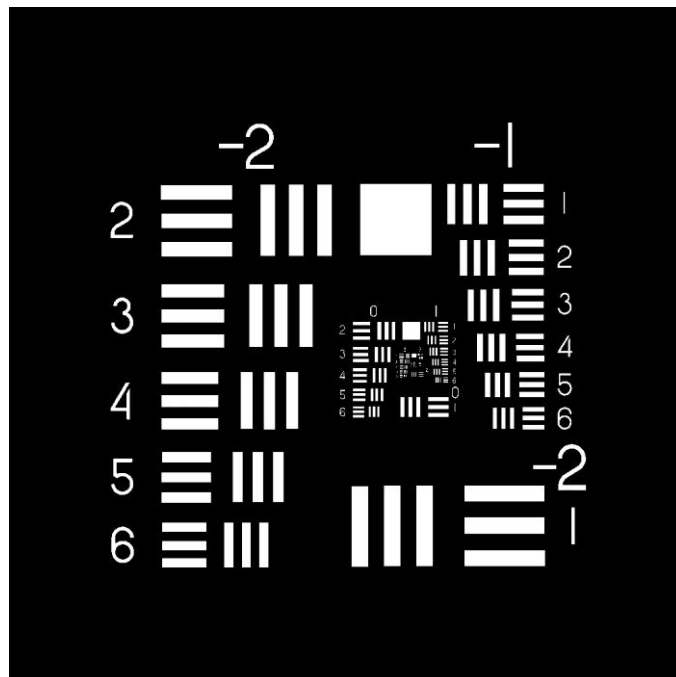




## ĆWICZENIE 7 OBRAZOWANIE

Celem ćwiczenia jest zasymulowanie działania układów obrazujących w świetle monochromatycznym oraz przeprowadzenie operacji poprawiania niedoskonałych zdjęć przy użyciu metody splotowej. Jako obraz testowy posłuży nam wzór „USAF test pattern”, który jest powszechnie stosowany w pracach z dziedziny przetwarzania obrazów (Rysunek 1).

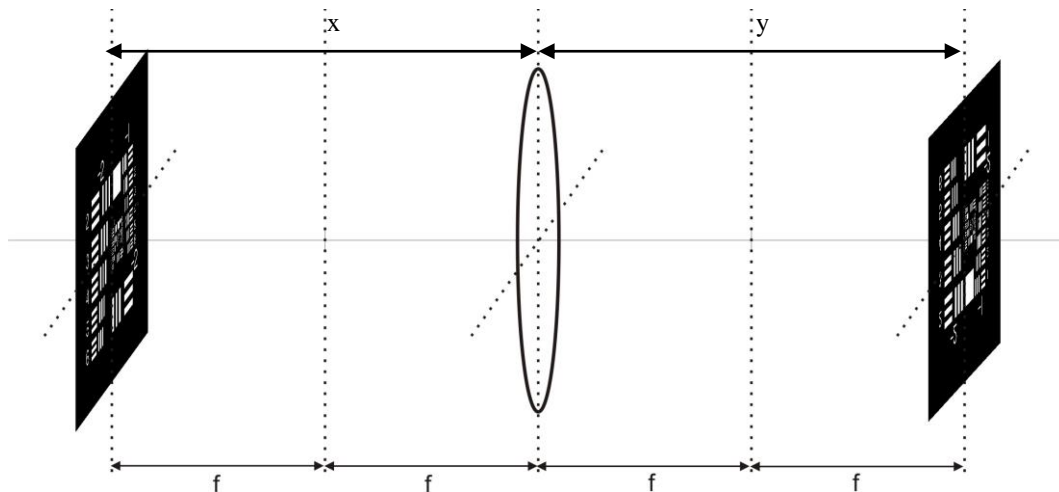


Rysunek 1 Obraz testowy USAF

Obraz jest binarny, co pozwala na ocenę kontrastu uzyskiwanych obrazów, natomiast zawarte w nim coraz gęściej narysowane białe prostokąty pozwalają na ocenę rozdzielczości obrazowania.

### *Układy obrazujące*

Układy obrazujące wykorzystywane w niniejszym ćwiczeniu formują obraz rzeczywisty przedmiotu z powiększeniem równym 1. Najprostszym układem tego typu jest tzw. układ 2f-2f, w którym wykorzystuje się pojedynczą cieką soczewkę skupiającą o znanej ogniskowej  $f$ . Schemat układu przedstawia Rysunek 2.



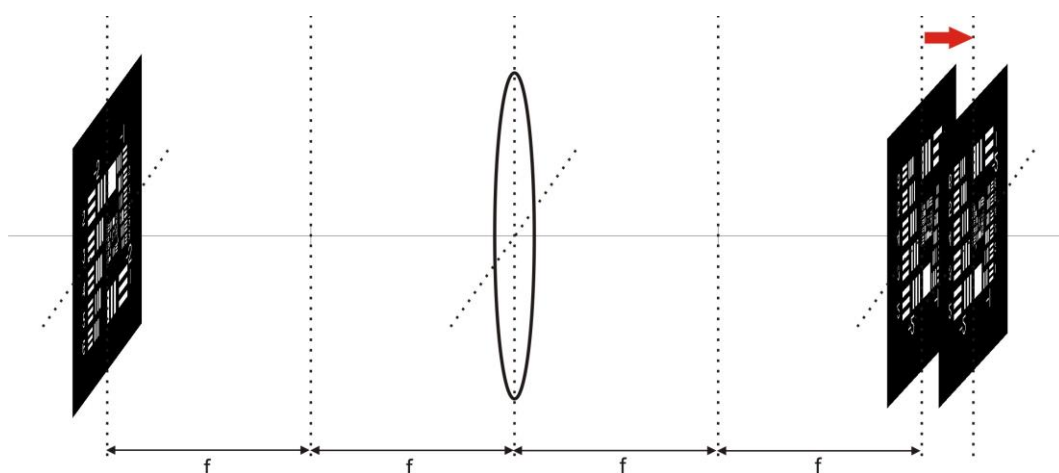
Rysunek 2 Schemat układu obrazującego 2f-2f

W celu osiągnięcia powiększenia jednostkowego istotne jest by zarówno przedmiot (przezroczce z matówką), jak i płaszczyzna macierzy światłoczułej znajdowały się w odległości równej podwójnej ogniskowej soczewki, według równania soczewki:

$$\frac{1}{x} + \frac{1}{y} = \frac{1}{f} \Rightarrow x = y = 2f$$

$$\frac{y}{x} = 1$$

W praktyce układ zestawiony „na ostro”, czyli z rozogniskowaniem równym 0, pozwala na uzyskanie obrazu ostrego, lecz rozmytego ze względu na skończoną aperturę elementu obrazującego (czyli soczewki). W przypadku układu rozogniskowanego płaszczyzna akwizycji obrazu rzeczywistego jest przesunięta wzdłuż osi optycznej układu (tak, jak pokazuje Rysunek 3).



Rysunek 3 Schemat układu obrazującego 2f-2f z rozogniskowaniem



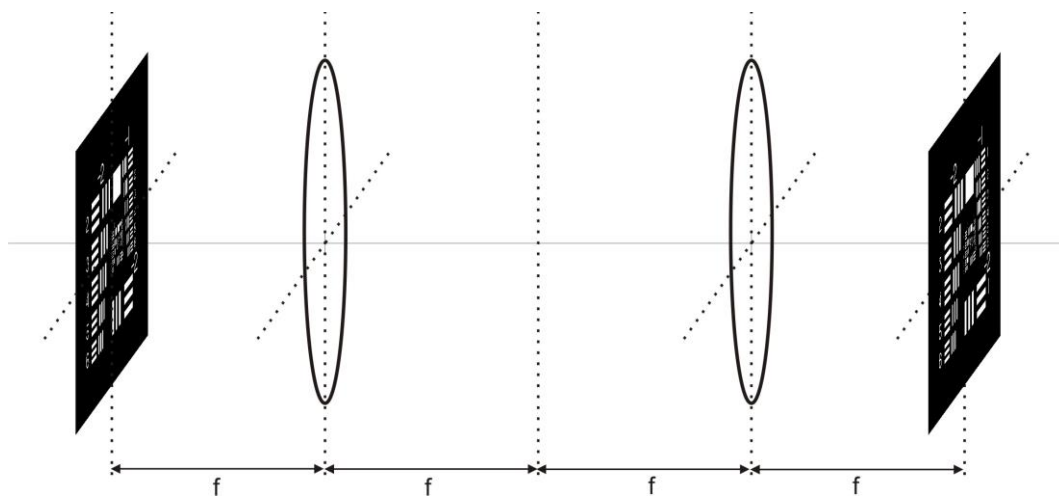
Obraz uzyskany w takim układzie będzie nieostry. Wielkość rozogniskowania układu można wyrazić liczbowo przy użyciu parametru  $w_{20}$ , zdefiniowanego według poniższych zależności:

$$\varepsilon = \frac{1}{x} + \frac{1}{y} - \frac{1}{f}$$
$$w_{20} = \frac{\varepsilon \cdot d^2}{8\lambda},$$

gdzie:

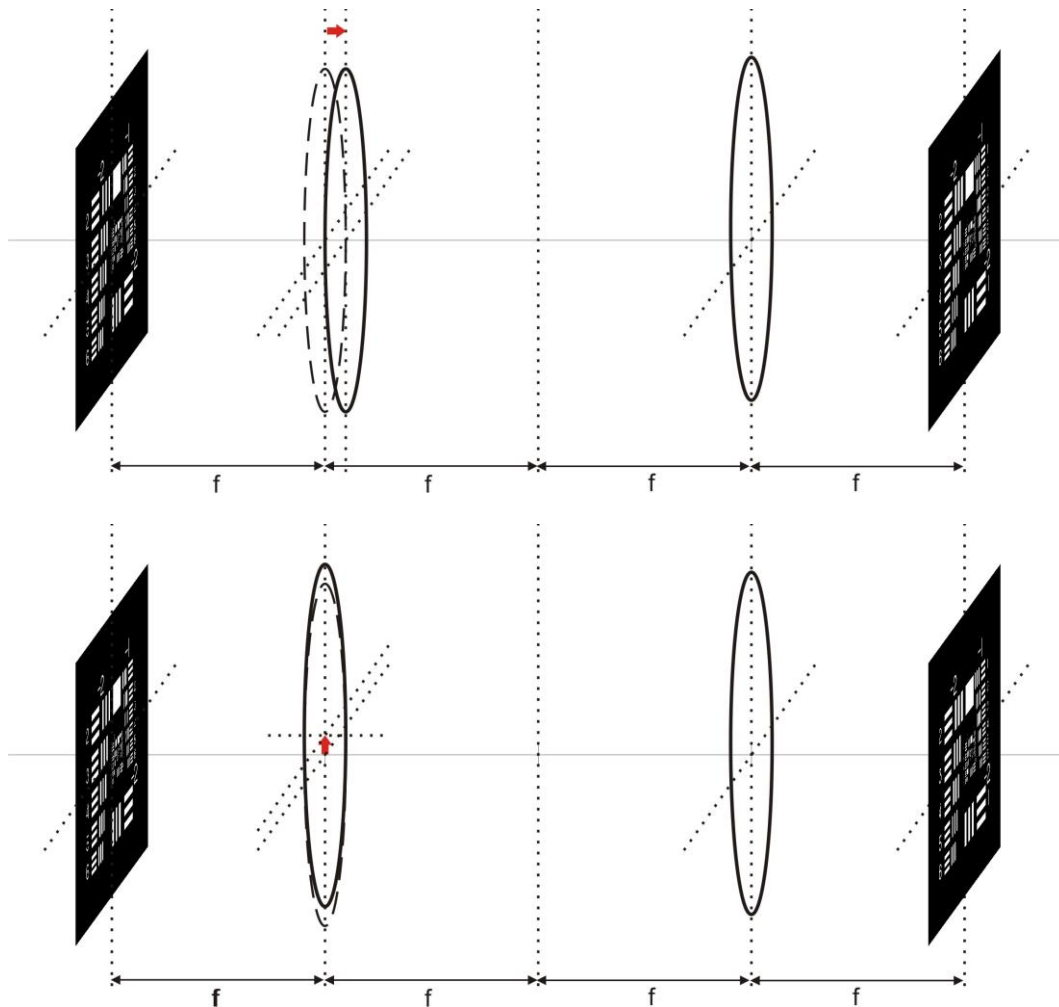
- x – odległość przedmiotowa,
- y – odległość obrazowa,
- f – ogniskowa soczewki,
- d – średnica soczewki,
- $\lambda$  – długość fali światła.

Bardziej skomplikowanym układem obrazującym jest *układ 4f*. Charakteryzuje się on wykorzystaniem dwóch identycznych soczewek skupiających, których ogniska pokrywają się. Schemat układu przedstawia Rysunek 4.



Rysunek 4 Schemat układu obrazującego 4f

W przypadku tego układu obrazującego istnieje szereg możliwości niedokładnego zestawienia dwóch soczewek, co powoduje zniekształcenia w otrzymywanym obrazie. Celem ćwiczenia jest zasymulowanie tych efektów na przykładzie niedopasowania soczewek wzdłuż i w poprzek osi optycznej (Rysunek 5).



Rysunek 5 Deformacje układu 4f, polegające na złym ustawieniu wzajemnym soczewek.

### *Odpowiedź impulsowa układu*

Odpowiedź impulsową układu można zdefiniować, jako obraz punktowego źródła światła uzyskany w badanym układzie obrazującym. W rzeczywistych układach optycznych odpowiedź impulsową można zbadać poprzez umieszczenie w płaszczyźnie przedmiotowej quasi-punktowego źródła światła takiego, jak pinhola. Drugim sposobem jest użycie soczewki skupiającej dobrej jakości i wypozycjonowanie jej tak, aby ognisko znalazło się w płaszczyźnie przedmiotowej badanego układu obrazującego.

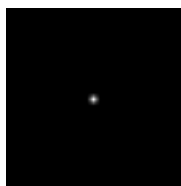
Można powiedzieć, że liniowy układ optyczny przy oświetleniu quasi-monochromatycznym i koherentnym przestrzennie jest liniowy ze względu na zespoloną amplitudę. Układ taki opisujemy przez podanie odpowiedzi impulsowej układu  $h$ , która jest funkcją zespoloną.

Natomiast liniowy układ optyczny oświetlony światłem quasi-monochromatycznym i niekoherentnym przestrzennie jest układem liniowym ze względu na natężenie światła. Wtedy opisujemy go za pomocą funkcji rozmycia punktu (czyli z ang. PSF – Point Spread Function).

$$PSF = |h|^2$$



Przykładowy kształt funkcji PSF dla układu bez rozogniskowania przedstawia Rysunek 6.



Rysunek 6 Kształt funkcji PSF dla układu bez rozogniskowania.

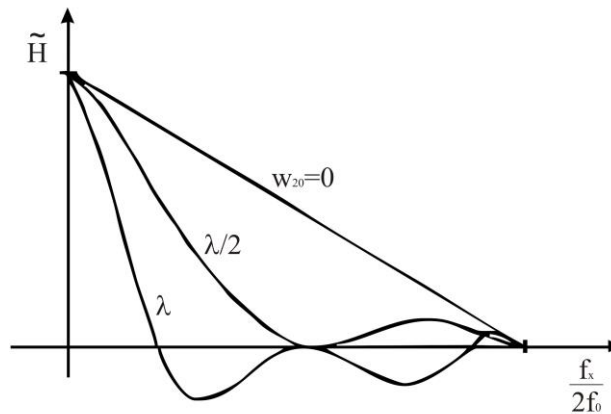
W przypadku idealnym funkcja PSF powinna być punktem, jednakże w wyniku ograniczonych rozmiarów apertury układu obrazującego jest ona zawsze rozmyta. Poniższa ilustracja prezentuje wyniki eksperymentalnego pomiaru kształtu PSF przy zwiększającym się rozogniskowaniu układu optycznego. Pokazany jest też wpływ rozogniskowania na ostrość uzyskanego obrazu – przezrocza zawierającego cyfrę „4”.

$w_{20}$	PSF	Obraz
$0,5 \lambda$		
$1 \lambda$		
$2 \lambda$		

Rysunek 7 Kształt funkcji PSF (z lewej) i otrzymany obraz (z prawej) dla układu o zwiększającym się rozogniskowaniu.



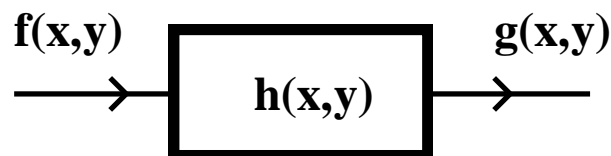
Transformata Fouriera funkcji PSF nosi nazwę optycznej funkcji przenoszenia (z ang. OTF – Optical Transfer Function), a jej moduł to funkcja przenoszenia modulacji (czasem też nazywana funkcją przenoszenia kontrastu, czyli z ang. MTF - Modulation Transfer Function). Funkcja OTF pokazuje stopień przenoszenia kontrastu dla poszczególnych częstości przestrzennych, co ilustruje Rysunek 8.



Rysunek 8 Przykładowy wykres funkcji OTF dla trzech różnych parametrów rozogniskowania (gdzie  $f_0$  to częstość odcięcia dla oświetlenia koherentnego przestrzennie).

### Symulacja obrazowania przez splot

W liniowych układach izoplanarnych obraz wyjściowy jest splotem funkcji opisującej obraz wejściowy z odpowiedzią impulsową układu.



Rysunek 9 Sygnał wyjściowy  $g$  jako splot sygnału wejściowego  $f$  z odpowiedzią impulsową układu  $h$ .



Układ izoplanarny to układ, w którym kształt odpowiedzi impulsowej nie zależy od położenia punktowego źródła światła. Wtedy spełnione są poniższe zależności pozwalające na obliczenie funkcji wyjściowej  $g$ , przy założeniu znajomości funkcji odpowiedzi impulsowej  $h$ :

$$g(x_2, y_2) = \int_{-\infty-\infty}^{+\infty+\infty} \int f(x_1, y_1) \cdot h(x_2 - x_1, y_2 - y_1) \cdot dx_1 \cdot dy_1$$
$$\Downarrow$$
$$G(v_x, v_y) = H(v_x, v_y) \cdot F(v_x, v_y)$$
$$G(v_x, v_y) = \mathfrak{F}\{g(x, y)\}; H(v_x, v_y) = \mathfrak{F}\{h(x, y)\}; F(v_x, v_y) = \mathfrak{F}\{f(x, y)\};$$

### *Symulacja obrazowania przez propagację światła*

Obrazowanie przez splot funkcjonuje poprawnie jedynie w układach izoplanarnych. W przeciwnym razie uzyskiwane wyniki są niezgodne z eksperymentem. Ograniczeniem tym nie jest natomiast obciążona metoda obliczania obrazowania polegająca na numerycznym propagowaniu światła od przeźrocza, poprzez elementy obrazujące, aż do płaszczyzny akwizycji, gdzie obraz natężeniowy jest eksportowany do bitmapy.

W tym ćwiczeniu jako przedmiot traktować będziemy zaimportowany rozkład natężenia z pliku USAF.BMP z nałożoną matówką o losowym rozkładzie fazy, wielkości ziarna 1px i modulacji fazy  $2\pi$ . Używamy propagacji on-axis, double window.

### *Dystans RMS – Root Mean Square Distance*

Funkcja ta jest powszechnie używana w branży przetwarzania obrazów i opisuje numerycznie różnicę (odległość) pomiędzy dwoma tablicami liczb. W naszym przypadku rozkładami liczb będą wartości natężenia światła w poszczególnych pikselach plików TAB w programie *LightSword*. Przyjmując to założenie wartość RMS można zdefiniować, jako:

$$RMS(f, g) = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_i^N (f_i - g_i)^2},$$

gdzie:

- $f$  – plik TAB zawierający oryginalny plik USAF.BMP wczytany jako natężenie;
- $g$  – plik TAB zawierający wynik obrazowania.

Funkcji RMS Distance należy użyć w celu oszacowania wierności uzyskanych obrazowań w stosunku do oryginalnego obrazu *USAF*.



## Element „Miecz Świetlny” i powiększona głębia ostrości

Transmitancja fazowa takiego elementu może zostać zdefiniowana w następujący sposób:

$$Pha(R,T) = \frac{-\pi R^2}{\lambda \cdot \left( f + \frac{\Delta f(T - \pi)}{\pi} \right)},$$

gdzie:

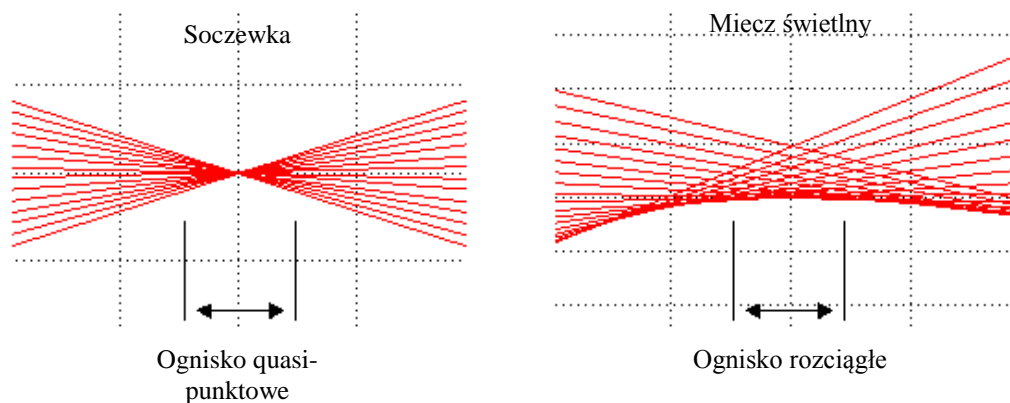
- R – współrzędna radialna,
- T- współrzędna azymutalna.

Element ten posiada właściwość skupiania wiązki nie w punkt, ale w „odcinek ogniskowy” tworzący wzdłuż osi optycznej linię śrubową o długości zależnej od parametru  $\Delta f$ . W związku z tym, jako element obrazujący charakteryzuje się on zwiększoną głębią ostrości, co ilustruje Rysunek 10.

Transmitancję tę można stworzyć w programie *LightSword* używając interpretera poleceń we współrzędnych radialnych wpisując jako fazę:

$$Pha(R,T) = -1 * \pi * R * R / 0,0006328 / (6 + 0,2 * (T - \pi) / \pi),$$

przy założeniu  $f=6\text{mm}$ ;  $\Delta f=0,2\text{mm}$ ;  $\lambda=632,8\text{nm}$ .



Rysunek 10 Porównanie biegu promieni światła za soczewką (po lewej) i za elementem Miecz Świetlny (po prawej). Zaznaczono obszar powiększonej głębi ostrego obrazowania.

W ćwiczeniu należy zaobserwować i zapisać kształt odpowiedzi impulsowej układu obrazującego  $2f-2f$  wykorzystującego element *Miecz Świetlny* dla różnych parametrów rozogniskowania. Kształt PSF to plamka z charakterystycznym ogonem, którego długość i kierunek zmienia się dla różnych wartości  $w_{20}$ .

Uzyskane funkcje PSF należy wykorzystać do obliczenia obrazowania obrazu testowego.





## Poprawianie obrazów

Przy oświetleniu quasi-monochromatycznym, ale niekoherentnym przestrzennie, układ jest liniowy ze względu na natężenie światła. Dlatego w płaszczyźnie wejściowej i w płaszczyźnie wyjściowej rozważamy rozkład natężenia światła, a układ opisujemy poprzez funkcję rozmycia punktu PSF.

Zakładając znajomość funkcji rozmycia punktu  $PSF = |h|^2$  oraz funkcji  $OTF = \mathfrak{F}\{PSF\}$  (oznaczonej jako  $\tilde{H}(v_x, v_y)$ ) układu obrazującego, możemy w pewnym zakresie poprawić jakość uzyskanych obrazów. Załóżmy, że widmo uzyskanego rozkładu natężenia światła obrazu  $\tilde{G}$  jest opisane jako iloczyn widma rozkładu natężenia w płaszczyźnie przedmiotowej  $\tilde{F}$  i funkcji OTF układu -  $\tilde{H}$ .

$$\tilde{G}(v_x, v_y) = \tilde{H}(v_x, v_y) \cdot \tilde{F}(v_x, v_y)$$

Zatem, aby uzyskać sygnał niezaburzony należy widmo rozkładu natężenia obrazu podzielić przez funkcję OTF:

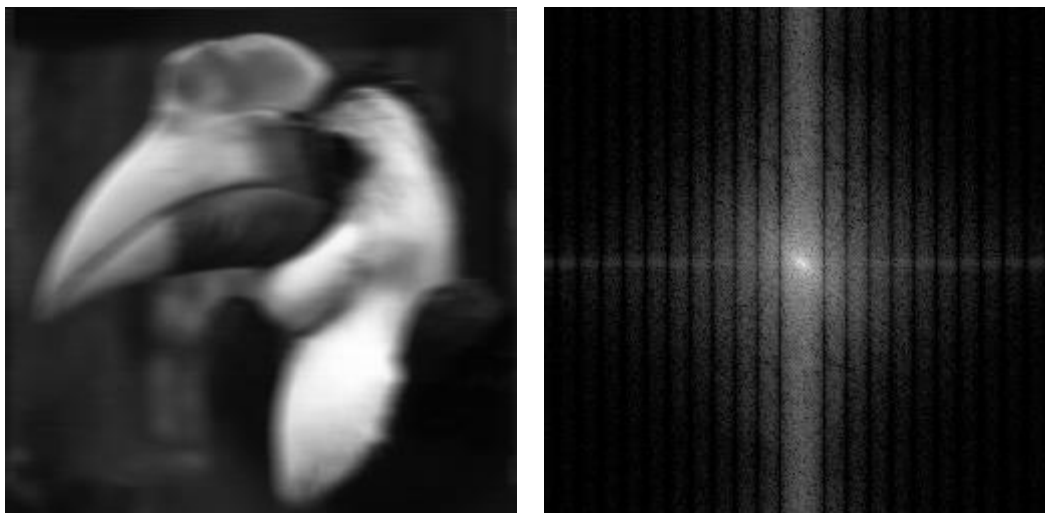
$$\tilde{F}(v_x, v_y) = \frac{\tilde{G}(v_x, v_y)}{\tilde{H}(v_x, v_y)}$$

Jak łatwo zauważyć, aby dzielenie wykonało się poprawnie, funkcja OTF nie może zawierać wartości 0. W takim przypadku istnieje możliwość dokładnego poprawienia obrazu. W przypadku, gdy np. rozogniskowanie było na tyle duże, że OTF posiada zera, doszło do odwrócenia kontrastu i niezaburzony sygnał nie da się już w pełni odtworzyć. W takim przypadku również można przeprowadzić dzielenie widm po dodaniu czynnika normującego w mianowniku ( $K > 0$ ):

$$\tilde{F}(v_x, v_y) = \tilde{G}(v_x, v_y) \cdot \frac{\tilde{H}^*(v_x, v_y)}{|\tilde{H}(v_x, v_y)|^2 + K}$$

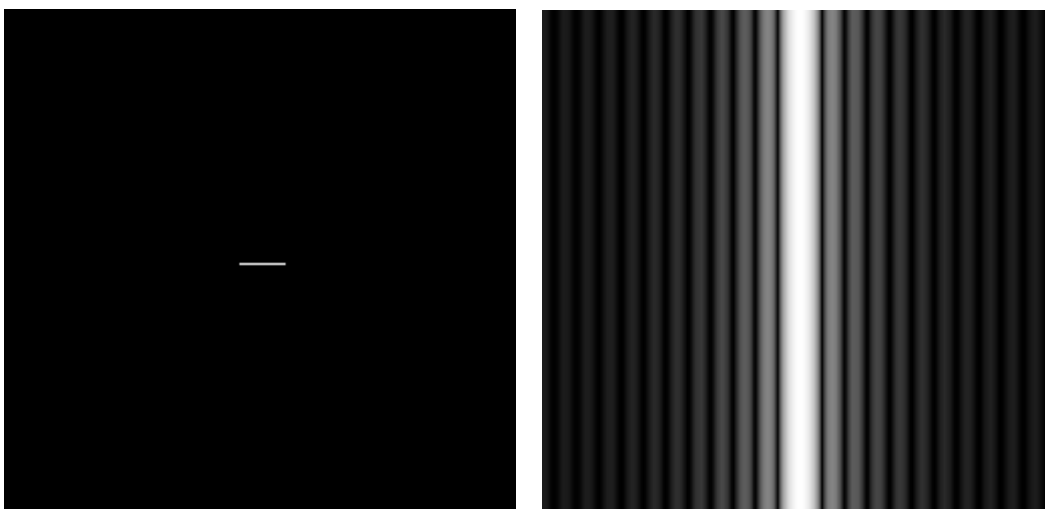
Wartość  $K$  dobierana jest indywidualnie do każdego przypadku. Tym niemniej, jeżeli oba widma są znormalizowane do wartości 1 (menu Operations->Intensity Normalization), można powiedzieć, że wartość  $K$  jest rzędu  $0,01 \div 0,001$ .

Aby zilustrować na przykładach proces poprawiania zdjęcia poruszonego przeanalizujemy następujące zdjęcia. Rysunek 11 przedstawia poruszony obraz (rozmyty) oraz jego widmo fourierowskie.



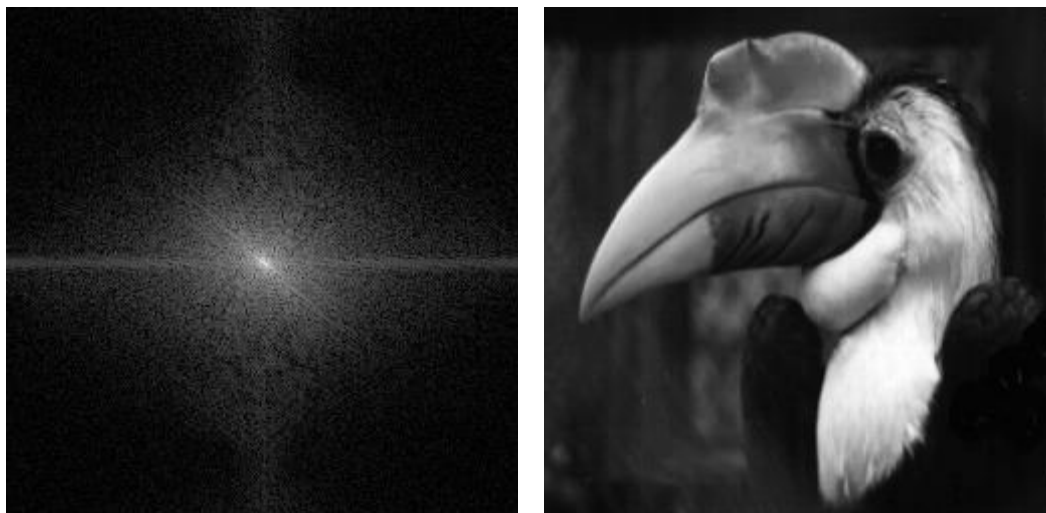
*Rysunek 11 Przykład poruszonego obrazu (z lewej) oraz jego widmo fourierowskie (z prawej).*

Rysunek 12 przedstawia funkcję PSF w kształcie odcinka (wąskiego prostokąta) i jej widmo. Łatwo zauważyć, że położenie zer w obu widmach (Rysunek 11 i Rysunek 12) jest takie samo.



*Rysunek 12 PSF poruszonego obrazu (z lewej) oraz jego widmo fourierowskie – OTF (z prawej).*

Poprzez podzielenie widma obrazu przez znany OTF (tzw. filtr inwersyjny) uzyskujemy poprawione widmo fourierowskie. Po wykonaniu transformaty Fouriera (FFT) uzyskujemy poprawiony, nieporuszony obraz (Rysunek 13).



*Rysunek 13 Widmo fourierowskie poprawionego obrazu (z lewej) i sam obraz pozbawiony poruszenia (z prawej).*

Na zajęciach poprawiane będą zdjęcia dostarczone przez prowadzących ćwiczenie. Każde ze zdjęć posiada niedoskonałość polegającą na poruszeniu zdjęcia podczas ekspozycji lub jego rozogniskowanie (zdjęcie nieostre). Należy wykonać analizę widma fourierowskiego nieostrych zdjęć w celu identyfikacji funkcji PSF, która decyduje o charakterze defektu zdjęcia. Następnie należy wygenerować funkcję PSF i przeprowadzić operację odsplatania. W tym celu trzeba wykonać operację matematyczną dzielenia widma zdjęcia przez widmo funkcji PSF. Tak przekształcone widmo zdjęcia powinno zostać pozbawione tych częstości przestrzennych, które odpowiedzialne są za pojawienie się defektów. W celu zaobserwowania wyniku odsplatania należy wykonać odwrotną transformatę Fouriera.

W dalszej kolejności należy ocenić stopień poprawy jakości zdjęcia metodą statystyczną. W tym celu należy obliczyć wartość RMS (Root Mean Square), czyli stopień odstępstwa uzyskanego zdjęcia od oryginału. RMS obliczamy pomiędzy zdjęciami zniekształconymi a oryginałami oraz pomiędzy zdjęciami poprawionymi a oryginałami. Wartości uzyskane należy stabelaryzować i sformułować wnioski.

### *Metoda kontrastu fazowego*

Ludzkie oko oraz kamery CCD wrażliwe są na natężenie światła uśrednione w czasie, natomiast bezpośrednio nie dostrzegają fazy światła. Metoda kontrastu fazowego wynaleziona przez Zernike'go jest stosowana w mikroskopii do obserwowania obiektów przezroczystych dla światła. Pozwala ona na wizualizację rozkładu fazy obiektu w postaci natężeniowej. Bazuje na spostrzeżeniu, że światło nieugięte (tło) jest skupiane w płaszczyźnie fourierowskiej układu obrazującego w centrum (on-axis), podczas gdy światło ugięte przez próbkę (obiekt fazowy) jest skupiane poza centrum (w obszarze wyższych częstości przestrzennych). Światło skupiane w tych dwóch regionach interferuje ze sobą dając jednostkową amplitudę, tak jak w tradycyjnej mikroskopii.



Założmy, że obiekt posiada transmitancję:

$$t(x, y) = \exp[i\varphi(x, y)] \cong 1 + i\varphi(x, y)$$

Użyte przybliżenie jest prawdziwe dla zmian fazy mniejszych niż 1 radian, stąd poprawnie wizualizowane są obiekty modulujące fazę w niepełnym zakresie, np.  $0-0,5\pi$ . Obraz formowany przez tradycyjny mikroskop można wyrazić jako:

$$I_i \cong |1 + i\varphi|^2 \cong 1,$$

czyli natężenie jednorodne nieniosące informacji o obiekcie.

Jeżeli jednak obszar centralny w płaszczyźnie fourierowskiej opóźnimy w fazie o  $0,5\pi$ , wtedy zmienimy wynik interferencji regionów przyosiowych z pozaosiowymi, przez co natężenie będzie można opisać wzorem:

$$I_i = |\exp[i(\pi/2)] + i\varphi|^2 = |i(1 + \varphi)|^2 \cong 1 + 2\varphi$$

Wynika z tego, że natężenie w tym przypadku zależy liniowo od opóźnienia fazowego wprowadzonego przez obserwowany obiekt.

Opóźnienie fazowe obszaru on-axis realizuje się w praktyce poprzez umieszczenie małej płytki dielektryka o odpowiednim współczynniku załamania i grubości wprowadzającej odpowiednią różnicę fazy. W numerycznej symulacji wykonywanej w tym ćwiczeniu można wykorzystać strukturę Band Pass Filter w wersji fazowej.



## Zadania do wykonania:

Symulacje obrazowania proszę przeprowadzić w aplikacji *LightSword* (dostępnej w laboratorium) na macierzy 4096 x 4096 punktów, z próbkowaniem 1 x 1  $\mu\text{m}$  dla długości fali światła 0,6328  $\mu\text{m}$ . Do obrazowania wykorzystujemy testowy obraz *USAF.BMP*.

- 1) Obliczenie funkcji PSF i MTF dla układu  $2f-2f$  dla rozogniskowania  $w_{20}=0$  i  $w_{20}\approx 4$ . Przyjąć następujące parametry soczewki:  $f=6\text{mm}$ ;  $d=2\text{mm}$ ;  $\lambda=632,8\text{nm}$ ; próbkowanie= $1\mu\text{m}$ ; rozdzielczość 4096x4096 punktów. Odległość obrazową należy obliczyć ze wzorów na parametr rozogniskowania  $w_{20}$ .
- 2) Zasymulowanie obrazowania w świetle niekoherentnym przestrzennie w układzie  $2f-2f$  dla obiektu USAF poprzez obliczenie splotu bitmapy wejściowej z funkcją PSF dla przypadku  $w_{20}=0$  i  $w_{20}=4$ .
- 3) Zasymulowanie obrazowania w świetle koherentnym przestrzennie przezrocza USAF w układzie  $2f-2f$  o powyższych parametrach poprzez propagację światła od przezrocza z matówką przez elementy obrazujące do płaszczyzny obrazowej.
- 4) Zasymulowanie obrazowania elementem *miecz świetlny* o parametrach:  $f=6\text{mm}$ ;  $\Delta f=0,2\text{mm}$ ;  $d=2\text{mm}$ ;  $\lambda=632,8\text{nm}$ ; próbkowanie= $1\mu\text{m}$ ; rozdzielczość 4096x4096 punktów. Obrazowanie obliczamy poprzez splot obrazu wejściowego z funkcją MTF uzyskaną dla  $w_{20}=0$ ,  $w_{20}=2$ ,  $w_{20}=4$ .
- 5) Metoda kontrastu fazowego. Zasymulowanie obrazowania obiektu fazowego *Gwiazda Siemens* w układzie  $2f-2f$  z użytą wcześniej soczewką przez umieszczenie w płaszczyźnie ogniskowej za soczewką płytki fazowej o promieniu 2 pixeli, opóźnieniu fazy  $0,5\pi$ . Poziomy fazy Gwiazdy Siemens od 0 do  $0,5\pi$  oraz od 0 do  $2\pi$ . Sformułować wnioski dotyczące jakości wizualizacji fazy dla poszczególnych przypadków.
- 6) Zasymulowanie funkcji PSF i OTF układu  $4f$  przy użyciu dwóch soczewek o powyższych parametrach. Układ zestawiony:
  - a) „na ostro”;
  - b) z rozsunięciem soczewek o 0,5mm wzdłuż osi optycznej;
  - c) z przesunięciem poprzecznym drugiej soczewki o 0,1mm.
- 7) Zasymulowanie obrazowania poprzez obliczenie splotu bitmapy wejściowej z funkcją PSF dla powyższych ustawień układu obrazującego.
- 8) Zasymulowanie obrazowania w świetle koherentnym przestrzennie przezrocza USAF w układzie  $4f$  o powyższych parametrach poprzez propagację światła od przezrocza z matówką przez elementy obrazujące do płaszczyzny obrazowej.