבלנו עבור קירוב פראונהופר. נציג את החתך:



ניתן לראות שיצא אותו חתך כמו בקירוב פראונהופר.

נחשב את ה-$FWHM$ ונקבל:

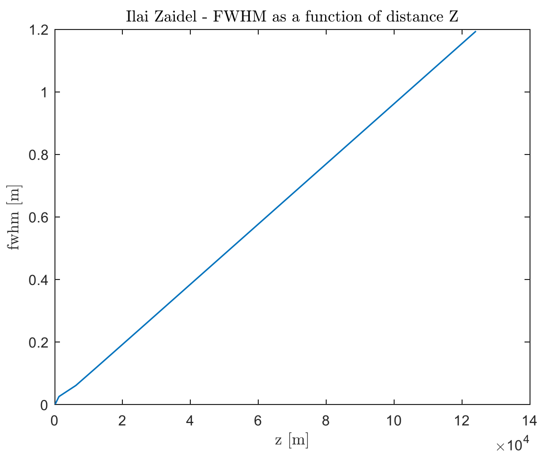
$$FWHM = 0.1202 = 120.2mm$$

ניזכר שעבור קירוב פראונהופר קיבלנו $FWHM = \ 119.2mm$. סיבה להבדל הקטן יכולה להיות כמות הדגימות שלקחנו באינטרפולציה. ככל שניקח יותר דגימות, נקבל תוצאת $FWHM$ יותר מדויקת.

ניתן לראות שקיבלנו תוצאות מאוד דומות עבור קירוב פרנל וקירוב פראונהופר. ניתן להסיק מכך שקירוב פראונהופר מהווה קירוב **מספיק טוב** עבור שדה רחוק, שכן קיבלנו אותן תוצאות עבור קירוב פרנל, שניעזר בפחות קירובים מקירוב פראונהופר.

ה. הציגו את פילוג העוצמה עבור: $0.01z_0, 0.1z_0, 0.5z_0, z_0, 2z_0, 10z_0$. הציגו את החתך עבור כל אחד. הציגו את ה- $FWHM$ כתלות במרחק.

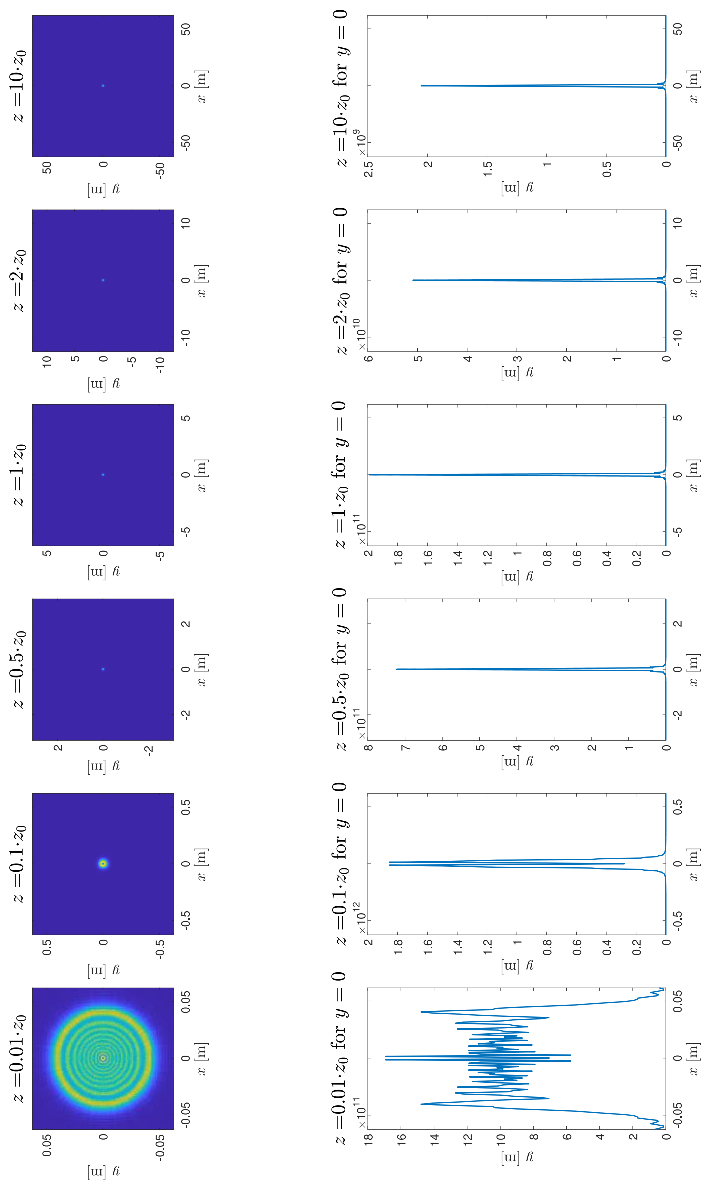
תחילה, נציג את ה-$FWHM$ כתלות במרחק:



ניתן לראות שאכן ה-$FWHM$ **גדל** עם הגדלת המרחק z. בדומה לסעיף 2, ראינו ש שאם מגדילים את z_0 התמונה יותר "נמרחת" כי האור התרחק יותר, ולכן ה-$FWHM$ גדל יחד איתו. יש ביניהם קשר ישר של הקטנה והגדלה.

עילי זיידל
326708674

נציג את הגרף של פילוגי העוצמה למרחקים השונים (נא לסובב את המסך) :



ניתן לראות שאכן ככל שנתקרב לשקופית, כלומר נקטין את z_0, נראה את ההתאבכות בצורה יותר ברורה.

עילי זיידל
326708674

נספחים – קוד מטלב

פונקציית propFresnel:

```
function [u2, x_prop] = propFresnel(u1,L,lambda,z)

% Number of samples
N = length(u1);
dX = L/N;

% x-axis at source plane:
x_tag =  -L/2:dX:(L/2)-dX;


[X_tag, Y_tag] = meshgrid(x_tag);
k = 2*pi/lambda;

product = u1.*exp(1i*k*(X_tag.^2+Y_tag.^2)/(2*z));
fourier_product = F(product);

% Frequency axis:
fx = -1/(2*dX):1/L:1/(2*dX)-1/L;

% x-axis at observation plane:
x = fx * z * lambda;
[X , Y] = meshgrid(x);

x_prop = x;

% Total observation plane field:
u2=exp(1i*k*z)*exp(1i*k*(X.^2+Y.^2)/(2*z)).*fourier_product/(1i*lambda*z);

end
```

פונקציית circ:

```
function z = circ(r, R)

    z=0;
    if r <= R
        z = 1;
    end
end
```

```
% Ilai Zaidel
close all
clc
clear


% ---------Q1----------

%------1.B------
% Creating samples from the circle:

R = 0.05;
L = 0.2;
N = 200;

dX = L/N;
dY = L/N;

% x_n and y_n values:
x_n = -L/2:dX:(L/2)-dX;
y_n = -L/2:dY:(L/2)-dY;
y_n = y_n.';

% Initial value of circle:
circle = zeros(200,200);

% Calculating samples:
for i = 1:200
    for j = 1:200
        r_ij = (x_n(i)^2+y_n(j)^2)^(1/2);
        circle(i,j) = circ(r_ij, R);
    end
end

%------1.C------
% Plotting circle:
figure
imagesc(x_n,y_n, circle);
axis image
axis xy
t = 'Ilai Zaidel - circ(r,R)';
title(t,'interpreter','latex')
xlabel('x[m]','interpreter','latex')
ylabel('y[m]','interpreter','latex')


%------1.D------

% Calculating FFT of circle:
% Frequencies values:
fx = -1/(2*dX):1/L:1/(2*dX)-1/L;
fy = -1/(2*dX):1/L:1/(2*dX)-1/L;

% Calculating FFT:
% We are using fft2 to calculate a 2D FFT;
% We are using fftshift in order to shift the zero-frequency component to
```

```
% the center of the array
circle_fft = fftshift(abs(fft2(circle)));

% Plotting using imagesc:
figure
imagesc(fx, fy, circle_fft);
axis image
axis xy
colorbar
t = 'Ilai Zaidel - FFT of circ(r,R), using imagesc';
title(t,'interpreter','latex');

xlabel('$f_x$[cycles/m]','interpreter','latex')
ylabel('$f_y$[cycles/m]','interpreter','latex')

% Plotting using surf:

figure
surf(fx, fy, circle_fft);
axis xy
camlight left;
lighting phong;
shading interp;
t = 'Ilai Zaidel - FFT of circ(r,R), using surf';
title(t,'interpreter','latex')
xlabel('$f_x$[cycles/m]','interpreter','latex')
ylabel('$f_y$[cycles/m]','interpreter','latex')

% ---------Q2----------

%------2.C------
lambda = 1007e-9;
z0 = (5*R^2/lambda);

% Calculating x axis
x = fx*lambda*z0;
[X, Y] = meshgrid(x,x);

r = ((X.^2+Y.^2)).^(1/2);

G = R^2*jinc(R.*r/(lambda*z0));

% Plotting field intensity:
field_intensity = (abs((G/(lambda*z0)).^2));

% Calculating field intensity using Fraunhofer approximation:
figure
imagesc(x, x, field_intensity);
axis image
axis xy
colorbar
t = 'Ilai Zaidel - Fraunhofer diffraction, field intensity from distance
$z_0$';
title(t,'interpreter','latex')
xlabel('x[m]','interpreter','latex')
ylabel('y[m]','interpreter','latex')

%------2.D------
```

```
% Plotting field intensity graph at 'y=0' plain:
% Interpolation for x and field_intensity:

[FWHM, x_interp, field_cut_interp]= interp_FWHM(field_intensity,x);


% Plotting field_cut:
figure
plot(x_interp, field_cut_interp);
t = 'Ilai Zaidel - Fraunhofer diffraction, field intensity from distance
$z_0$ for $y=0$';
title(t,'interpreter','latex')
xlabel('x[m]','interpreter','latex')
ylabel('Intensity','interpreter','latex')

% Plotting line at height width
hold on
width = max(field_cut_interp);
fwhm_line = width/2 *ones(length(x));
plot(x, fwhm_line, 'red');
hold off

FWHM


%%

%---------Q3----------
%-------3.C-------

% Calculating the observation plane field (u2) and the axis in
% observation field (x_prop)
% Calculating Fresnel Diffraction for distance z0/50

[u2, x_prop] = propFresnel(circle,L, lambda, z0/50);
fresnel_intensity = abs(u2).^2;

figure
imagesc(x_prop, x_prop, fresnel_intensity);
colorbar;
axis image; axis xy;
t = 'Ilai Zaidel - Fresnel Diffraction, field intensity from distance
$z=z_0/50$';
title(t,'interpreter','latex'); xlabel('x[m]','interpreter','latex');
ylabel('y[m]','interpreter','latex');

[FWHM, x_interp, fresnel_cut_interp, index1, index2]=
interp_FWHM(fresnel_intensity,x_prop);


% Plotting field_cut:
figure
plot(x_interp, fresnel_cut_interp);
t = 'Ilai Zaidel - Fresnel diffraction, field intensity from distance
$z_0/50$ for $y=0$';
title(t,'interpreter','latex'); xlabel('x[m]','interpreter','latex');
ylabel('y[m]','interpreter','latex');

hold on
```

```
endd= length(x_interp);
width = max(fresnel_cut_interp)/2;
width_ones = width * ones(1, length(index1:index2));
plot(x_interp(index1:index2),width_ones)
hold off
legend('Field Cut', 'FWHM')
FWHM

%-------3.D-------

% Calculating Fresnel Diffraction for distance z0
[u2, x_prop] = propFresnel(circle,L, lambda, z0);
fresnel_intensity = abs(u2).^2;

figure
imagesc(x_prop, x_prop, fresnel_intensity);
axis image; axis xy;
t = 'Ilai Zaidel - Fresnel Diffraction, field intensity from distance
$z=z_0$';
title(t,'interpreter','latex'); xlabel('X[m]'); ylabel('Y[m]');

[FWHM, x_interp, fresnel_cut_interp]=
interp_FWHM(fresnel_intensity,x_prop);


% Plotting field_cut:
figure
plot(x_interp, fresnel_cut_interp);
t = 'Ilai Zaidel - Fresnel diffraction, field intensity from distance $z_0$
for $y=0$';
title(t,'interpreter','latex'); xlabel('X[m]'); ylabel('Intensity');

disp(FWHM)




%----3.5----

z = [0.01*z0, 0.1*z0,0.5*z0,z0,2*z0,10*z0];
multy=[0.01, 0.1,0.5,1,2,10];
fwhm_vec = z;

figure
for i = 1:6
    subplot(2,6,i)
    [u2, x_prop] = propFresnel(circle,L, lambda, z(i));
    fresnel_intensity = abs(u2).^2;
    imagesc(x_prop, x_prop, fresnel_intensity);
    axis image; axis xy;
    t = ['$z=$',num2str(multy(i)),'$\cdot z_0$'];
    title(t,'interpreter','latex'); xlabel('X[m]'); ylabel('Y[m]');

    subplot(2,6,i+6)


    [FWHM, x_interp, fresnel_cut_interp]=
interp_FWHM(fresnel_intensity,x_prop);
```

```
    plot(x_interp, fresnel_cut_interp);
    t = ['$z=$',num2str(multy(i)),'$\cdot z_0$ for $y=0$'];
    title(t,'interpreter','latex'); xlabel('X[m]'); ylabel('Y[m]');

    fwhm_vec(i) = FWHM;
end

figure
plot(z, fwhm_vec)
t = 'Ilai Zaidel - FWHM as a function of distance Z';
title(t,'interpreter','latex'); xlabel('z [m]','interpreter','latex');
ylabel('fwhm [m]','interpreter','latex');
%-----FUNCTIONS-----

function [fwhm, x_interp, field_cut_interp, index1, index2] =
interp_FWHM(intensity, x)
% Calculating FWHM:
N = 200;

field_cut = intensity(:,N/2);
x_interp = min(x):0.0001:max(x);
field_cut_interp = interpn(x,field_cut, x_interp);

len = length(field_cut_interp);

field_cut_positive = field_cut_interp(ceil(end/2):end);
field_cut_negative = field_cut_interp(1:ceil(end/2));


% Calculating FWHM:
width = max(field_cut_interp);

%fwhm = x_interp(index2+ceil(end/2)) - x_interp(index1);

%If at x = 0 the cut is in maximum:
if(field_cut_interp(ceil(end/2)) >= width/2)
    index1 = find(field_cut_negative <= width/2  , 1, 'last');
    index2 = find(field_cut_positive >= width/2, 1, 'last');

    fwhm = x_interp(index2+ceil(end/2)) - x_interp(index1);
end

% If at x = 0 the cut is NOT in maximum:

if(field_cut_interp(ceil(end/2)) < width/2)

    index1 = find(field_cut_interp(ceil(end/2) : end) >= width/2  , 1,
'first')+ceil(len/2);
    index2 = find(field_cut_interp(index1+1:end) <= width/2 , 1, 'first') +
index1;

    fwhm = x_interp(index2) - x_interp(index1);

end



end
```