

„Interferometryczny pomiar
rozkładu fazy pola optycznego
z wykorzystaniem nieciągłości
fazowych”

AUTOR: mgr inż. Wojciech Frączek

PROMOTOR: prof. dr hab. inż. Janusz Mroczka

Spis treści

| | |
|--|----|
| Spis treści | 1 |
| Cel pracy | 2 |
| Teza pracy | 2 |
| Zakres pracy | 2 |
| 1. Wstęp..... | 3 |
| 2. Podstawy teoretyczne..... | 5 |
| 2.1. Pojęcie i cechy charakterystyczne wiru optycznego..... | 5 |
| 2.2. Sposoby generowania wirów optycznych..... | 10 |
| 2.2.1. Metoda holograficzna..... | 11 |
| 2.2.2. Metoda soczewek cylindrycznych | 14 |
| 2.2.3. Metoda spiralnej płytki fazowej..... | 15 |
| 2.2.4. Metoda podziału frontu falowego | 16 |
| 2.2.5. Metoda interferencyjna | 17 |
| 3. Możliwości wykorzystania wirów optycznych..... | 21 |
| 3.1. Możliwości wykorzystania wirów optycznych w pomiarach interferencyjnych..... | 21 |
| 3.2. Czynniki mające wpływ na dokładność | 25 |
| 3.2.1. Stabilność obrazów interferencyjnych | 25 |
| 3.2.2. Zaburzenia frontu falowego i rozkładu amplitud..... | 33 |
| 3.2.3. Cyfryzacja obrazu | 35 |
| 4. Metody lokalizacji..... | 37 |
| 4.1. Lokalizacja punktu osobliwego poprzez analizę jego otoczenia..... | 38 |
| 4.1.1. Metoda minimów | 40 |
| 4.1.2. Metoda amplitud | 43 |
| 4.1.3. Metoda trójkątów | 45 |
| 4.1.4. Metoda cosinusów..... | 46 |
| 4.1.5. Metoda wektorów..... | 48 |
| 4.1.6. Metoda widelców z przesunięciem fazy | 50 |
| 4.2. Osiągnięte dokładności lokalizacji..... | 54 |
| 5. Określenie znaku ładunku topologicznego | 56 |
| 5.1 Metoda I | 58 |
| 5.2 Metoda II..... | 61 |
| 5.3 Podsumowanie | 63 |
| 6. Analiza położenia punktów wirowych..... | 64 |
| 6.1. Struktura sieci wirów optycznych powstałych w wyniku interferencji trzech fal płaskich..... | 64 |
| 6.2. Indeksowanie punktów wirowych w strukturze równoległobocznej sieci..... | 67 |
| 7. Pomiary z wykorzystaniem wirów optycznych | 69 |
| 7.1. Pomiar małych kątów | 70 |
| 7.2. Pomiar zaburzeń frontu falowego fali płaskiej | 75 |
| 8. Podsumowanie | 82 |
| Bibliografia..... | 85 |

Cel pracy

Celem niniejszej pracy jest opracowanie metod umożliwiających wykorzystanie nieciągłości fazowych występujących w polu optycznym, do pomiaru parametrów analizowanego pola optycznego.

Teza pracy

Analiza położenia nieciągłości fazy w polu interferencyjnym trzech wiązek umożliwi opracowanie metod pomiarowych wybranych właściwości pola optycznego.

Zakres pracy

- określenie cech charakterystycznych pola optycznego w otoczeniu wiru umożliwiających pomiar jego położenia,
- opracowanie procedur numerycznych do analizy interferogramów pomiarowych w celu zlokalizowania wirów optycznych,
- określenie mierzalnych cech pola optycznego pozwalających na określenia znaku wiru optycznego,
- opracowanie procedur umożliwiających wykorzystanie cech wiru optycznego do określenia jego znaku.
- zaproponowanie sposobu pomiaru wybranych wielkości fizycznych z wykorzystaniem wirów optycznych

1. Wstęp

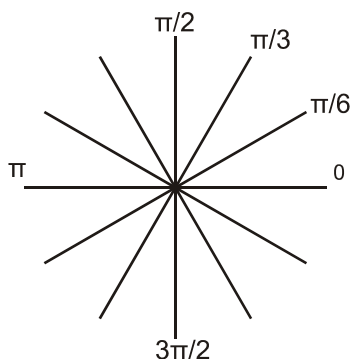
Wir optyczny jako punktowa nieciągłość w rozkładzie pola optycznego [1] może występować jako obiekt niepożądany lub może być sztucznie wprowadzony w pole interferencyjne. Istnieje wiele metod generacji wirów optycznych, a jedną z nich, umożliwiającą powstanie sieci wirów optycznych, jest metoda interferencyjna wykorzystywana w opisywanych eksperymentach [2]. Obecnie prowadzone są prace, będące w różnym stopniu zaawansowania, nad zastosowaniem wirów optycznych w takich dziedzinach jak: mikrobiologia [3], astronomia [4], mikroskopia nadrozdzielcza [5], technika światłowodowa [6] oraz kryptografia kwantowa [7]. Niniejsza praca poświęcona jest zastosowaniu wirów optycznych w *interferometrii na wirach optycznych (IWO)*. Nieciągłości fazowe, włączając w to wiry optyczne, z powodu występowania nieokreślonej wartości fazy utrudniają analizę interferogramów. Dlatego wymagają bardziej złożonych metod analizy lub w standardowej analizie są pomijane. W technice IWO analizowane są właśnie nieciągłości fazowe i ich otoczenie. Wykorzystanie nieciągłości fazowych do analizy pola optycznego wymaga ich precyzyjnego zlokalizowania w obrazie interferencyjnym, a następnie analizy ich wzajemnego rozmieszczenia. Znajomość zmian geometrii sieci wirów pozwala na uzyskanie wartości wielkości mierzonych. Ponieważ punkt wirowy jest punktem ciemnym, w którym poziom sygnału wynosi zero pomiar jego położenia nie powinien odbywać się wprost, ale na podstawie rozkładu fazy pola w okolicy wiru. Taki pomiar wymaga opracowania metod identyfikacji charakterystycznych cech pola optycznego w sąsiedztwie wiru. Uzyskany metodą dedukcyjną model wiru optycznego nie może być bezpośrednio wykorzystany do lokalizacji wirów optycznych oraz do określenia ich znaków, ze względu na zespoloną amplitudę fali pola optycznego charakterystyczną dla wiru optycznego. Konieczne staje się połączenie istniejącego opisu z informacją uzyskaną drogą indukcyjną. Matematyczny i fizyczny opis wiru optycznego oraz jego propagacji jest dobrze znany i przedstawiany w literaturze [8],[9]. Istnieje analityczny opis wiru optycznego oraz wiązki, w której taka struktura jest propagowana. Wiele trudniejszy, ze względu na stopień skomplikowania, jest opis analityczny wiązek propagujących grupy wirów optycznych i nie jest on spotykany w literaturze. Z tego samego powodu nie są wykorzystywane równanie analityczne do obliczania lokalizacji punktów wirowych w polu optycznym. Do tego celu wykorzystuje się wyłącznie procedury numeryczne (rozdział 4). Określenie położenia punktów wirowych w zależności od wartości wielkości oddziałującej możliwe jest po przeprowadzeniu

eksperymentu w układzie rzeczywistym interferometru na wirach optycznych lub z wykorzystaniem jego modelu. Określenie wpływu wielkości oddziałującej na położenie punktów wirowych w tym wypadku najlepiej jest określić w sposób indukcyjny. Rozwiązanie tego zagadnienia określanego w metrologii jako „problem wprost” [10] jest pierwszym etapem mojej pracy. Następnie to zagadnienie jest odwracane i na podstawie analizy struktury sieci punktów wirowych wyznaczana jest wartość wielkości mierzonej (problem odwrotny). Połączenie modelu teoretycznego obejmującego wir optyczny z eksperymentem, w którym wykorzystane są sieci wirów, pozwala na określenie cech umożliwiających lokalizację punktów wirowych w analizowanym obszarze pola optycznego oraz określenie znaków ich ładunków topologicznych. Lokalizacja węzłów sieci wirów optycznych powstałych z wykorzystaniem techniki IWO jest podstawą do dalszej części pracy nad wykorzystaniem nieciągłości fazowych w polu optycznym do celów pomiarowych. Określenie wartości wielkości mierzonej wymaga opracowania metod do analizy struktury sieci oraz metod interpretacji uzyskanych danych.

2. Podstawy teoretyczne

2.1. Pojęcie i cechy charakterystyczne wiru optycznego

Pojedynczy wir optyczny jest związany z punktową, izolowaną, strukturalnie stabilną, nieciągłością w rozkładzie fazy w polu świetlnym [1], [11]. Rysunek 2.1 przedstawia przekrój frontu falowego, który zawiera pojedynczy wir. Linie równej fazy zbiegają się w jednym punkcie, w którym wartość fazy jest nieokreślona (jest to izolowany punkt osobliwy w rozkładzie fazy pola optycznego - punkt wirowy), linie te mogą mieć wartości z przedziału $\langle 0, 2\pi \rangle$ lub $\langle -\pi, \pi \rangle$ (zależnie od przyjętej konwencji).



Rysunek 2.1 Wir optyczny. Linie równej fazy zbiegające się w punkcie wirowym.

Najprostsze równanie opisujące monochromatyczną, liniowo spolaryzowaną falę przenoszącą wir optyczny ma postać [1]:

$$U_{\pm}^{(n)} = (a \pm ib)^n = A^{(n)} \exp(\pm in\theta), \quad (2.1)$$

gdzie: U - amplituda zespolona, A – amplituda fali, n - wartość ładunku topologicznego wiru optycznego, a, b – wartość rzeczywista i urojona funkcji, θ - wartość fazy

Jeżeli wartość fazy wynosi $+n\theta$, to równanie 2.1 opisuje falę przenoszącą dodatni wir optyczny, natomiast jeżeli wartość fazy wynosi $-n\theta$, to mamy ujemny wir optyczny. Wyrażenie to jest rozbieżne przy odległości od centrum wiru dążącej do nieskończoności, zatem powinno być traktowane jako przybliżony opis rzeczywistych wiązek tylko w okolicy punktu wirowego.

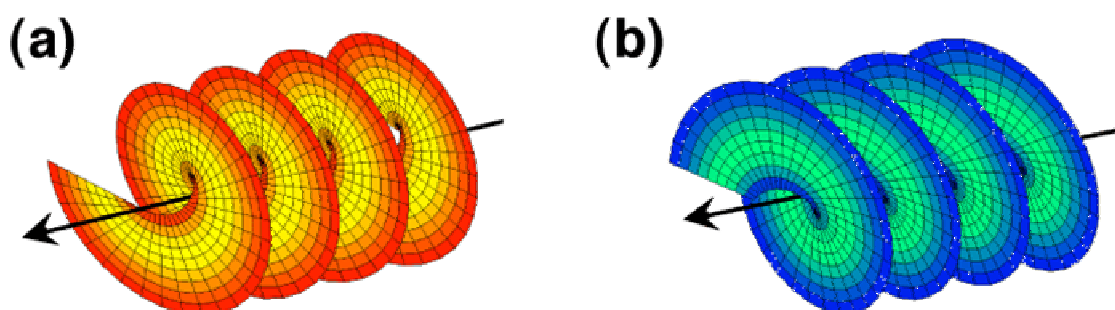
Ładunek topologiczny s wiru optycznego [12], [13] definiowany jest jako wartość wyrażenia [14], [15] :

$$s = \frac{1}{2\pi} \oint_G d\theta = \frac{1}{2\pi} \oint_G \nabla \theta \cdot d\vec{R} \quad (2.2)$$

gdzie G – nie przecinająca się krzywa zamknięta, nie przechodząca przez nieciągłość fazową i nie zawierająca innej nieciągłości oprócz badanej, R – wektor położenia, θ - faza

Wartością wyrażenia (2.2) jest niezerowa liczba całkowita, której znak określa znak ładunku topologicznego wiru optycznego, a wartość jest równa wartości tego ładunku. Ponieważ wartość amplitudy zespolonej U nie może zmieniać się skokowo (warunek ciągłości), w centrum wiru optycznego amplituda (i natężenie) fali musi wynosić zero.

Kolejną charakterystyczną cechą wiązek przenoszących wir optyczny wynikającą z równania (2.1) jest faza określona wyrażeniem $\exp\{-in\theta\}$. Efektem tego jest powstanie helikalnego kształtu frontu falowego (Rysunek 2.2) oraz związanego z tym niezerowego momentu pędu.



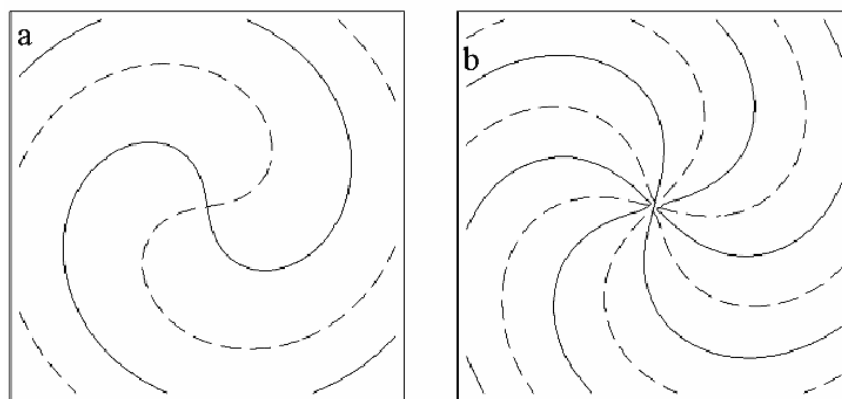
Rysunek 2.2 Helikalny front falowy: (a) ładunek wiru $m = 1$ (b) $m = -1$ [16]

Oś przedstawiona na powyższym rysunku (Rysunek 2.2) pokrywa się z kierunkiem rozchodzenia się fali z wirem optycznym. W przekroju na płaszczyźnie prostopadłej do osi helikoidy otrzymuje się obraz linii równej fazy zbiegających się w jednym punkcie (Rysunek 2.1) [17], [18]. Skręcony front falowy występuje w najbliższym otoczeniu punktu wirowego i nie musi mieć kształtu regularnej helisy. Nieregularny rozkład fazy w pobliżu wiru jest opisany szerzej w pracy autorstwa M. R. Dennisa [19].

Kierunek obrotu helikalnego frontu falowego jest ściśle związany ze znakiem ładunku topologicznego. Jeśli front falowy ulega skręceniu zgodnym z kierunkiem wskazówek zegara, analizując wzdłuż kierunku propagacji, to znak ładunku topologicznego wiru optycznego będącego w jego centrum jest dodatni, w przypadku lewoskrętnej helikoidy – znak ujemny [20]. Helikalny kształt frontu falowego jest odpowiedzialny za niezerowy moment pędu fali świetlnej [21]. Sprawia to, że wir optyczny to stabilna struktura w ramach frontu falowego. Ze względu na posiadany moment pędu wiry optyczne powstają w parach z przeciwnymi znakami ładunków topologicznych. Ponieważ wiry optyczne wskazują wiele podobieństw do cząstek naładowanych, czasem określane się mianem kwazi-cząstek, a przez analogię do fizyki atomu, moment pędu fali świetlnej związany z wirem optycznym nazywany jest orbitalnym momentem pędu. Podobnie jak moment pędu elektronu, któremu przypisuje się własny moment pędu nazywany spinem oraz orbitalny moment pędu.

W punkcie, w którym występuje osobliwość fazy fali świetlnej o amplitudzie zespolonej U wartość rzeczywista funkcji U ($\text{Re}(U)$) oraz wartość urojona funkcji U ($\text{Im}(U)$) wynoszą zero [11], [22], [23]:

$$\begin{cases} \text{Re}(U) = 0 \\ \text{Im}(U) = 0 \end{cases} \quad (2.3)$$



Rysunek 2.3 Przykłady ilustrujące przecięcie linii zerowych $\text{Re}(U)$ (linia ciągła) i $\text{Im}(U)$ (linia przerywana): (a) dla wiru o ładunku 1 i znaku „+”, (b) dla wiru o ładunku 3 i znaku „-” [24].

Amplitudę zespoloną U fali świetlnej w płaszczyźnie prostopadłej do kierunku rozchodzenia można przedstawić w postaci:

$$U(x, y) = U_{\text{Re}}(x, y) + i \cdot U_{\text{Im}}(x, y), \quad (2.4)$$

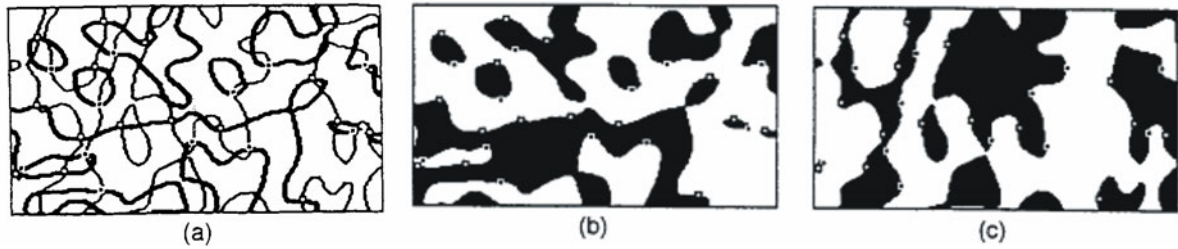
gdzie $U_{\text{Re}}(x,y)$ jest częścią rzeczywistą amplitudy zespolonej fali świetlnej $U(x,y)$, a $U_{\text{Im}}(x,y)$ – częścią urojoną. Faza fali jest nieokreślona właśnie w punkcie przecięcia linii zerowych funkcji U_{Re} i U_{Im} . Przykład charakterystycznego wirowego przebiegu linii zerowych funkcji U_{Re} i U_{Im} w obszarze wiru optycznego przedstawiony jest na rysunku powyżej (Rysunek 2.3).

Należy podkreślić, że *wir optyczny* to nie tylko punkt osobliwy – nazywany *punktem wirowym*, ale również otoczenie tego punktu. Takie określenia odpowiednio są stosowane w dalszej części rozprawy. W trójwymiarowym obrazie określenie wir optyczny oznacza tą część frontu falowego, która ma heliakalną geometrię.

Określony front falowy może zawierać więcej niż jeden wir optyczny. W takiej sytuacji spełniona jest zawsze reguła znaków: *Dwa sąsiednie wiry, połączone linią równej fazy muszą być przeciwnych znaków* [1]. Taka reguła jest pomocna w określeniu znaków ładunków topologicznych każdego wiru z grupy wirów dzięki trzem wnioskom wynikającym z tej reguły:

- Znak każdego pojedynczego wiru w polu falowym automatycznie ustala znaki wszystkich wirów w tym polu
- Jeśli znak wiru znajdującego się w polu falowym zostanie zmieniony znaki wszystkich pozostałych wirów muszą ulec zmianie
- Znak pierwszego wiru tworzonego podczas ewolucji pola falowego ustala znaki wszystkich przyszłych wirów [1].

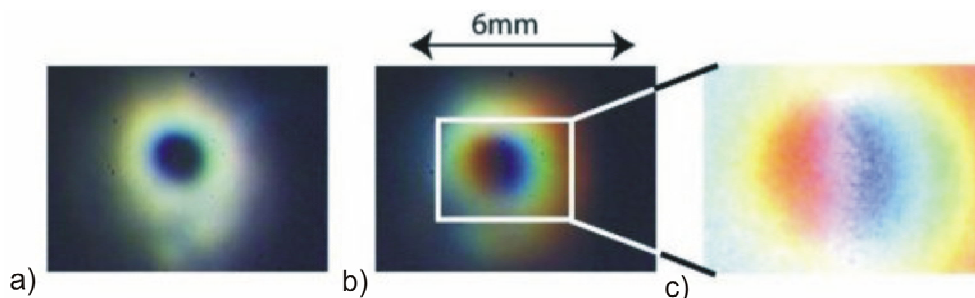
Przez I. Freunda i N. Shvartsman [1], [22] została zaproponowana metoda służąca określeniu położenia oraz znaków wirów optycznych powstałych w optycznym polu speklowym. Jest to metoda czarno-białych map. Metoda ta wymaga wykreślenia dwóch map. Jedna z tych map przedstawia część rzeczywistą funkcji U_{Re} , a druga – część urojoną U_{Im} . Po złożeniu ich razem powstaje wykres, na którym widoczne są punkty przecięcia U_{Re} z U_{Im} . Punkty te wyznaczają położenie wirów optycznych.



Rysunek 2.4 Przykład czarno-białych map. Mapa (a) przedstawia powstałe kontury z nałożenia dwóch map (b) i (c). Mapa (b) sporządzona jest dla f_x , zaś (c) – dla f_y (kolor czarny oznacza obszar dodatni, kolor biały – obszar ujemny) [25].

Na rysunku powyżej kolor biały przypisany jest obszarowi, w którym rozważana funkcja ma wartości dodatnie, kolor czarny oznacza, iż funkcja ma wartości ujemne. Analiza gradientu rozkładu przedstawionego na dwóch mapach (Rysunek 2.4b i Rysunek 2.4c) w okolicy punktu przecięcia pozwala określić znak wirów optycznych.

Możliwe jest zaobserwowanie wirów optycznych nie tylko w polu optycznym stworzonym przez fale monochromatyczną ale również w wielobarwnym polu optycznym. W roku 2002 M.V. Berry opublikował pracę w której stwierdził, że możliwe jest obserwowanie różnobarwnego rozkładu natężenia w pobliżu wiru optycznego [26], [27]. Potwierdzeniem takiego zjawiska jest doświadczenie zaproponowane i wykonane przez J. Leacha oraz M.J. Padgetta [28].



Rysunek 2.5 Wielobarwna wiązka gaussowska z wirem w środku; a) pokrywające się wiry optyczne; b) rozdzielone wiry optyczne; c) powiększony fragment rysunku przedstawiający rozdzielone wiry optyczne [28].

Rysunek 2.5 przedstawia wynik eksperymentu, polichromatyczną wiązkę gaussowską z wirem w środku (Rysunek 2.5a) oraz rozdzielone wiry optyczne (Rysunek 2.5b i Rysunek 2.5c) po przejściu przez pryzmat.

2.2. Sposoby generowania wirów optycznych

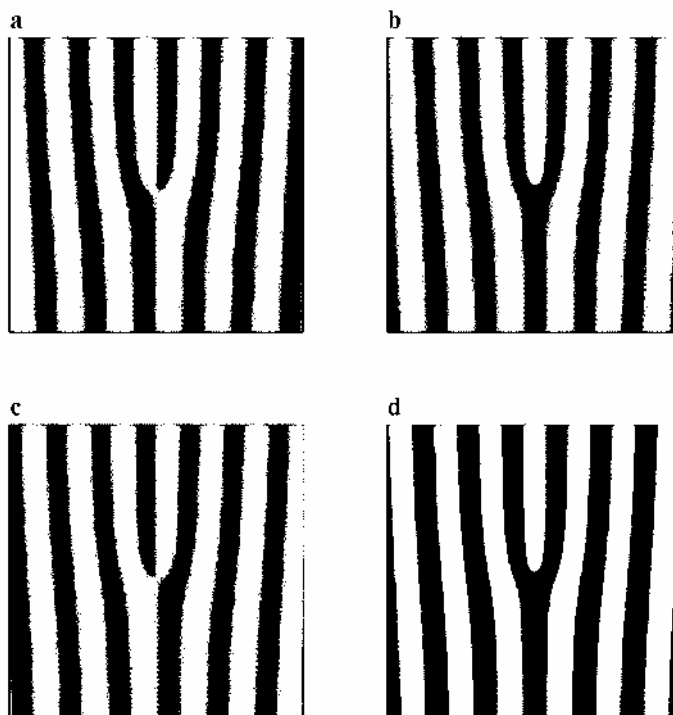
Istnieje wiele metod generowania wirów optycznych powstałych na potrzeby różnych zastosowań. Poniżej, w sposób skrótowy, opisanych jest kilka najpopularniejszych metod, takich jak: metoda holograficzna, metoda soczewek cylindrycznych, metoda spiralnej płytki fazowej, metoda podziału frontu falowego oraz metoda interferencyjna. Ze względu na wykorzystanie w technice interferometrii na wirach optycznych najwięcej uwagi poświęcono metodzie interferencyjnej. Metoda ta była wykorzystywana do generacji sieci wirów optycznych na potrzeby przeprowadzonych eksperymentów. Opisane metody nie stanowią wszystkich możliwych do wykorzystania sposobów otrzymywania helikalnych frontów falowych, można wymienić jeszcze takie metody jak: separacji modów laserowych [11], [21], [29], [30] czy metodę opierającą się na wykorzystaniu zjawisk nieliniowych [31], [32].

Opisywane metody generacji wirów optycznych zostały stworzone w celu sztucznego wprowadzenia wirów optycznych w pole optyczne jako obiektów dominujących, tworzących określoną strukturę. Samo uzyskanie wirów optycznych, nieregularnie rozmieszczonych, nie jest trudne. Typowe pole optyczne zawiera dużą liczbę wirów optycznych, których występowanie jest ściśle związane z występowaniem spekli [22], [33]. Ta własność wirów optycznych określana jest zwrotem „generic” [34].

2.2.1. Metoda holograficzna

Metoda holograficzna jest niewątpliwie najpopularniejsza i najczęściej opisywana w literaturze [11], [29], [35], [36]. Do generowania wiązek z wirami stosowane są specjalnie zaprojektowane hologramy syntetyczne. Zaletą metody holograficznej jest jej wysoka elastyczność, dzięki czemu w łatwy sposób można zaprojektować hologramy generujące nawet skomplikowane układy wirów optycznych. Ponadto przy niewysokich wymaganiach, co do parametrów hologramów, procedura ta nie wymaga użycia wyspecjalizowanego sprzętu.

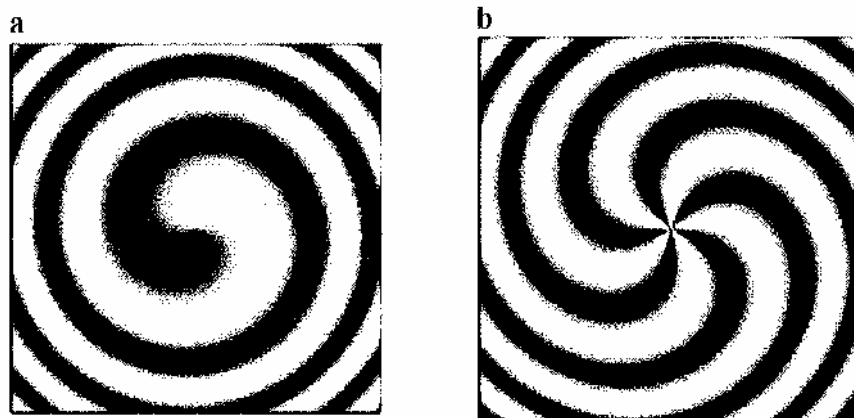
W metodzie holograficznej wiązka ulega dyfrakcji na specjalnie wytworzonym hologramie syntetycznym. Zamiast wytwarzać hologram klasyczną metodą zostaje on wygenerowany przy pomocy komputera (wyliczany jest układ prążków). Wydrukowanie tak powstałego układu prążków na folii, przy użyciu drukarki laserowej o rozdzielczości 600dpi, pozwala otrzymać hologramy o niskiej jakości nadające się na pokazy w pracowniach studenckich. Najwyższej jakości hologramy uzyskuje się dzięki zastosowaniu litografii elektronicznej. Obecnie dynamicznie zmieniające się struktury układów prążków w doświadczeniach uzyskiwane są za pomocą sterowanej komputerowo matrycy ciekłych kryształów.



Rysunek 2.6 Przykładowe hologramy do generacji wiru optycznego [24].

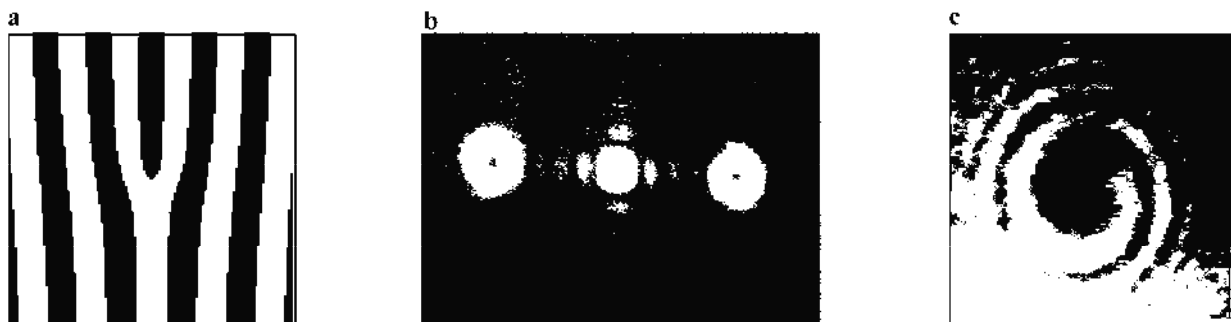
Rysunek 2.6 przedstawia charakterystyczną strukturę prążków. W punkcie, w którym znajduje się wir optyczny obserwujemy rozwidlanie się prążka. Taki kształt prążków nazywa się również „widelcem”. Rysunek 2.6 (w części a, b oraz c) ukazuje również, że w zależności od fazy początkowej rozwidlony prążek utworzony jest z minimalnego lub maksymalnego natężenia światła. Rozwidlający się prążek posiada symetryczny kształt, gdy różnica faz pomiędzy wiązką odniesienia a przedmiotową wynosi $\pi/2$. Rysunek 2.6d z kolei ilustruje różnicę w wyglądzie prążków powstałą po binaryzacji obrazu. Obserwujemy tu wyraźną granicę pomiędzy prążkami jasnymi a ciemnymi.

Poniżej (Rysunek 2.7) przedstawione są inne przykłady osiowych hologramów generujących: wir o ładunku 1 (Rysunek 2.7a) oraz wir o ładunku 5 (Rysunek 2.7b).



Rysunek 2.7 Przykład osiowych hologramów generujących wiry o ładunku (a) +1 oraz (b) +5 [24].

Jeżeli wygenerowany hologram oświetlimy wiązką rekonstruującą, to otrzymamy wiry optyczne w falach odpowiadającym kolejnym rzędom ugięcia. Wir optyczny znajduje się w wiązkach rzędów 1,2,3 itd. (w wiązce zerowego rzędu nie obserwujemy wiru).

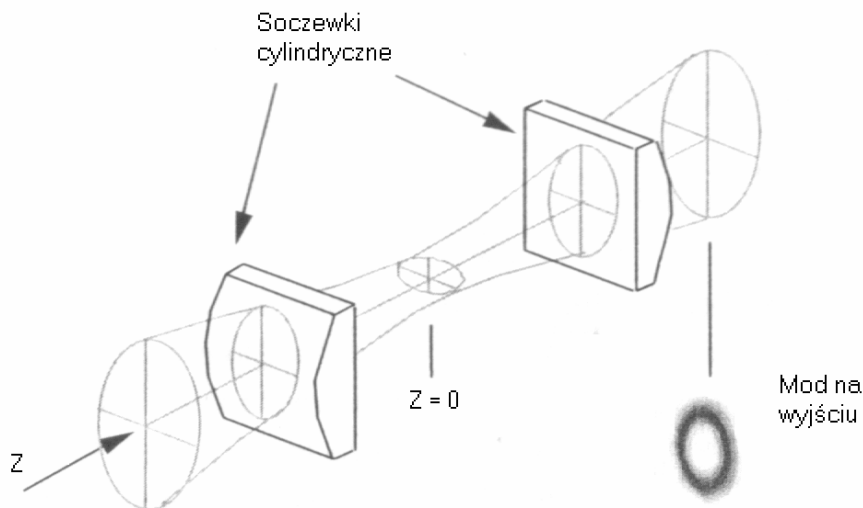


Rysunek 2.8 Przykład hologramu wygenerowanego komputerowo (a) oraz rekonstrukcji (b) poprzez oświetlenie go wiązką laserową. Przykład (c) przedstawia interferencję wiązki z wiru z płaską poosiową falą odniesienia [37].

Rysunek 2.8a przedstawia przykładowy hologram wygenerowany numerycznie i wydrukowany na folii. Rysunek 2.8b przedstawia obraz tego hologramu, przy oświetleniu wiązką laserową. W rzędzie $+1$ i -1 widoczne są nieciągłości w postaci czarnych punktów świadczących o obecności wirów w tych wiązkach. W wyższych rzędach, nie pokazanych na fotografii, generują się wiry o wyższym ładunku topologicznym, które w wyniku propagacji rozpadają się na grupy wirów o jednostkowym ładunku. Rysunek 2.8c przedstawia interferencję wiązki z wirem z płaską poosiową falą odniesienia. W wyniku tej interferencji otrzymujemy charakterystyczny spiralny kształt prążków.

2.2.2. Metoda soczewek cylindrycznych

Wiązkę z wirami optycznymi można również otrzymać używając dwóch jednakowych soczewek cylindrycznych [11], [21], [38], [39]. Wynik działania układu soczewek cylindrycznych można porównać do wyniku działania płytki ćwierćfalowej, która zamienia światło liniowo spolaryzowane na kołowo spolaryzowane. Na poniższym rysunku przedstawiony jest układ dwóch soczewek cylindrycznych, które wytwarzają helikalny front falowy.

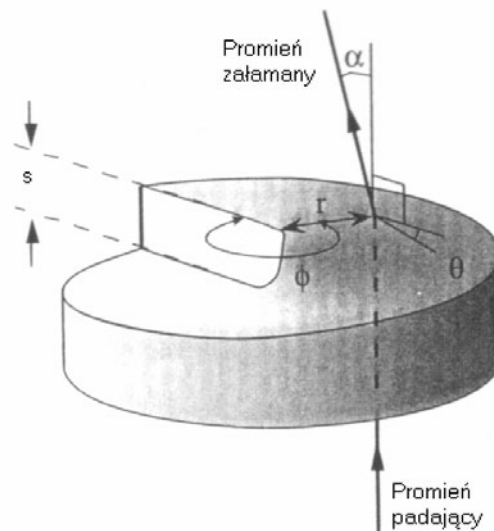


Rysunek 2.9 Układ dwóch cylindrycznych soczewek [21].

Soczewki cylindryczne o ogniskowej f , przedstawione na Rysunek 2.9, oddalone są od siebie o odległość równą $\sqrt{2} f$. W takim układzie z wejściowej wiązki Hermite – Gaussa (HG) otrzymujemy wiązkę Laguerre – Gaussa (LG^1_0). Jeżeli odległość między soczewkami zwiększymy do $2f$ to układ działa analogicznie do półfalówki, tzn. np. wejściową helisę lewoskrętną zamieni na prawoskrętną na wyjściu.

2.2.3. Metoda spiralnej płytki fazowej

W następnej metodzie helikalny front falowy uzyskiwany jest przy użyciu przezroczystej spiralnej płytki fazowej [21], [38], [40], [41] przedstawionej na poniższym rysunku.

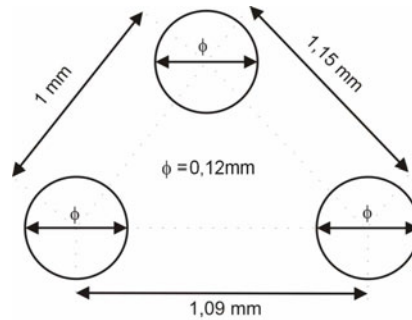


Rysunek 2.10 Spiralna płytka fazowa [21].

Przedstawiona powyżej (Rysunek 2.10) płytka fazowa zaprojektowana jest tak, że skok oznaczony literką s jest rzędu całkowitej krotności długości fali oświetlającej płytkę λ . Na rysunku tym pokazany jest bieg przykładowego promienia świetlnego biegnącego wzdłuż osi optycznej. Kąt θ określa krzywiznę skróconej powierzchni płytki. Kąt α określa odchylenie przykładowego promienia świetlnego po przejściu przez spiralną płytkę fazową od osi optycznej. Wadą skróconych płytek fazowych jest to, że należy wykonywać je na określonej długości fali. Ponieważ do generacji wirów najczęściej wykorzystuje się światło z zakresu widzialnego, więc używane długości fali są rzędu kilkuset nanometrów. Tak małe długości używanych fal stanowią dodatkowe utrudnienia w wykonywaniu skróconych płytek fazowych. Obecnie do wytwarzania spiralnych płytek fazowych stosowana jest technika ciekłych kryształów lub polimerów [42].

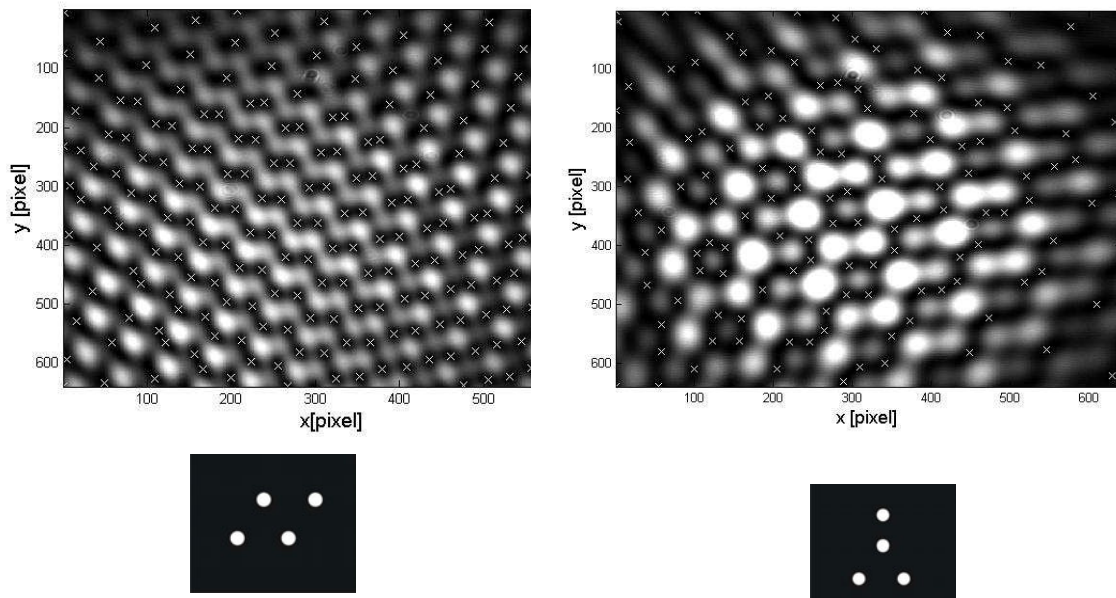
2.2.4. Metoda podziału frontu falowego

Następna metoda tworzenia wirów optycznych polega na podziale frontu falowego poprzez ustawienie na drodze wiązki laserowej płyty z otworkami. Przykładowe rozmieszczenie i wielkość otworków przedstawiane są na rysunku poniżej (Rysunek 2.11). Przy traktowaniu rozmieszczeniu otworów uzyskać można heksagonalną strukturę sieci wirów optycznych. Do generacji wirów optycznych wykorzystana została idea Young'a [43].



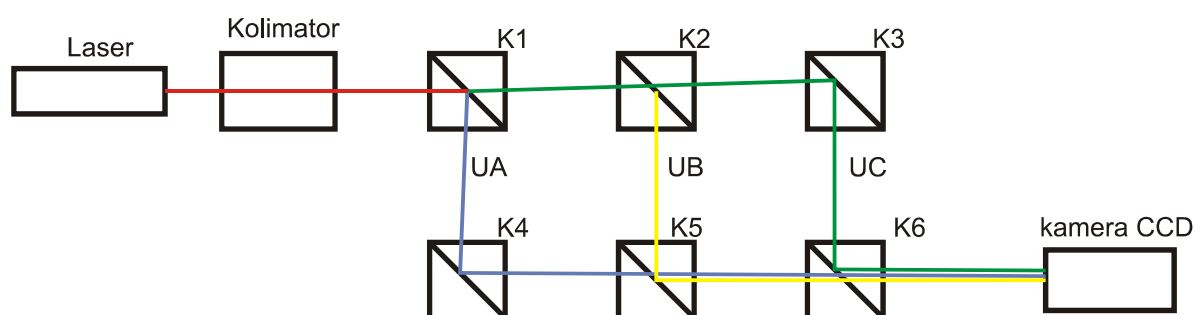
Rysunek 2.11 Przykład rozmieszczenia otworków i ich wielkości umożliwiające uzyskanie heksagonalnej struktury sieci wirów optycznych [44].

Poniżej (Rysunek 2.12) przedstawione zostały inne przykładowe struktury sieci wirów w zależności od rozmieszczenia otworów w płycie na drodze wiązki światła.



Rysunek 2.12 Przykładowe sieci wirów uzyskane przez podział frontu falowego za pomocą czterech otworków. Różne rozmieszczenie otworów i wynikowe obrazy interferencyjne [44].

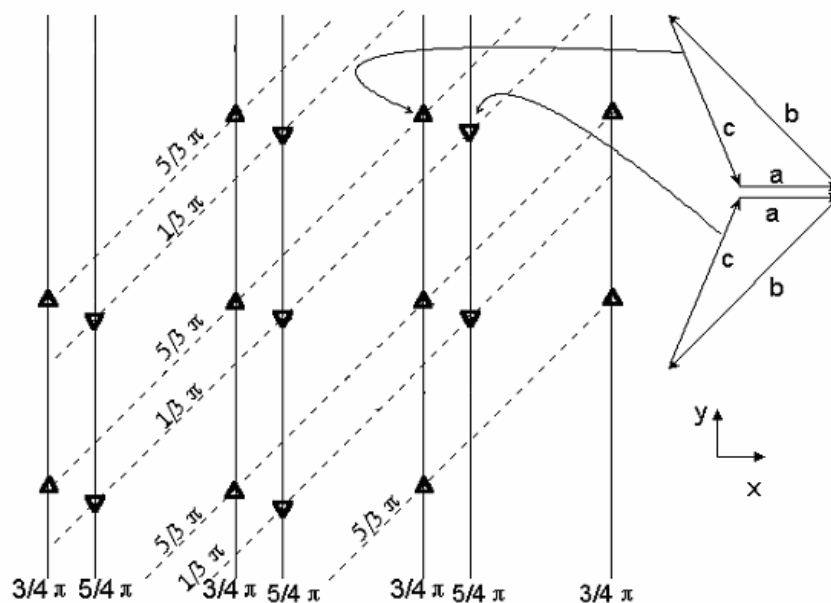
2.2.5. Metoda interferencyjna



Rysunek 2.13 Schemat układu interferometru do generacji sieci wirów optycznych. K1-K6 – kostki światłodzielnyc, UA, UB, UC – trzy fale płaskie.

Interferencja dwóch lub większej ilości fal może dać efekt taki, że amplituda wypadkowa w izolowanych punktach będzie wynosić zero. W takich punktach powstają wiry optyczne. Ze względu na zastosowania szczególnie ciekawy jest przypadek interferencji trzech fal płaskich. Umożliwia on powstanie regularnej sieci wirów optycznych [2], [45]. Powyżej (Rysunek 2.13) przedstawiony jest schemat ideowy układu interferometru wykorzystywanego do generowania sieci wirów optycznych. W układzie tym trzy wiązki o płaskich frontach falowych interferują ze sobą wzajemnie i wynik interferencji jest rejestrowany za pomocą kamery cyfrowej.

W interferencji dwóch fal płaskich zerowe natężenie jest możliwe tylko przy równych amplitudach tych fal, dodatkowo obszary o zerowym natężeniu tworzą linie. Ciekawszym może być przypadek interferencji trzech fal płaskich. Poniżej (Rysunek 2.14) pokazany jest schematycznie przykład wyniku nakładania się trzech fal płaskich o różnych amplitudach. Na rysunku tym zaznaczone trójkątami zostały punkty, w których natężenie wypadkowe wynosi zero na skutek sumowania się amplitud zespolonych trzech fal płaskich. Zerowy wynik sumowania amplitud możliwy jest tylko w dwóch konfiguracjach wartości faz poszczególnych fal. Obrazowo konfiguracje te pokazane są na rysunku jako trójkąty odpowiednio skorelowane z zaznaczonymi punktami wirowymi. Rysunek 2.14 został wykonany dla fal, których amplitudy wynosiły odpowiednio $A = 1$, $B = 3.3$, $C = 2.7$ oraz wektory falowe $\mathbf{k}_a(0, 0, k)$, $\mathbf{k}_b(0.01k, 0, k)$, $\mathbf{k}_c(0.01k, -0.01k, k)$.



Rysunek 2.14 Linie równej fazy (w płaszczyźnie obserwacji) trzech interferujących fal płaskich [46].

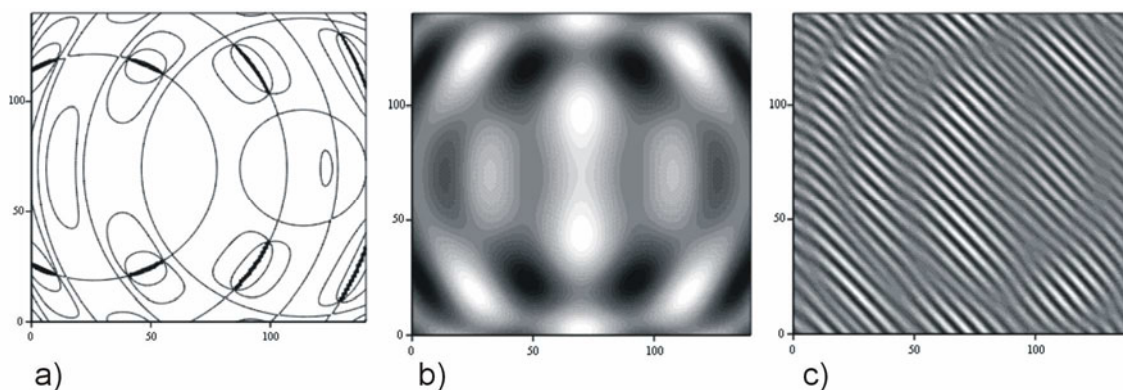
Gęstość linii równej fazy zależy od kąta nachylenia wektora falowego \mathbf{k} do osi Z. Orientacja tych linii na płaszczyźnie obrazu zależy od kąta pomiędzy wektorem falowym, a osiami X i Y. Orientację linii równej fazy wyznacza linia będąca przecięciem powierzchni falowej fali płaskiej i płaszczyzny obserwacji. W zilustrowanym powyżej przypadku (Rysunek 2.14) zakładamy, że fala UA pada prostopadłe do płaszczyzny rejestracji. Wzdłuż kierunku propagacji tej fali zorientowana jest oś Z. Druga fala pada pod pewnym, niewielkim kątem w stosunku do osi Z. Oś X układu współrzędnych zorientowana jest tak, aby była prostopadła do linii równej fazy wyznaczonej dla drugiej fali w płaszczyźnie obserwacji (ciągłe linie na rysunku). Trzecia fala pada pod innym kątem w stosunku do osi Z niż fala druga. Jej linie równej fazy, w płaszczyźnie obserwacji, wyznaczone są przez linie przerywane (Rysunek 2.14). W punktach, w których wektory amplitudy zespolonej fal tworzą trójkąt powstają wiry optyczne. Aby powstał trójkąt z wartości amplitud trzech interferujących fal, suma dowolnych dwóch wartości amplitud musi być większa od wartości trzeciej amplitudy [2].

W wyniku interferencji trzech fal płaskich powstaje charakterystyczna, regularna sieć wirów optycznych, której dokładniejszy opis znajduje się w rozdziale 6.1. Na poniższym rysunku (Rysunek 2.15) przedstawiono przykładowe wyniki interferencji trzech fal płaskich, uzyskane w symulacji numerycznej. Ciemne obszary o najmniejszym natężeniu, zawierające nieciągłości fazowe są rozdzielone. Pozwala to zorientować się, gdzie znajdują się wiry optyczne.



Rysunek 2.15 Rozkład natężenia powstały w wyniku interferencji trzech fal płaskich.

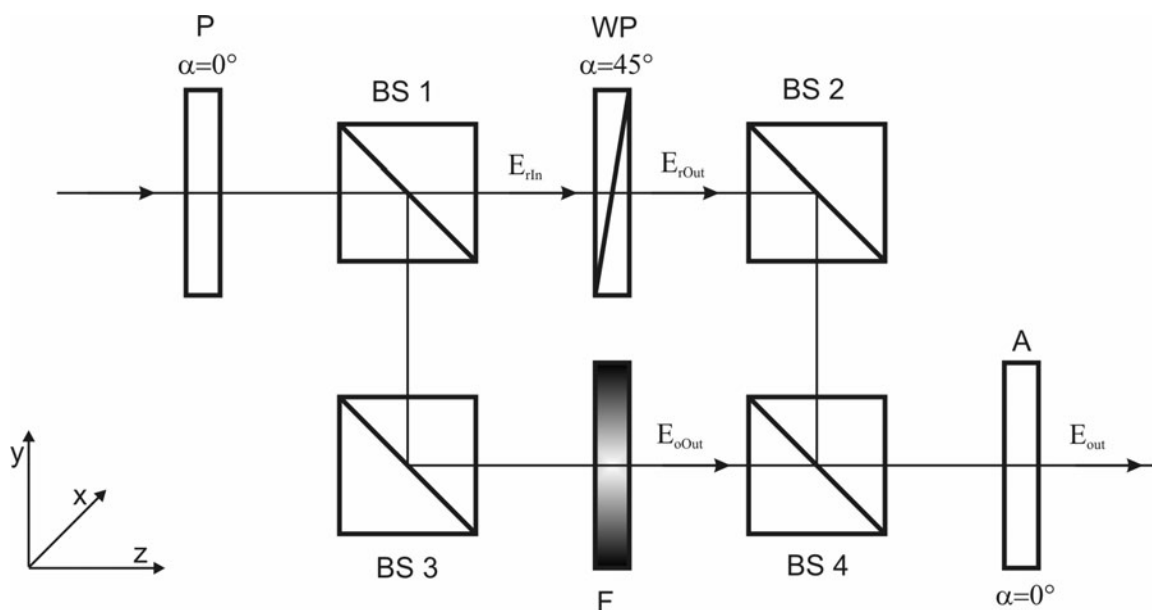
Możliwe jest uzyskanie sieci wirów optycznych o innej strukturze. Struktura sieci zależy od kształtu frontów falowych interferujących fal. Poniżej przedstawiony jest przykład symulacji numerycznej, w którym interferują ze sobą dwie fale płaskie oraz fala sferyczna.



Rysunek 2.16 Rozkład fazy (a) i natężenia (b) powstały w wyniku interferencji dwóch fal płaskich z falą sferyczną oraz rozkład natężenia (c) powstały w wyniku interferencji dwóch fal płaskich z falą sferyczną oraz wiązki odniesienia (na osi X i Y znajdują się odległości podane w pikselach – rozmiar piksela wynosi $9 \mu\text{m}$) [37].

Rysunek 2.16 przedstawia rozkład fazy a) i natężenia b) trzech interferujących fal (dwóch płaskich i jednej sferycznej) oraz wynik interferencji trzech fal z płaską falą odniesienia c) o amplitudzie trzykrotnie większej od amplitudy jednej z fal płaskich. Położenia powstałych wirów optycznych nie tworzą, tak jak w powyższym przykładzie, regularnej sieci. Można jednak dopatrzeć się pewnej prawidłowości w położeniach kolejnych par wirów optycznych po przeanalizowaniu rozkładu fazy. Obserwacja samego rozkładu natężenia trzech fal nie jest wystarczająca do wskazania położenia wirów optycznych.

Na rysunku poniżej (Rysunek 2.17) przedstawiony jest inny układ interferometru umożliwiającego generację regularnej struktury wirów optycznych. W przeciwieństwie do wyżej zaprezentowanego jest on stabilniejszy, ponieważ występują w nim tylko dwie drogi optyczne interferujących wiązek. Wykorzystane są natomiast w tym układzie elementy polaryzacyjne. Nie jest jednak możliwe w układzie tym uzyskanie wszystkich czterech obrazów interferencyjnych wymaganych przez niektóre z opisywanych metod lokalizacji wirów optycznych (rozdział 4). Dokładny opis przedstawionego układu można znaleźć w pracy autorstwa P. Kuzynowskiego W.A. Woźniaka i E. Frączek [47].



Rysunek 2.17 Schemat interfeferometru WP- pryzma wollaston'a, P - polaryzator, A- analizator, F – filtr transmisyjny, BS1-4 - kostki światłodziące [47].

3. Możliwości wykorzystania wirów optycznych

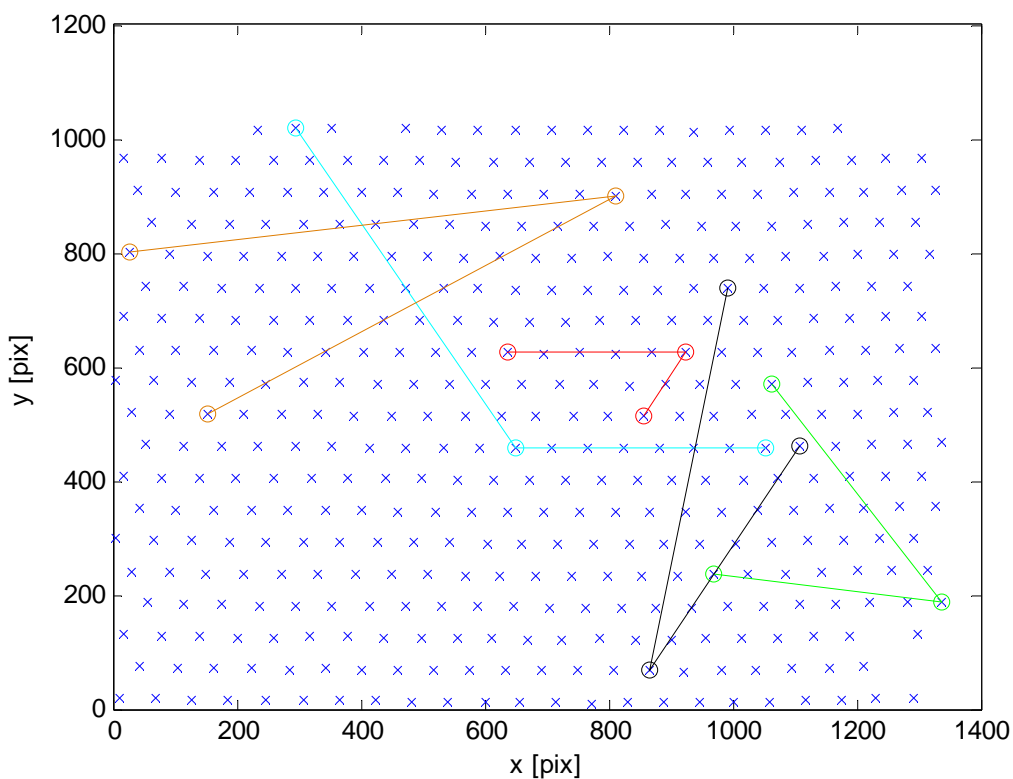
Ze względu na specyficzne właściwości wirów optycznych możliwe jest ich wykorzystanie w wielu zastosowaniach. Dla przykładu wiązki z wirem optycznym mogą być przydatne w astronomii jako filtry stosowane przy obserwacji obiektów w okolicy gwiazdy [4]. W mikrobiologii są wykorzystywane urządzenia zwane manipulatorami optycznymi [3], w których wykorzystywany jest moment pędu przenoszony przez wiry optyczne do manipulacji niewielkimi obiektami. Prowadzone są również prace nad zastosowaniem wirów optycznych w nadrozdzielczej mikroskopii optycznej [5], [42], w technice światłowodowej do budowy sprzęgaczy [6] oraz do kodowania informacji w kryptografii kwantowej [7]. Kolejnym zastosowaniem wirów optycznych, najbardziej interesującym z metrologicznego punktu widzenia, jest Interferometria na Wirach Optycznych (IWO). W tej technice analiza obrazów interferencyjnych skoncentrowana jest na punktach nieciągłości fazy. Analizowane jest położenie (przemieszczenie) tych punktów. Należy zauważyć, że wykorzystywane do pomiarów mogą być wiry optyczne w polach speklowych [48], [49], jak również wiry optyczne sztucznie wprowadzone w pole interferencyjne.

Niniejsza rozprawa ogranicza się do wykorzystanie wirów optycznych w technice IWO, w której wiry optyczne są sztucznie wprowadzone w pole interferencyjne.

3.1. Możliwości wykorzystania wirów optycznych w pomiarach interferencyjnych

W zastosowaniu wirów optycznych w interferometrii można wyróżnić sposoby opierające się na wykorzystaniu tylko i wyłącznie współrzędnych punktów wirowych (lub względne położenie) oraz sposoby wykorzystania punktów wirowych w połączeniu z klasyczną interferometrią prążkową. Wykorzystanie wirów w połączeniu z analizą natężenia lub fazową interferogramów wymaga odpowiednich procedur numerycznych, koniecznych do połączenia otrzymanych danych z analizy interferogramu z informacją obliczoną z położenia punktów wirowych. Można w tych zastosowaniach wykorzystać istniejące procedury analizy obrazów interferencyjnych, dopracowywane od lat pod kątem jak najdokładniejszych wyników [50].

Wykorzystanie jedynie informacji o położeniu punktów wirowych w obrazie interferencyjnym do obliczenia wartości wielkości mierzonej, wymaga innych procedur numerycznych, które są sukcesywnie opracowywane [51]. Ponieważ są to procedury dopiero rozwijane nie zawsze uzyskiwane są konkurencyjne dokładności pomiarów w stosunku do już istniejących. Z informacji opisanych w niniejszej pracy oraz z czasopism zajmujących się pomiarami optycznymi można wyciągnąć wniosek, że metody analizy współrzędnych punktów wirowych w pewnych zastosowaniach rokuje uzyskanie dokładniejszych wyników, niż za pomocą istniejących metod analizy obrazów interferencyjnych. Przykład zbioru punktów wirowych do analizy można zobaczyć na rysunku poniżej (Rysunek 3.1).

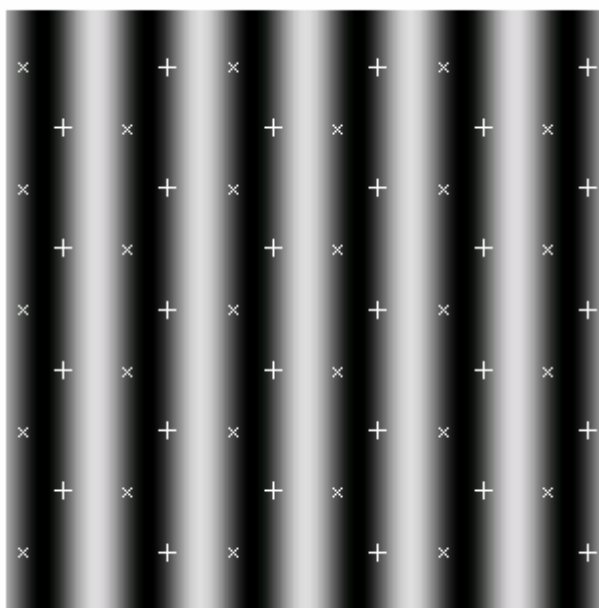


Rysunek 3.1 Przykładowe losowo wybrane położenia punktów wirowych połączonych po trzy (różne kolory), których względne położenie może być analizowane.

Analizę takiej sieci można przeprowadzić na różne sposoby w zależności od tego, jaka wielkość fizyczna jest mierzona. W przedstawionym powyżej przykładzie (Rysunek 3.1) pokazane jest położenie losowo wybranych punktów wirowych, które są łączone po trzy i ich wzajemne położenie jest analizowane. Takich zestawów po trzy punkty można wybrać bardzo wiele, co umożliwia stosowanie metod statystycznych w ocenie wyniku pomiarowego. Zestawy po trzy punkty można również tworzyć w sposób ściślej określony, tak jak w rozdziale o wykorzystaniu wirów optycznych do pomiarów małych kątów (rozdział 7.1),

gdzie dobierane są sąsiednie punkty wirowe. Innym podejściem do analizy struktury sieci wirów jest określenie komórki podstawowej struktury i następnie analiza parametrów takich komórek w całej sieci (rozdział 6.1). Istotna z metrologicznego punktu widzenia jest również możliwość określenia względnej różnicy położenia punktów wirowych na dwóch obrazach interferencyjnych, dwóch różnych ekspozycji, bez obiektu badanego oraz z obiektem badanym w układzie pomiarowym.

Koncepcje wykorzystania nieciągłości fazowych jako znaczników fazy w połączeniu z tradycyjną analizą obrazów interferencyjnych przedstawia Rysunek 3.2. Na tym rysunku widać obraz interferencyjny uzyskany z interferencji dwóch fal płaskich (symulacja) z naniesionymi punktami odpowiadającymi położeniom punktów wirowych. Współrzędne naniesionych punktów są wyznaczane z analizy dodatkowych obrazów interferencyjnych, za pomocą procedur do lokalizacji wirów optycznych. W procesie dalszej analizy obrazów interferencyjnych, informacja o położeniu punktów, w których faza względna interferujących fal jest jednakowa i znana może być pomocna. We wszystkich punktach oznaczonych znakiem '+' jest ta sama wartość fazy względnej interferujących fal. Podobnie w punktach oznaczonych znakiem 'x'. Metody wykorzystania wirów optycznych w powyższy sposób nie są szczegółowo opisywane w niniejszej rozprawie, ponieważ główny nacisk położony jest na opracowanie metod wykorzystujących informacje o położeniu wirów optycznych, bez analizy całej powierzchni obrazów interferencyjnych.



Rysunek 3.2 Przykład nałożonych punktów wirowych na interferogram.

Niezależnie od sposobu wykorzystania nieciągłości fazowych w polu optycznym konieczne jest precyzyjne określenie ich centrów czyli punktów wirowych. Dokładność lokalizacji punktów wirowych jest kluczowym zagadnieniem w możliwości wykorzystania ich do celów pomiarowych. Porównanie kilku zaproponowanych metod lokalizacji wirów optycznych jest opisane w kolejnym rozdziale (rozdział 4). Istotną cechą wirów optycznych, którą można wykorzystać, jest ich ładunek topologiczny. Określenie ładunku topologicznego daje dodatkową informację o fazie w polu optycznym. W klasycznych metodach określania kształtu frontu falowego występuje problem z określeniem, czy badany front falowy jest wypukły, czy wklęsły. Do określenia, które rozwiązanie jest poprawne, potrzebna jest dodatkowa informacja. Znajomość znaków ładunków topologicznych wirów optycznych pozwala jednoznacznie określić wypukłości i wklęsłości odtwarzanego frontu falowego i tym samym zniekształceń wnoszonych przez badany obiekt. W pracy zaproponowane zostały dwie metody określenia znaku ładunku topologicznego opisane w rozdziale 5.

3.2. Czynniki mające wpływ na dokładność

Na dokładność pomiarów z wykorzystaniem wirów optycznych ma wpływ wiele czynników, takich jak: rozdzielczość wykorzystywanej matrycy CCD, niejednorodności elementów optycznych w układzie pomiarowym, stabilność mechaniczna układu, stabilność częstotliwości lasera. Parametry kamery oraz elementów optycznych mają duże znaczenie niezależnie od wykorzystywanej metody lokalizacji wirów optycznych, ze względu na zaburzenia wprowadzane do rejestrowanej sieci wirów optycznych. Stabilność obrazu interferencyjnego w czasie ma szczególne znaczenie przy wykorzystaniu metod wieloeksperymentalnych. Oszacowanie wpływu wyżej wymienionych czynników na dokładność lokalizacji wirów optycznych, a tym samym na dokładność pomiarów, określa parametry jakie powinien spełniać układ optyczny do pomiarów z wykorzystaniem wirów optycznych.

3.2.1. Stabilność obrazów interferencyjnych

W pomiarach interferometrycznych najpopularniejszym typem lasera jest laser gazowy He-Ne emitujący światło czerwone ($\lambda_0 = 632,82 \text{ nm}$, $\nu_0 = 4,7 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$). W takim laserze szerokość połówkowa linii widmowej $\Delta\nu$ wynosi około 15 kHz, co daje drogę koherencji $c/\Delta\nu \approx 20 \text{ km}$ [53]. Droga pokonywana przez wiązkę laserową w układzie interferometru na wirach optycznych (ok. 3 m) oraz różnica dróg optycznych pomiędzy wiązkami (kilka cm), są pomijalnie małe w stosunku do drogi koherencji więc wpływ dekoherencji światła na wyniki pomiarów można pominąć. Niestety nie można pominąć dryftu częstotliwości lasera, który w przypadku niestabilizowanego lasera He-Ne wynosi ok. 600 MHz. Efekt płynięcia linii widmowej lasera objawia się przemieszczaniem prążków interferencyjnych (drganie w przypadku szybszych zmian). Do określenia jaka stabilizacja częstotliwości lasera jest wymagana w układzie IVO wykorzystano, specjalnie przygotowany przez producenta, laser He-Ne z układem stabilizacji oraz z możliwością wyłączenia tego układu stabilizacji. Przemieszczenie prążków w obrazie interferencyjnym odpowiada zmianie fazy pomiędzy interferującymi falami. Faza względna dwóch fal interferujących ze sobą może zostać wyrażona jak niżej:

$$\varphi_{ij} = (\omega t - \bar{k} \bar{r}_i) - (\omega t - \bar{k} \bar{r}_j) = \bar{k}(\bar{r}_j - \bar{r}_i) = \frac{2\pi}{\lambda} R_{ij}, \quad (3.1)$$

gdzie φ_{ij} – faza pomiędzy falą i-tą i j-tą, r – droga optyczna fali, λ – długość fali, R_{ij} - różnica dróg optycznych fali i-tej i j-tej.

Wynika z tego, że faza φ_{ij} może się zmienić, jeżeli zmieni się długość fali lasera lub różnica dróg optycznych. Różnica dróg optycznych w wykorzystywanym do badań układzie interferometru może wynosić około 2cm. Może się ona zmienić na skutek zmiany wymiarów liniowych układu spowodowanych zmianą temperatury materiału, z którego zbudowany jest układ pomiarowy. Rozszerzalność temperaturowa aluminium, na którym zamocowane są elementy optyczne, wynosi $23\mu\text{m}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. Stąd mamy równanie:

$$\Delta\varphi_{i,j} = \frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \cdot R_{i,j} \cdot 23 \cdot 10^{-5} \cdot \Delta T, \quad (3.2)$$

w którym ΔT oznacza maksymalną różnicę temperatury w trakcie rejestracji sekwencji interferogramów.

Przykładowe zestawienie dopuszczalnej zmiany temperatury w zależności od różnicy dróg optycznych i oczekiwanej dokładności przedstawiono w tabeli (Tabela 3.1). Zmiana temperatury masywnej podstawy interferometru w pomieszczeniu o stabilizowanej temperaturze, w trakcie rejestracji sekwencji obrazów (do kilku sekund), jest mniejsza niż 1mK więc nie powoduje przesunięć obrazu uniemożliwiających lokalizację nawet z dokładnością 0,25 piksela przy szerokości prążków 50 pikseli na zarejestrowanym obrazie. W celu umożliwienia lokalizacji punktów wirowych z dokładnością 1/100 szerokości prążka, w układzie o maksymalnej różnicy dróg optycznych 20 mm, zmiana temperatury układu nie może być większa niż 0,014K, co, na podstawie moich szacunkowych obliczeń, nie jest trudne do uzyskania w warunkach laboratoryjnych.

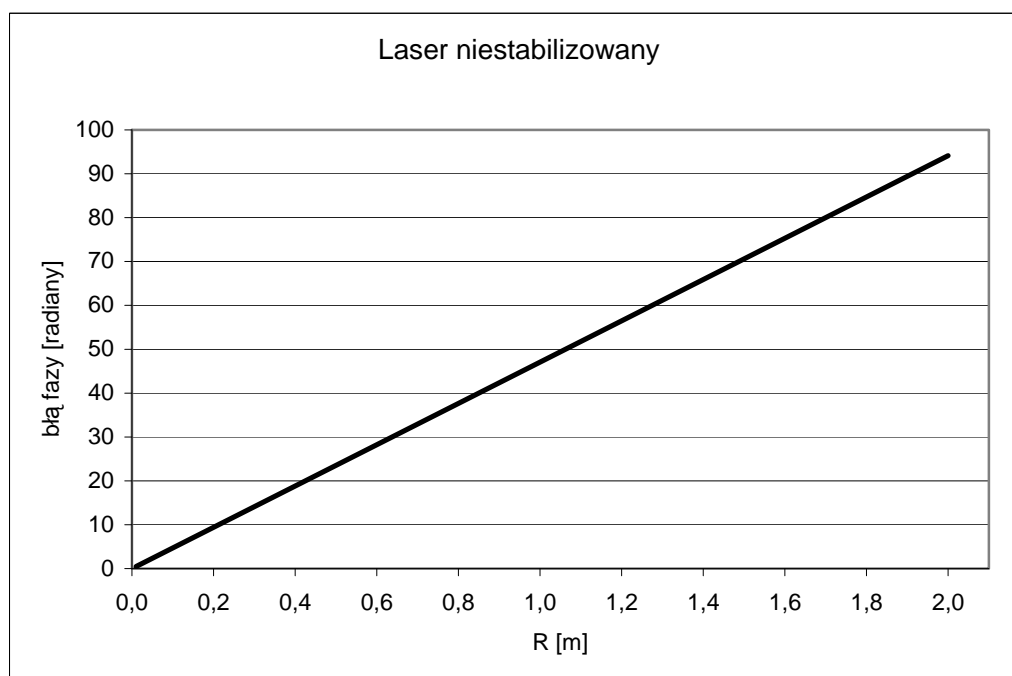
Tabela 3.1. Przykładowe zestawienie dopuszczalnej zmiany temperatury układu, w zależności od maksymalnej różnicy dróg optycznych występujących w układzie pomiarowym, dla wybranych założonych dokładności.

| | zmiany $< \lambda/10$ | zmiany $< \lambda/50$ | zmiany $< \lambda/200$ |
|----------------------------|---------------------------|----------------------------|----------------------------|
| $\Delta\varphi_{ij}$ [rad] | $< 0,628$ | $< 0,125$ | $< 0,031$ |
| $R_{ij}=20\text{mm}$ | $\Delta T < 0,14\text{K}$ | $\Delta T < 0,027\text{K}$ | $\Delta T < 0,007\text{K}$ |
| $R_{ij}=100\text{mm}$ | $\Delta T < 27\text{mK}$ | $\Delta T < 5,5\text{mK}$ | $\Delta T < 1,4\text{mK}$ |

| | | | |
|------------------------|---------------------------|----------------------------|----------------------------|
| $R_{ij}=1000\text{mm}$ | $\Delta T < 2,7\text{mK}$ | $\Delta T < 0,55\text{mK}$ | $\Delta T < 0,14\text{mK}$ |
|------------------------|---------------------------|----------------------------|----------------------------|

Zmiana fazy może być również spowodowana zmianą długości fali emitowanej przez laser. Zależność zmiany fazy od zmiany długości fali przy stałej różnicy dróg optycznych wyraża się zależnością (3.3), która w przypadku lasera He-Ne z częstotliwością środkową $\nu_0 = 4,7 \cdot 10^{14}$ Hz i dryfem 600 MHz w przybliżeniu jest linią prostą, jak to przedstawia Rysunek 3.3.

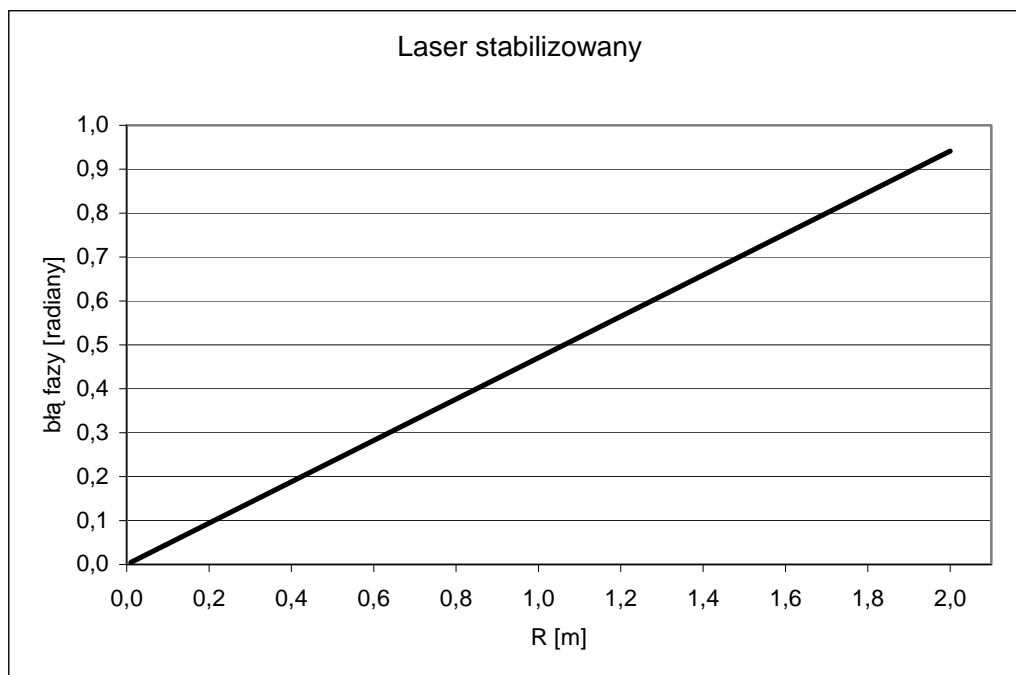
$$\Delta\varphi_{ij} = \frac{2\pi R_{ij}}{\lambda^2} \Delta\lambda, \quad (3.3)$$



Rysunek 3.3 Zależność pomiędzy różnicą dróg optycznych R, a błędem fazy wyznaczona dla lasera He-Ne niestabilizowanego.

Z wykresu przedstawionego powyżej (Rysunek 3.3) można odczytać, że jeżeli $R = 20$ cm to $\Delta\delta = 9,4$ radiana, czyli prążek interferencyjny może przesunąć się o półtora prążka. Dla $R = 2$ cm $\Delta\delta = 0,94$ radiana, czyli prążek interferencyjny może przesunąć się o około 1/6 prążka. Tak duże zmiany położenia prążków interferencyjnych uniemożliwiają zastosowanie wieloekspozycyjnych metod lokalizacji wirów optycznych ze względu na przemieszczanie się wirów w trakcie rejestracji kolejno obrazów interferencyjnych. Dlatego w układach pomiarowych prezentowanych w kolejnych rozdziałach został zastosowany

stabilizowany laser He-Ne. W przypadku lasera niestabilizowanego długość fali świetlnej rozchodzącej się w powietrzu wynosiła $\lambda_0 = 632,82 \pm 0,03$ nm, natomiast dla zastosowanego lasera stabilizowanego mamy $\lambda_0 = (632,8200 \pm 0,0003)$ nm. Rysunek 3.4 przedstawia zależność pomiędzy różnicą dróg optycznych R a błędem fazy, wyznaczoną dla lasera He-Ne stabilizowanego. Jak widać na wykresie tym dla $R = 20$ cm $\Delta\delta$ błąd fazy wynosi 0,094 radiana, a dla $R = 2$ cm $\Delta\delta$ wynosi 0,0094 radiana, czyli około 0,0015 prążka.



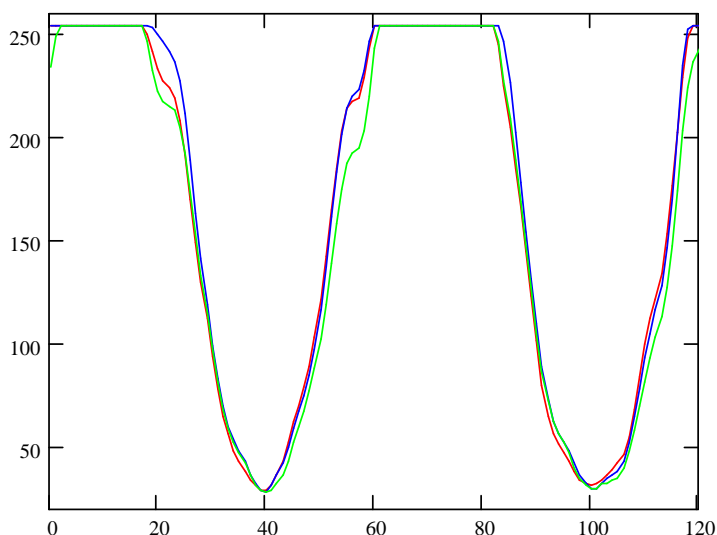
Rysunek 3.4 Zależność pomiędzy różnicą dróg optycznych R a błędem fazy, wyznaczona dla lasera He-Ne stabilizowanego.

W celu potwierdzenia wyników teoretycznych zostały przeprowadzone dwa eksperymenty.

Pomiar I – w układzie interferometru IWO

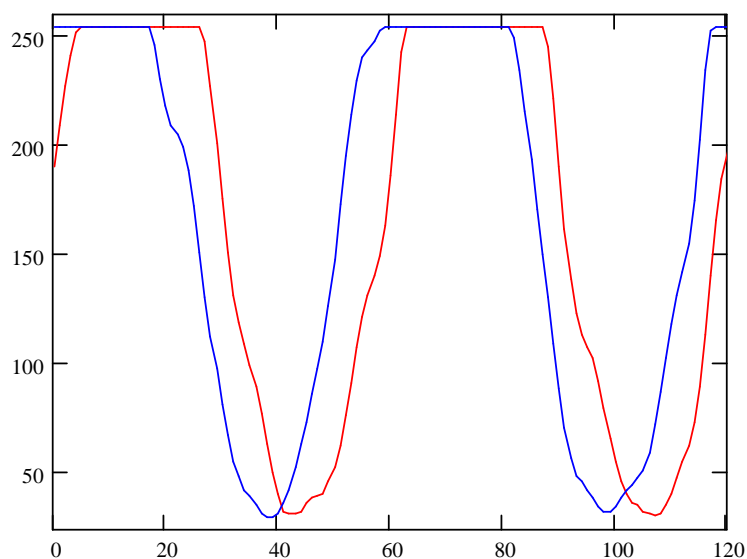
W układzie zasilającym moduł stabilizacji lasera został zamontowany wyłącznik, który służył do wyłączania układu stabilizacji temperatury oraz długości fali lasera bez konieczności przerywania pracy lasera. W układzie interferometru IWO jedna z wiązek została przysłonięta. Pomiedzy dwoma interferującymi falami UA i UC różnica dróg optycznych wynosiła około 2 cm. W wyniku interferencji fal płaskich UA i UC na elemencie CCD (576 x 768 pikseli) kamery pomiarowej powstało 13 prążków pionowych (czyli

szerokość jednego prążka wynosiła około 60 pikseli – 540 μm). Poniżej przedstawione są fragmenty przekrojów przez trzy zarejestrowane obrazy interferencyjne prążków pionowych, zarejestrowanych w różnych odstępach czasu (rejestracja interferogramów odbywała się przez 180 s w odstępach 5 sekundowych) zarówno z włączoną jak i wyłączoną stabilizacją pracy lasera.



Rysunek 3.5 Przekroje przez natężenie w prążkach interferencyjnych zarejestrowane na trzech interferogramach (kolor zielony – 25 sekunda, kolor czerwony – 50 sekunda, kolor niebieski – 130 sekunda) przy włączonej stabilizacji lasera He-Ne. Na osi X oznaczone są odległości w pikselach, na osi Y – 256 poziomów szarości natężenia światła.

Na rysunku powyżej (Rysunek 3.5) przedstawione są przekroje przez prążki z trzech różnych obrazów interferencyjnych przy włączonej stabilizacji częstotliwości lasera. Pomiarzy były wykonywane bez użycia filtra szarego osłabiającego wiązkę laserową, dlatego maksima interferencyjne są przesycone, co jednak nie ma wpływu na dalszą analizę. Jak wynikało z obliczeń teoretycznych, w przypadku, gdy różnica dróg optycznych wynosi 2 cm oraz stabilizacja lasera jest włączona, nie powinniśmy obserwować drgań prążków interferencyjnych (drgania około 0,09 piksela) i rzeczywiście drgań takich nie zaobserwowano (pomiarzy były wykonywane wieczorem, w dzień wolny od pracy, w celu wyeliminowania drgań pochodzących z zewnątrz). Dla tej samej konfiguracji prążków interferencyjnych została wykonana rejestracja interferogramów z wyłączoną stabilizacją lasera. Na poniższym rysunku przedstawione są przekroje przez dwa interferogramy, które zostały zarejestrowane w odstępie 65 sekund.

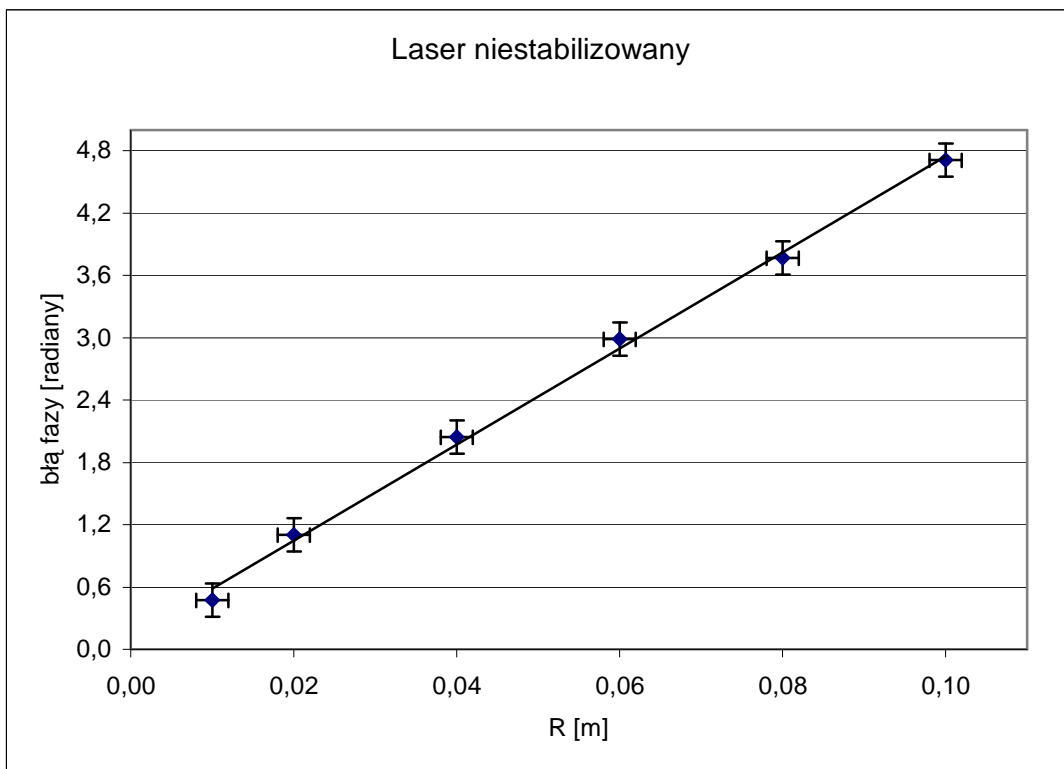


Rysunek 3.6 Przekroje przez natężenie w prążkach interferencyjnych zarejestrowane na dwóch interferogramach w odstępach 65 sekund przy wyłączonej stabilizacji lasera He-Ne. Na osi X oznaczone są odległości w pikselach, na osi Y – 256 poziomów szarości natężenia światła.

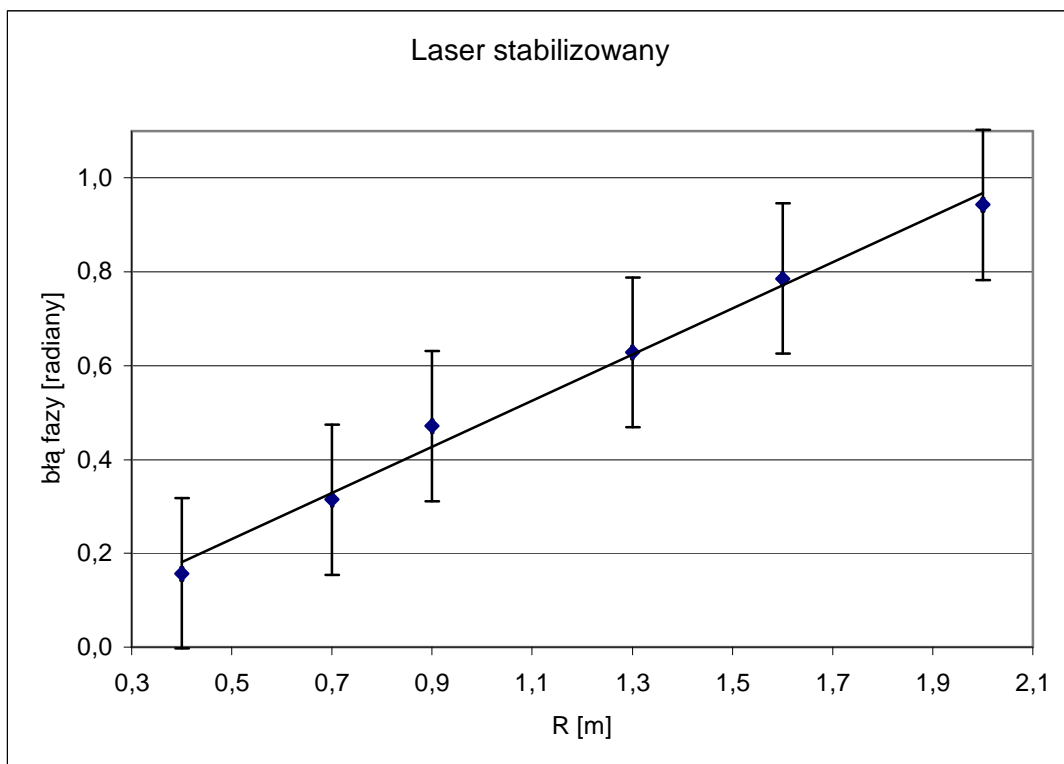
Rysunek 3.6 przedstawia dwa fragmenty przekrojów przez zarejestrowane natężenie w prążkach interferencyjnych, dla których różnice w położeniach minimów były największe (około 10 pikseli). Z obliczeń teoretycznych wynikało, że dla różnicy dróg optycznych wynoszącej 2 cm, w momencie, gdy układ będzie oświetlony promieniowaniem pochodzącym z lasera niestabilizowanego, prążki interferencyjne mogą wykonywać drgania o amplitudzie równej $1/6$ prążka. Różnica 10 pikseli w położeniach minimów interferencyjnych stanowi $1/6$ prążka, a więc pomiary potwierdziły przewidywania teoretyczne.

Pomiar II – w układzie interferometru Michelsona

Za pomocą prostego układu interferometru Michelsona został przeprowadzony pomiar, w którym obserwowano prążki interferencyjne o szerokości około 40 pikseli ($360 \mu\text{m}$). Pomiary drgań prążków interferencyjnych były wykonane dla kilku różnic dróg optycznych (od 1 cm do 10 cm dla wyłączonej stabilizacji oraz od 0,2 m do 2 m dla włączonej stabilizacji). Przy wyłączonej stabilizacji lasera pomiar położenia prążków był utrudniony szybkim przemieszczaniem się prążków interferencyjnych w płaszczyźnie obserwacji, dlatego na poniższym rysunku zostały przedstawione wyniki pomiarów dla różnic dróg optycznych mniejszych od 10 cm.



Rysunek 3.7 Zależność pomiędzy różnicą dróg optycznych R, a błędem fazy zmierzona dla lasera He-Ne niestabilizowanego.



Rysunek 3.8 Zależność pomiędzy różnicą dróg optycznych R, a błędem fazy zmierzona dla lasera He-Ne stabilizowanego.

Wyniki pomiarów przedstawione na wykresach (Rysunek 3.7 i Rysunek 3.8) tworzą zależności liniowe (wartość współczynnika korelacji R^2 bliska jest wartości jeden). Od grubości rejestrowanych prążków interferencyjnych zależy błąd pomiaru fazy. Dla prążków o grubości około 40 pikseli błąd pomiaru fazy ($\Delta\delta = 0,16$ radiana) jest większy niż dla prążków o grubości 60 pikseli ($\Delta\delta = 0,11$ radiana).

W tabeli 3.2 przedstawiono wyniki obliczeń teoretycznych mające zilustrować zależność dokładności lokalizacji wirów optycznych od wielkości różnicy dróg optycznych R.

Tabela 3.2 Zależność dokładności lokalizacji wirów optycznych od wielkości różnicy dróg optycznych R (szerokość prążka interferencyjnego wynosiła około 60 pikseli – 540 μm).

| Wielkość drgań [piksele] | < 1,00 | < 0,50 | <0,25 |
|--------------------------|-------------------------------|---------|----------|
| | <i>Laser stabilizowany</i> | | |
| R | < 20 cm | < 10 cm | < 6 cm |
| | <i>Laser niestabilizowany</i> | | |
| R | < 2 mm | < 1 mm | < 0,6 mm |

Z powyższej tabeli wynika, że jeśli w czasie pomiarów używany jest laser He-Ne bez układu stabilizacji, to niemożliwe jest lokalizowanie wirów optycznych, z użyciem metod wieloekspozycyjnych, z dokładnością mniejszą od 1 piksela (1/60 grubości prążka interferencyjnego), ponieważ różnica dróg optycznych powinna być mniejsza od około 2 mm. W przypadku, gdy w pomiarach używany jest laser stabilizowany różnica dróg optycznych wynikająca z budowy interferometru, wynosząca 2 lub 3 centymetry, nie wpływa na dokładność lokalizacji, ponieważ drgania wykonywane przez prążki są małe.

Z uwagi na występowanie różnicy dróg optycznych w interferometrze na wirach optycznych i na to, iż wiry optyczne mają być lokalizowane z dokładnością mniejszą niż $9\mu\text{m}$ (lub $6,4\mu\text{m}$ w przypadku drugiej, używanej w eksperymentach kamery), w układzie pomiarowym musi być użyty laser stabilizowany częstotliwościowo [54].

3.2.2. Zaburzenia frontu falowego i rozkładu amplitud

Użycie lasera stabilizowanego częstotliwościowo zapewnia wystarczającą stabilność obrazu interferencyjnego w czasie rejestracji, jednakże możliwość poprawnej lokalizacji punktów wirowych zależy również od innych czynników. Jak się okazuje w testach metod lokalizacji punktów wirowych opisanych w kolejnym rozdziale, na dokładność lokalizacji mają wpływ wartości amplitud interferujących fal, nierównomierności rozkładów natężeń w obszarze rejestrowanym oraz inne czynniki takie jak niejednorodności w układzie optycznym powodujące pasożytnicze interferencje [50]. Najlepiej, aby trzy fale UA, UB, UC, w wyniku interferencji których powstają wiry optyczne, miały jednakowe amplitudy. W obrazie interferencyjnym powstałym w wyniku interferencji trzech fal znajdują się punkty, w których natężenie odpowiada sumie trzech amplitud, oraz punkty o zerowym natężeniu (niezależnie od wartości amplitud jeżeli spełniony jest warunek, że każda amplituda jest mniejsza od sumy dwóch pozostałych). Z kolei w obrazach prążkowych wykorzystywanych do analizy, od wartości amplitud interferujących fal zależy kontrast obrazu.

Kiedy wszystkie wartości amplitud fal UA, UB, UC są sobie równe, trójkąt powstały w punkcie wirowym z amplitud zespolonych (graficzna reprezentacja sumowania wektorów) jest trójkątem równobocznym i różnice faz pomiędzy interferującymi falami są jednakowe. Jak się okazuje (rozdział 4.2), procedury lokalizacji dają najdokładniejsze wyniki właśnie wtedy, gdy wartości amplitudy są zbliżone. Maksymalna, akceptowalna rozbieżność wartości natężenia umożliwiająca lokalizację punktów wirowych z dokładnością lepszą niż wielkość pojedynczego piksela kamery to rozbieżność około 30% przy której wartość kontrastu wynosi 0,985. Wartość ta obliczona została z zależności [37]:

$$K = \frac{2\sqrt{I_1 I_2}}{I_1 + I_2} = 2 \frac{U_1 U_2}{U_1^2 + U_2^2} \quad (3.4)$$

gdzie I_n – natężenie, U_n – amplituda. Na różnicę w wartości natężeń poszczególnych fal ma wpływ podział wiązki laserowej w kostkach światłodzielnyc, użytych do budowy interferometru. Używane były niepolaryzacyjne kostki światłdzielące o dokładności podziału 5%. Dokładność ta jednak była zachowana tylko przy zachowaniu warunków w układzie optycznym, takich jak: określona polaryzacja światła wchodzącego do układu (polaryzacja liniowa prostopadła do płaszczyzny tworzonej przez układ sześciu kostek) oraz jednakowa liczba przejść przez kostki światłdzielące na wprost i pod kątem prostym dla każdej

z interferujących wiązek. Uwarunkowania musiały być spełnione ze względu na zmianę kąta polaryzacji światła po przejściu (odbiciu) przez kostki światłodzielące, spowodowaną z kolei użytymi do budowy kostek warstwami światłodzielącymi oraz przeciwodblaskowymi. Niespełnienie wyżej przedstawionego warunku powoduje duże (większe od akceptowanych) różnice wartości natężeń interferujących fal po przejściu przez układ kostek światłodzielących. Opis odpowiedzialnego za takie uwarunkowanie zjawiska można znaleźć w [37][55] i nie jest on dokładniej opisywany w niniejszej rozprawie.

Rozbieżności wartości natężenia interferujących fal poniżej 30% nie mają znaczącego wpływu na dokładność lokalizacji ze względu na wystarczający poziom kontrastu w obrazie interferencyjnym. Procedury numeryczne wykorzystywane do lokalizacji punktów wirowych nie adaptują swojego działania do zakresów natężeń występujących w analizowanych obrazach.

Trudniejsze w interpretacji są nierównomierności rozkładu natężenia w analizowanym obrazie interferencyjnym, wynikłe z pasożytniczych interferencji. Efektami utrudniającymi dokładną lokalizację punktów wirowych są takie czynniki jak wymienione poniżej.

a) Wolnozmiennie tło wynikające z rozkładu intensywności interferujących wiązek o gaussowskim rozkładzie amplitud [50]. Jako sygnał wolnozmienny, może być z obrazu interferencyjnego usunięte w znacznym stopniu poprzez cyfrową obróbkę danych, jednakże do uzyskania jak najdokładniejszych rezultatów lokalizacji wskazana jest wysoka jakość układu kolimacyjnego, wykorzystywanego w układzie interferometru na wirach optycznych.

b) Dodatkowe układy prążków o różnych częstościach przestrzennych spowodowane niejednorodnościami we wszystkich elementach układu optycznego, na które opracowane metody lokalizacji są w różnym stopniu wrażliwe, nie są one eliminowane we wstępnej obróbce obrazu.

3.2.3. Cyfryzacja obrazu

Do sprawdzenia zgodności przeprowadzonych analiz konieczne było przeprowadzenie pomiarów. Pomiary wykonywane były w układach optycznych, których schematy przedstawione zostały na zamieszczonych w niniejszej pracy rysunkach. Do rejestracji obrazów interferencyjnych wykorzystane zostały dwie monochromatyczne kamery cyfrowe.

Większość pomiarów wykonana została kamerą o rozdzielczości matrycy 768x576 pikseli. Wielkość pojedynczego piksela wbudowanej matrycy CCD to 9x9 μm . Rozdzielczość zastosowanego w tej kamerze przetwornika analogowo-cyfrowego wynosi 8 bitów. Parametry takie jak poziom nasycenia, prąd ciemny nie były znane. Obrazy wymagające lepszej jakości rejestrowane były przy pomocy kamery pomiarowej o rozdzielczości 1344x1024 piksele. Wielkość pojedynczego piksela: 6,45x6,45 μm , rozdzielczość przetwornika analogowo cyfrowego: 12 bitów, dynamika obrazu: 1800:1 (ze względu na czułość detektora i poziom nasycenia). Za pomocą tej kamery możliwa była rejestracja obrazów interferencyjnych z większą ilością punktów wirowych. Dodatkowo cyfrowy interfejs transmisji danych do komputera IEEE1394 zapobiegał błędom spowodowanym wielokrotnym przetwarzaniem sygnału z postaci analogowej na cyfrową i odwrotnie, w przeciwieństwie do poprzednio wspomnianej kamery, która wykorzystywała interfejs analogowy.

Głównymi czynnikami wynikającymi z cyfryzacji obrazu mającymi wpływ na dokładność opisanych w niniejszej pracy pomiarów są: szумы termiczne w przetworniku optoelektronicznym oraz przenikanie sygnału pomiędzy punktami o dużym natężeniu światła oraz sąsiadującymi o małym natężeniu światła [50]. Pierwszy czynnik ma charakter losowego wysokoczęstotliwościowego zakłócenia ograniczającego dynamikę obrazu, przez co minimalny rejestrowany poziom różni się od poziomu kwantyzacji obrazu. Zakłócenia tego typu są niewielkie w kamerach przeznaczonych do pomiarów. Są one, w razie potrzeby, korygowane w obrazie przez zastosowanie filtrów uśredniających (medianowych) w cyfrowej obróbce obrazu. Jednakże zakłócenia te mogą powodować powstawanie błędów kwantowania sygnałów o niewielkim natężeniu w okolicy punktu wirowego. Ponieważ istotnymi, z punktu widzenia opracowywanych metod pomiarowych, są punkty ciemne o minimalnym natężeniu, dlatego zalecane jest wykorzystanie kamery o jak najmniejszym poziomie szumu termicznego.

Drugi wspomniany czynnik zakłócający odpowiedzialny jest za zmianę profilu prążków interferencyjnych w zarejestrowanym obrazie w stosunku do rzeczywistego.

Występuje głównie przy dużej gęstości prążków kiedy sąsiednie punkty matrycy oświetlone są promieniowaniem o dużej różnicy natężenia. Opracowane metody lokalizacji wymagają obrazów interferencyjnych o szerokości około 55 pikseli, więc ten czynnik może zostać pominięty. Przy analizie obrazów z prążkami rozwidlonymi, w których gęstość może być znacznie większa, profil prążka nie ma znaczącego wpływu na wynik analizy.

Zmiana profilu prążków interferencyjnych może być również spowodowana nieliniowością charakterystyki przetwornika optoelektronicznego. I jest to czynnik niepożądany ponieważ nie zależy od szerokości prążków interferencyjnych i zmienia wartości fazy (obliczane na podstawie rozkładu natężenia) wykorzystywane w części z opisywanych metod lokalizacji.

Istotne dla dokładności pomiarów jest dobór natężenia interferujących fal do możliwości matrycy CCD. Do minimalizacji wpływu szumu termicznego wymagane jest jak największe natężenie światła, nie może ono jednak przekroczyć poziomu nasycenia detektora, ze względu na powstające w takiej sytuacji nieliniowości czułości detektora. Ponieważ w większości opracowanych metod lokalizacji punktów wirowych konieczna jest rejestracja obrazów interferencyjnych o różnych natężeniach (I_{ABC} oraz I_{AB} , I_{BC} , I_{CA}), należy uwzględnić maksymalne wartości (I_{ABC}). Pozostałe obrazy będą ograniczone mniejszą ilością poziomów kwantyzacji, co negatywnie wpływa na dokładność pomiarów. Ten problem nie występuje w przypadku wykorzystania do lokalizacji punktów wirowych metody widelców z przesunięciem fazy, w której rejestrowane są obrazy interferencyjne wszystkie o jednakowej dynamice.

4. Metody lokalizacji

W wyniku pracy SOG (Singular Optics Group) powstało i zostało opublikowanych sześć metod lokalizacji wirów optycznych:

- metoda minimów
- metoda amplitud
- metoda trójkątów
- metoda cosinusów
- metoda wektorów
- metoda widelców z przesunięciem fazy

SOG działa pod kierunkiem dr hab. Jana Masajady w Instytucie Fizyki Politechniki Wrocławskiej i zajmuje się zagadnieniami związanymi z nieciągłościami fazy w polu optycznym.

Ponieważ wyżej wymienione metody powstały w wyniku pracy SOG, dla określenia mojego udziału, podam dokładniej wkład wszystkich zaangażowanych w powstanie tych metod lokalizacji.

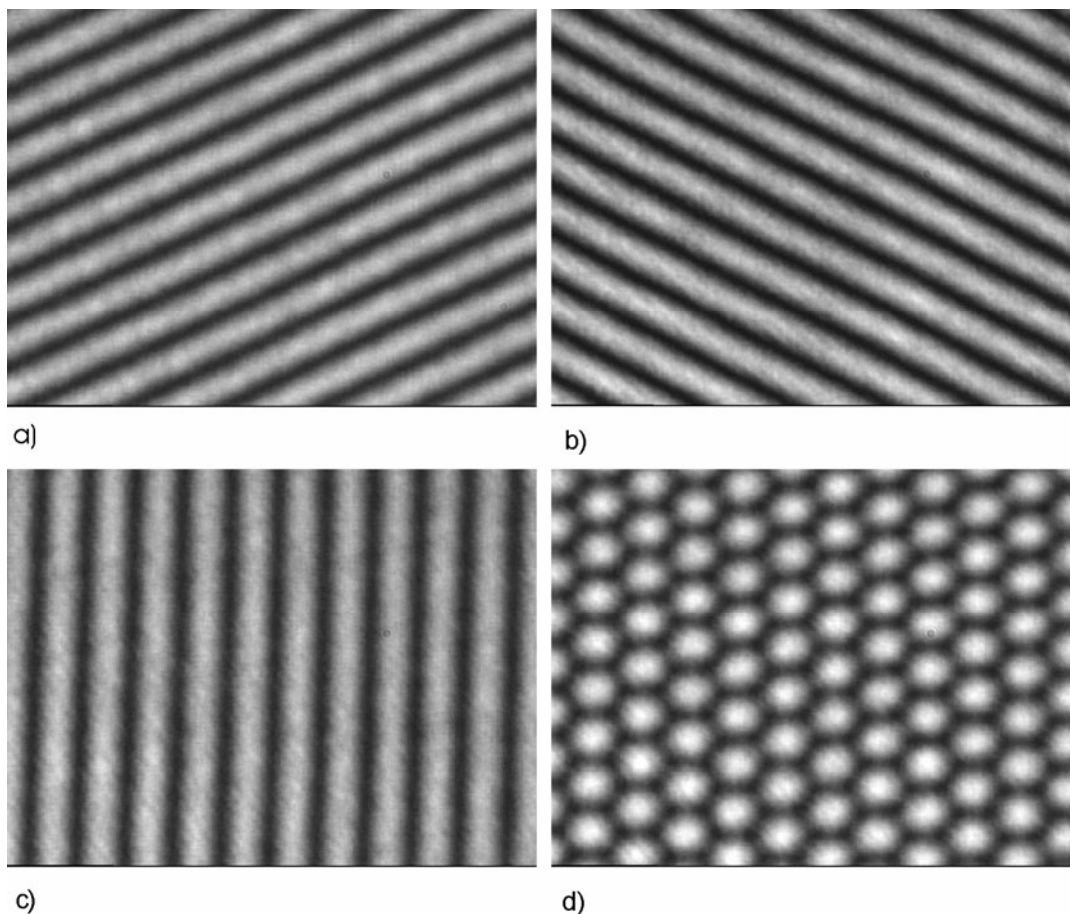
Metody trójkątów i wektorów zostały pierwotnie zaproponowane przez J. Masajadę i A. Popiołek-Masajadę. Metody te zostały dopracowane przez A. Popiołek-Masajadę i E. Frączek oraz przeze mnie. Metody minimów amplitud i cosinusów zostały opracowane przeze mnie oraz E. Frączek. Testy i modyfikacje tych metod zostały przeprowadzone również przeze mnie i E. Frączek. Wykorzystanie przesunięcia fazy zostało zaproponowane przez J. Masajadę, a metoda widelców z przesunięciem fazy została opracowana przeze mnie i przetestowana wraz z A. Popiołek-Masajadą oraz E. Frączek. Efekty zostały opublikowane w [51], [52].

4.1. Lokalizacja punktu osobliwego poprzez analizę jego otoczenia

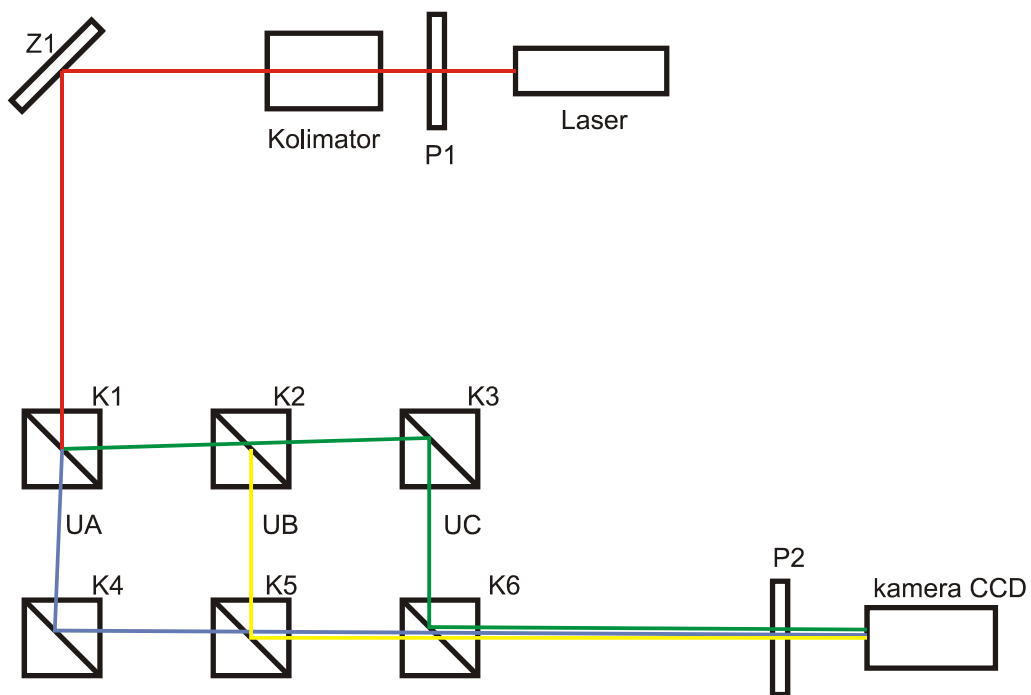
W literaturze można znaleźć kilka teoretycznych metod lokalizacji wirów optycznych [11],[25],[56] oraz doświadczalne metody lokalizacji wirów optycznych [24],[46],[48],[51],[57]. W punktach, w których występują wiry optyczne, obserwujemy minimum natężenia światła. Porównanie natężenia światła w poszczególnych pikselach detektora, w celu zlokalizowania punktu o minimalnym natężeniu światła, jest wrażliwe na szumy występujące w układzie pomiarowym i nie umożliwia lokalizacji z rozdzielczością mniejszą niż wielkość pojedynczego piksela detektora. Może więc ona być wykorzystana jedynie do zgrubej lokalizacji punktów osobliwych. Aby umożliwić jak najdokładniejszą lokalizację położenia wirów optycznych zastosowana została analiza otoczenia punktu wirowego, na podstawie której obliczane jest położenie punktu wirowego.

Metody amplitud, trójkątów, cosinusów i wektorów wymagają zarejestrowania czterech interferogramów (metody wieloekspozycyjne): I_{ABC} , I_{AB} , I_{AC} i I_{BC} (Rysunek 4.1). Interferogramy potrzebne do analizy rejestrowane były w układzie interferometru przedstawionego poniżej (Rysunek 4.2). W układzie tym, w celu uzyskania obrazów interferencji par wiązek, trzecia wiązka była przysyłana. Interferogram I_{ABC} wykorzystywany jest do wstępnej lokalizacji punktów wirowych we wszystkich wymienionych metodach. Wstępna lokalizacja realizowana była za pomocą metody minimów (jednoekspozycyjna). Ze względu na dokładność lokalizacji wyniki uzyskane przy pomocy metody minimów nie były wykorzystywane bezpośrednio w pomiarach z wykorzystaniem wirów optycznych. Dokładniejsza lokalizacja odbywa się na podstawie trzech pozostałych interferogramów I_{AB} , I_{AC} oraz I_{BC} w sposób zależny od metody lokalizacji. Poszczególne metody lokalizacji opisane są oddzielnie w kolejnych podpunktach niniejszego rozdziału.

Metoda widelców z przesunięciem fazy również należy do grupy wieloekspozycyjnych metod, ale wymaga zarejestrowania serii obrazów interferencyjnych czterech wiązek kolejno dla różnych faz jednej z interferujących fal. Układ pomiarowy oraz przykładowe obrazy interferencyjne przedstawione zostały w podpunkcie 4.1.6.



Rysunek 4.1 Zestaw przykładowych obrazów interferencyjnych. a) I_{AB} , b) I_{AC} , c) I_{BC} , d) I_{ABC} .



Rysunek 4.2 Układ interferometru wykorzystywanego do rejestracji interferogramów na potrzeby testów metod lokalizacji. K1-6 kostki światłdzielące, P1,P2 – polaryzatory, Z1- zwierciadło.

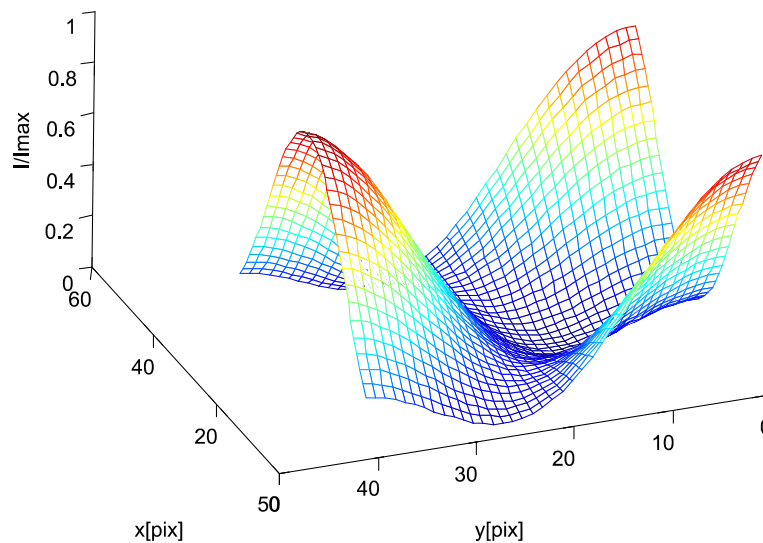
4.1.1. Metoda minimów

Ponieważ na brzegach zarejestrowanych obrazów mogą znajdować się zniekształcenia obrazu, obszary te zostają pominięte w dalszej analizie. Pominięcie obszarów przy krawędzi obrazu może być realizowane na etapie wstępnej obróbki lub w dalszych etapach poprzez pominięcie zlokalizowanych punktów w okolicach brzegów analizowanego obrazu. Kolejnym krokiem jest określenie i usunięcie tła. Z przeprowadzonych testów wynika, że poziom tła w zarejestrowanych obrazach interferencyjnych w wykorzystanym układzie zależy głównie od obszaru rejestrowanego względem apertury wiązek. Jednakże poziom tła nie jest jednorodny w obszarze analizowanym. W celu określenia poziomu tła badany obszar podzielony został na mniejsze obszary, w których określone było minimum natężenia odpowiadające najmniejszemu minimum lokalnemu w danym obszarze (dane z interferogramu I_{ABC}). Ponieważ w punktach wirowych natężenie powinno wynosić zero, dlatego różnica określana jest jako poziom tła. Obszar matrycy CCD, kamery wykorzystywanej w przeprowadzonych pomiarach, o wymiarach 7,2x5,4mm podzielony został na kilkanaście podobszarów potrzebnych do określenia poziomu tła. Tak uzyskanych kilkanaście wartości służyły jako dane wejściowe do interpolacji rozkładu natężenia promieniowania tła na cały obszar badany. Określony poziom tła następnie był odejmowany od wartości natężeń odczytanych ze wszystkich czterech zarejestrowanych interferogramów (I_{AB} , I_{BC} , I_{AC} , I_{ABC}). Tak przygotowane obrazy interferencyjne dwu-wiązkowe stanowią dane wejściowe dla dokładniejszych metod lokalizacji opisanych dalej. Natomiast interferogram I_{ABC} poddawany zostaje dalszej analizie.

Właściwa procedura lokalizacji minimów podzielona jest na etapy. W pierwszym etapie następuje odseparowanie, od siebie wzajemnie, obszarów zawierających minima lokalne. W tym celu wykonywana jest binaryzacja obrazu z określonym poziomem granicznym, punktom o natężeniu powyżej określonego poziomu przypisywane jest „0”, a punktom o natężeniu poniżej określonego poziomu wartość „1”. Poziom graniczny jest każdorazowo dobierany automatycznie tak, aby ilość obszarów zawierających minimum nazwanych wyspami była jak największa i jednocześnie obszary te były jak najmniejsze (ze względu na szybkość wykonywania dalszych operacji). Ze względu na możliwe zakłócenia obrazu do określenia poziomu granicznego nie są uwzględniane wyspy o bardzo małej powierzchni. W przeprowadzonych pomiarach powierzchnia ta odpowiadała 10-ciu pikselom matrycy. Poziom graniczny powinien być dobierany każdorazowo do zarejestrowanego obrazu, ponieważ ustalenie stałego poziomu może powodować, że obszary zawierające

minima nie zostaną rozdzielone w zależności od natężeń interferujących wiązek lub poziomu tła. W przypadku wykonywania serii pomiarów w zbliżonych warunkach poziom graniczny nie zmieni się i może być określony jednorazowo.

Wrażliwość na wartość poziomu granicznego wynika bezpośrednio z rozkładu natężenia w okolicy punktu wirowego, przedstawionego poniżej (Rysunek 4.3) na podstawie przeprowadzonych symulacji.



Rysunek 4.3 Rozkład natężenia w okolicy minimum lokalnego. $I/Imax$ - natężenie względem maksymalnego natężenia całego interferogramu. X, Y - współrzędne. $1\text{pix}=9\mu\text{m}$.

W następnym etapie lokalizacji w obszarach interferogramu I_{ABC} określonych przez wyspy określany jest pojedynczy punkt (w każdym z obszarów), w którym natężenie jest minimalne. W grupie tak wyznaczonych minimów mogą znajdować się minima nie odpowiadające położeniom punktów wirowych. Dodatkowo występujące minima natężenia są pomijane. O tym, które minima wysp zostaną pominięte decyduje ich odległość od sąsiednich. Ponieważ struktura sieci wirów optycznych powstałych przy interferencji trzech fal płaskich jest określona, nie mogą wystąpić wiry bardzo blisko siebie. W celu określenia odległości, w której wiry w takiej sieci nie mogą wystąpić określony został parametr:

$$odl = k \cdot \sqrt{\frac{P}{nw}} \quad (4.1)$$

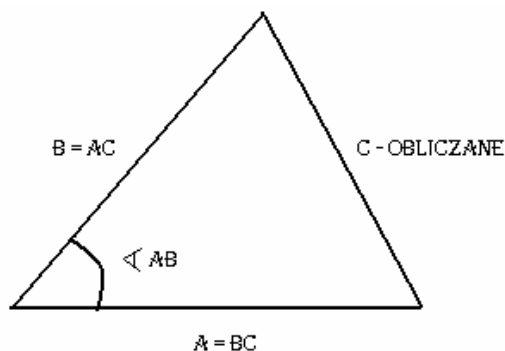
gdzie: P – powierzchnia analizowanego interferogramu, nw – ilość wszystkich wirów, k – współczynnik .

Parametr ten został wprowadzony ze względu na występujące zakłócenia w obrazie interferencyjnym powodujące w procesie analizy wydzielenie kilku wysp w bezpośrednim sąsiedztwie jednego punktu wirowego, i jego wprowadzenie wyeliminowało problem interpretacji takiego obszaru jako zawierającego kilka punktów wirowych. Wartość tego parametru zależy od gęstości sieci wirów i dzięki temu jedna procedura może być wykorzystywana bez modyfikacji do analizy obrazów z różną ilością wirów. Współczynnik k dobierany jest w zależności od stopnia deformacji sieci wirów oraz od jakości analizowanego obrazu. Większa dopuszczalna deformacja sieci wirów wymusza mniejszą wartość współczynnika k , co jest możliwe pod warunkiem wystarczającej jakości obrazu. Im więcej zakłóceń w obrazie tym większy współczynnik k . W przeprowadzonych testach metod lokalizacji wynosił 0,3.

Testy numeryczne metody minimów przeprowadzane na teoretycznie wygenerowanych i w różny sposób zaburzanych falach płaskich, wykazały, że zlokalizowane położenia wirów optycznych różnią się od rzeczywistych o mniej niż 3 piksele ($< 27\mu\text{m}$) [37], [51].

4.1.2. Metoda amplitud

W pierwszym kroku zastosowania metody amplitud następuje przeskalowanie wartości natężeń odczytanych z obrazów interwencyjnych I_{AB} , I_{AC} oraz I_{BC} w taki sposób, aby wartość minimalna wynosiła -1 a maksymalna 1 . W ten sposób uzyskane są wartości cosinusa fazy względnej pomiędzy falami odpowiednio U_{AB} , U_{AC} i U_{BC} . Następnie z interferogramów wydzielane są podobszary, które w środku zawierają punkty wyznaczone metodą minimów (rozdział 4.1.1). Kolejny krok to konstruowanie trójkątów z amplitud interferujących fal zgodnie z założeniem teoretycznym o zerowym natężeniu w punktach wirowych. Przykład konstrukcji takiego trójkąta znajduje się poniżej (Rysunek 4.4). W przykładzie tym wartości natężenia I_{BC} oraz I_{CA} odpowiadają długościom boków A i B, za wartość cosinusa kąta pomiędzy falami UA i UB jest przyjmowana wartość z interferogramu I_{AB} znormalizowana do wartości od -1 do 1 .



Rysunek 4.4 Ilustracja konstrukcji trójkątów z amplitud i cosinusa fazy względnej interferujących fal wykorzystywana w metodzie amplitud.

Z twierdzenia cosinusów obliczana jest długość boku C:

$$C = \sqrt{I_{BC} + I_{AC} - 2\sqrt{I_{BC} \cdot I_{AC}} \cdot \cos(\angle AB)} \quad (4.2)$$

Następnie wyznaczana jest różnica w wartościach pomiędzy wartością obliczoną C, a wartością odczytaną z interferogramu I_{AB} czyli $|C - AB|$. W analogiczny sposób wyznaczane są różnice wartości amplitud $|B - AC|$ oraz $|A - BC|$. Wszystkie operacje powtórzone są dla każdego punktu wcześniej wydzielonego podobszaru. W kolejnym kroku obliczana jest suma różnic wyrażonych w stosunku do długości odpowiednich boków trójkąta:

$$s = \left| \frac{C - AB}{AB} \right| + \left| \frac{B - AC}{AC} \right| + \left| \frac{A - BC}{BC} \right| \quad (4.3)$$

Suma przedstawiana równaniem 4.3 obliczana jest również dla każdego punktu wcześniej wydzielonego podobszaru zawierającego punkt wyznaczony za pomocą lokalizacji wstępnej w środku. Ostatni krok polega na znalezieniu najmniejszej wartości sumy (równanie 4.3) ze wszystkich punktów podobszaru. Położenie tej najmniejszej wartości odpowiada położeniu punktu wirowego.

Procedura jest powtarzana dla każdego punktu wyznaczonego wcześniej metodą minimów. W ten sposób lokalizowane są kolejno wszystkie punkty wirowe z całego obrazu interferencyjnego. Podobszary wokół punktu „podejrzanego” wydzielane są dla przyśpieszenia wykonania wszystkich obliczeń. Możliwe jest wykorzystanie metody amplitud bez wcześniejszej lokalizacji punktów „podejrzanym” metodą minimów. Takie rozwiązanie jest jednak bardzo czasochłonne, ponieważ wykonanie wymaganych obliczeń dla całego obszaru interferogramów wymaga wielokrotnie więcej czasu niż zastosowanie wstępnej lokalizacji, a następnie lokalizacji metodą minimów już tylko w określonych podobszarach. Ma to szczególne znaczenie przy zastosowaniu interpolacji, ponieważ wtedy ilość obliczeń znacznie wzrasta.

4.1.3. Metoda trójkątów

W pierwszym kroku metody trójkątów podobnie jak w metodzie amplitud następuje przeskalowanie wartości natężeń zarejestrowanych na interferogramach I_{AB} , I_{AC} oraz I_{BC} . Przeskalowanie odbywa się w taki sposób, aby wartości minimalne natężeń odpowiadały wartości 0, a wartości maksymalne odpowiadały wartości 255. Przeskalowanie to odbywa się dla każdego z wymienionych interferogramów oddzielnie. Następnie, tak jak w poprzednio opisanej metodzie, wydzielane są podobszary zawierające punkty wirowe na podstawie wyników lokalizacji wstępnej.

W kolejnym kroku obliczana jest różnica natężeń w każdym analizowanym punkcie podobszaru według zależności 4.4. Różnice te są wynikiem porównania długości boków trójkąta, który ze względu na przeskalowanie wykonane na początku powinien być trójkątem równobocznym w punkcie wirowym.

$$\begin{aligned} |AB - BC| &= T1, \\ |AB - AC| &= T2, \\ |AC - BC| &= T3. \end{aligned} \tag{4.4}$$

Powstałe w ten sposób macierze $T1$, $T2$, $T3$ stanowią dane wejściowe do następnego kroku opisywanej metody. Dla każdej współrzędnej z macierzy $T1$, $T2$, $T3$ wybierana jest wartość największa spośród wartości w tych trzech macierzach i zapisywana do nowej tablicy wynikowej W

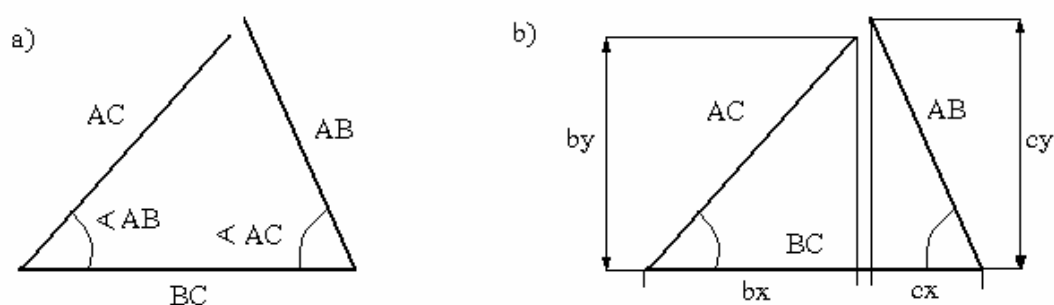
$$W = \text{maximum}(T1, T2, T3) \tag{4.5}$$

Położenie minimalnej wartości w macierzy W wskazuje położenie punktu wirowego w analizowanym podobszarze. Operacje powyższe są powtarzane dla kolejnych podobszarów w celu określenia położenia kolejnych punktów wirowych.

4.1.4. Metoda cosinusów

W metodzie cosinusów również w pierwszym kroku następuje przeskalowanie wartości natężeń interferogramów I_{AB} , I_{AC} oraz I_{BC} . Tak jak w przypadku wcześniej opisanej metody amplitud przeskalowanie jest takie, aby wartość minimalna wynosiła -1 a maksymalna 1 , w celu uzyskania wartości cosinusa fazy względnej pomiędzy falami odpowiednio U_{AB} , U_{AC} i U_{BC} . Następnie, wydzielane są podobszary zawierające punkty wirowe na podstawie wyników lokalizacji wstępnej w ten sam sposób co w poprzednio opisanych metodach.

W kolejnym kroku wybierany jest jeden z boków trójkąta za podstawę rzutów, np. bok A (BC) (Rysunek 4.5). Odcinki AB, BC, AC odpowiadają odpowiednio wartościom natężeń interferogramów I_{AB} , I_{BC} oraz I_{CA} , a wartości cosinusów kątów AB, BC, AC wartościom z interferogramów I_{AB} , I_{BC} oraz I_{CA} po przeskalowaniu.



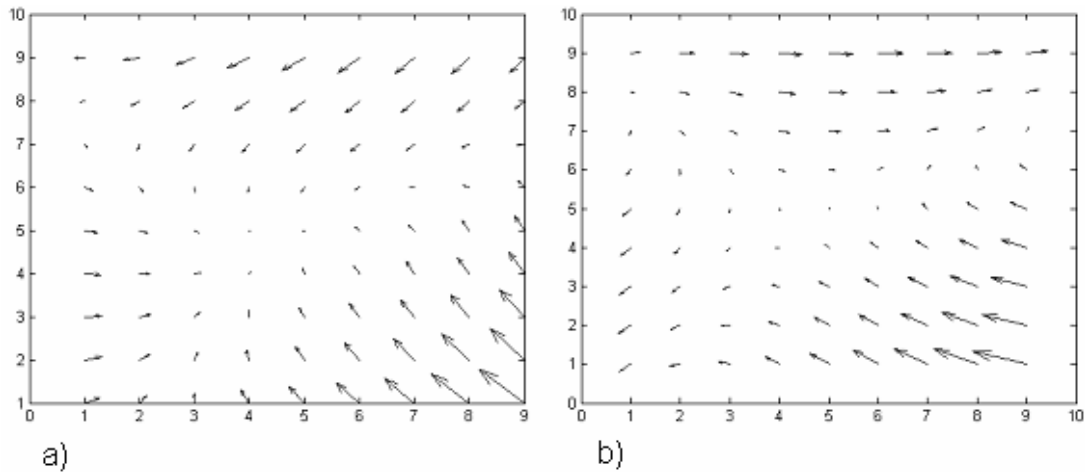
Rysunek 4.5 Ilustracja konstrukcji trójkątów z amplitud i cosinusów fazy względnej interferujących fal (a) oraz rzutów dwóch boków trójkąta na trzeci bok, wykorzystywana w metodzie cosinusów.

Na wybrany bok rzutowane są długości pozostałych boków „trójkąta” (figura z trzech odcinków, niedomknięta), co daje w wyniku wartości b_x oraz c_x (przykład). Następnie wartości b_y oraz c_y są wyznaczone przez rzut boków AB i AC na oś prostopadłą do wybranego boku. (Rysunek 4.5b). Następnie wyznaczone są wartości Δx_a i Δy_a z zależności:

$$\begin{aligned}\Delta x_a &= BC - (b_x + c_x), \\ \Delta y_a &= b_y - c_y.\end{aligned}\tag{4.6}$$

Wartości Δx_a i Δy_a obliczane są dla wszystkich punktów podmacierzy zawierających punkty podejrzane w środku. Wartości te są współrzędnymi wektora zwanego wektorem

pseudoamplitudy (\mathbf{paA}). W kolejnych krokach należy obrać za podstawę rzutów kolejne dwa boki trójkąta i powtórzyć czynności doprowadzające do otrzymania kolejnych współrzędnych wektorów pseudoamplitudy (\mathbf{paB} oraz \mathbf{paC}). Rysunek 4.6 przedstawia przykład rozkładu wektorów pseudoamplitudy w obszarze wiru optycznego.



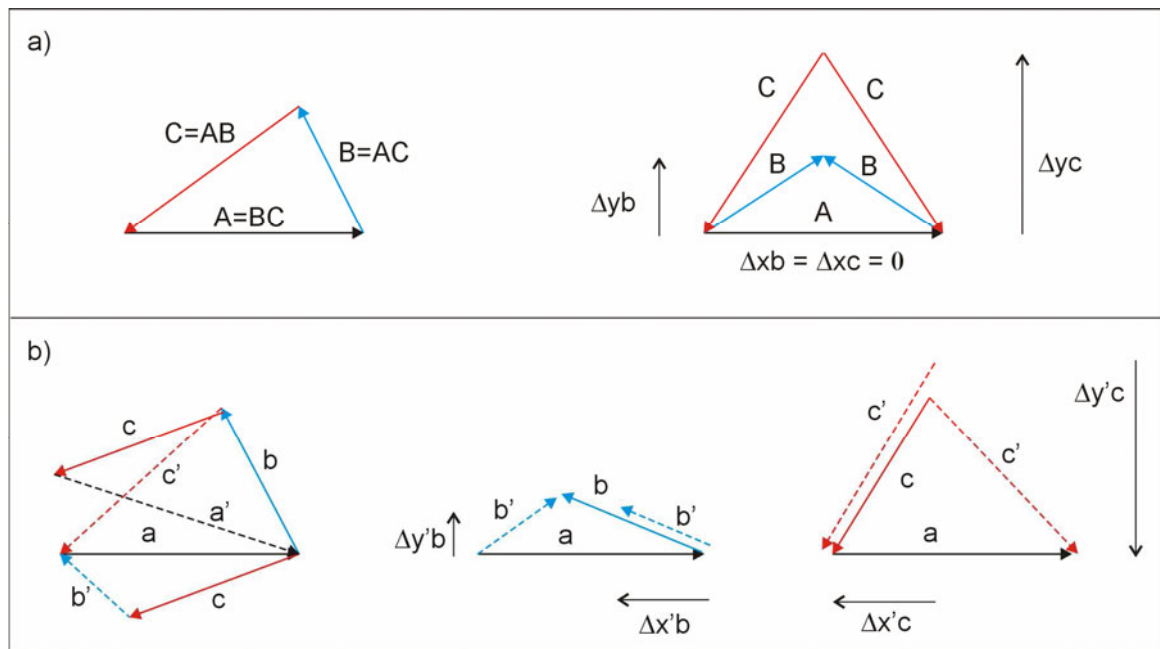
Rysunek 4.6 Ilustracja przykładowych rozkładów wektorów pseudoamplitudy w obszarze wiru optycznego.

Następnym krokiem jest analiza zmiany kierunku wektora pseudoamplitudy w otoczeniu punktu wirowego, osobno dla każdego bazowego boku trójkąta. Punkt wirowy będący centrum wiru optycznego znajduje się w miejscu, wokół którego zmiany kierunku wektora pseudoamplitudy są największe. Dla każdego wiru otrzymujemy trzy współrzędne położenia (rzuty na trzy boki trójkąta), które, po uśrednieniu, wskazują położenie punktu wirowego.

4.1.5. Metoda wektorów

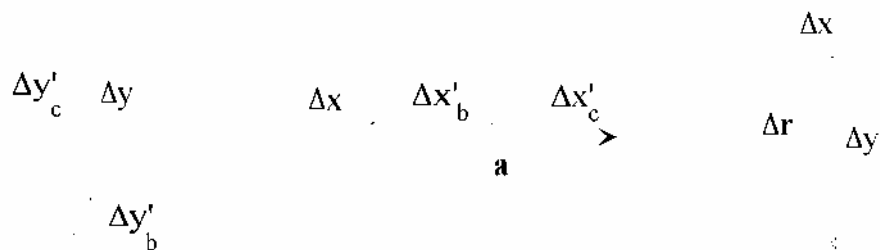
W pierwszym kroku w metodzie wektorów wyznaczone są amplitudy fal UA, UB i UC na podstawie wartości natężeń interferogramów I_{AB} , I_{AC} oraz I_{BC} . Następnie wydzielane są podobzary zawierające punkty wirowe na podstawie wyników lokalizacji wstępnej.

W kolejnym kroku należy wybrać jeden z boków trójkąta za podstawę nowego trójkąta, np. bok A (Rysunek 4.7a) i skonstruować dwa trójkąty o bokach B, A, B oraz C, A, C. Na Rysunek 4.7a dużymi literami oznaczona jest wartość amplitudy odczytanej w punkcie wirowym, natomiast małymi literami, oznaczone są wartości amplitud odczytane w pobliżu punktu wirowego (Rysunek 4.7b). W punktach znajdujących się w sąsiedztwie punktów wirowych dwa trójkąty zbudowane są z boków b' , a, b oraz c' , a, c.



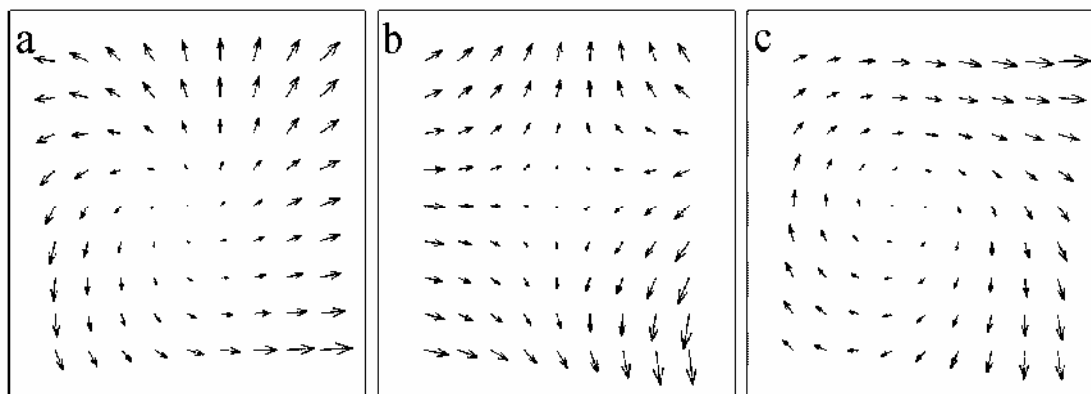
Rysunek 4.7 Ilustracja konstrukcji trójkątów z amplitud interferujących fal oraz rzutów wektora pseudofazy, wykorzystywana w metodzie wektorów. Przypadek a – amplitudy w punkcie wirowym, b – amplitudy w pobliżu punktu wirowego.

Na Rysunek 4.7 przedstawione są przykładowe konstrukcje odcinków Δy_b , Δy_c , Δx_b , Δx_c w punkcie nieciągłości oraz $\Delta y'_b$, $\Delta y'_c$, $\Delta x'_b$, $\Delta x'_c$ w sąsiedztwie wiru optycznego. Odcinki te służą do wyznaczenia składowych wektora, który jest nazywany dalej wektorem pseudofazy ($\Delta \mathbf{r}$). Poniżej (Rysunek 4.8) przedstawiona została zasada konstrukcji wektora pseudofazy z odcinków $\Delta y'_b$, $\Delta y'_c$, $\Delta x'_b$, $\Delta x'_c$ wyznaczonych na bazie boku A.



Rysunek 4.8 Ilustracja konstrukcji wektora pseudofazy wykorzystywana w metodzie wektorów.

W kolejnych krokach należy obrócić za podstawę rzutów kolejne dwa boki trójkąta i powtórzyć czynności doprowadzające do otrzymania kolejnych współrzędnych wektorów pseudofazy. Rysunek 4.9 przedstawia przykładowe rozkłady wektorów pseudofazy w otoczeniu wiru optycznego.



Rysunek 4.9 Ilustracja przykładowych rozkładów wektorów pseudofazy w otoczeniu wiru optycznego

Następnym krokiem jest analiza zmiany kierunku wektora pseudofazy w otoczeniu punktu wirowego, osobno dla każdego bazowego boku trójkąta. Punkt wirowy będący centrum wiru optycznego znajduje się w miejscu, wokół którego zmiany kierunku wektora pseudofazy są największe. Dla każdego wiru otrzymujemy trzy współrzędne położenia (konstrukcje dla trzech boków trójkąta), które, po uśrednieniu, wskazują położenie punktu wirowego.

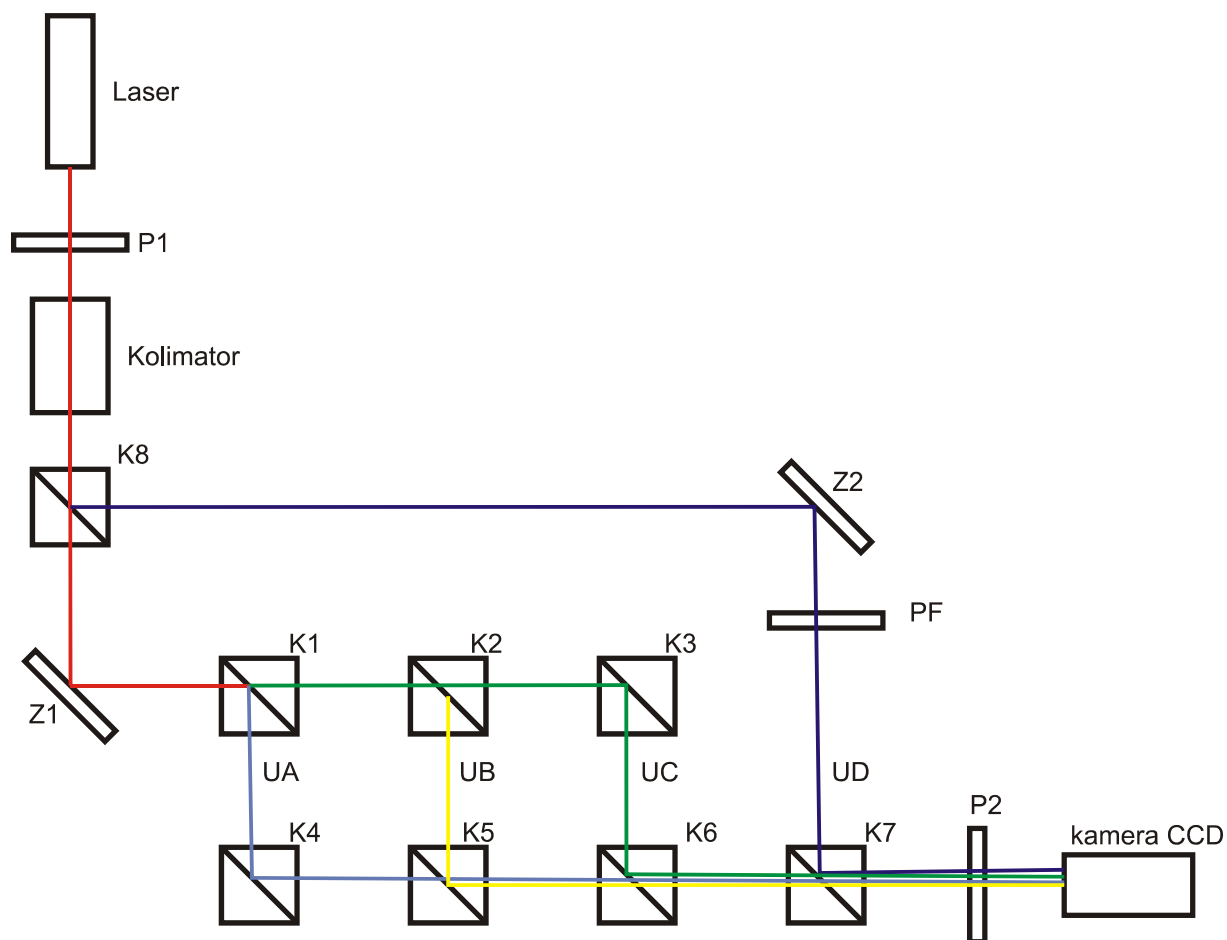
4.1.6. Metoda widelców z przesunięciem fazy

Metoda widelców z przesunięciem fazy wymaga zarejestrowania serii obrazów interferencyjnych czterech fal z czego trzy (UA, UB i UC), mają zbliżone wartości amplitud, czwarta (UD) natomiast ma amplitudę w przybliżeniu równą sumie trzech UA+UB+UC. Kąt pomiędzy tą wiązką a każdą z trzech pozostałych jest większy od kąta pomiędzy dowolną z UA, UB, UC. Układ pomiarowy przedstawiony jest na rysunku (Rysunek 4.10). Fala UD w układzie tym przechodzi przez sterowany cyfrowo przesuwnik fazy (PF), co umożliwia rejestrację serii obrazów z krokowo zmieniającą się wartością fazy fali UD. Przykładowy obraz interferencyjny przedstawiony jest poniżej (Rysunek 4.11). Charakterystyczną strukturą prążków w przykładowym obrazie jest rozwidlenie zwane również „widelcem”. Rozwidlenie powstaje w wyniku interferencji fali przenoszącej wir optyczny z falą płaską (Rysunek 5.6). Powstanie rozwidlenia w wyniku takiej interferencji oraz cechy powstałej struktury opisane są dokładniej w rozdziale poświęconym określeniu znaku ładunku topologicznego wiru optycznego (Rozdział 5.2). Do opisu procedury lokalizacji punktów wirowych w tym miejscu rozprawy nie jest konieczny dokładny opis rozwidlenia.

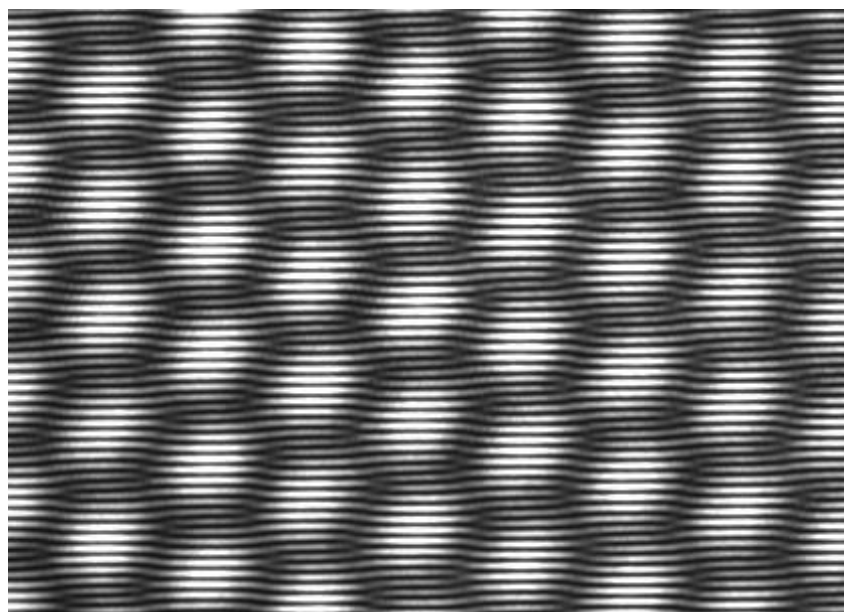
W pierwszym etapie metody lokalizacji punktów wirowych jest obliczany rozkład zmian natężenia na zarejestrowanym obszarze spowodowany przesunięciami fazy fali UD.

$$\Delta I = |I_2 - I_1| + |I_3 - I_2| + \dots + |I_n - I_{n-1}|, \quad (4.7)$$

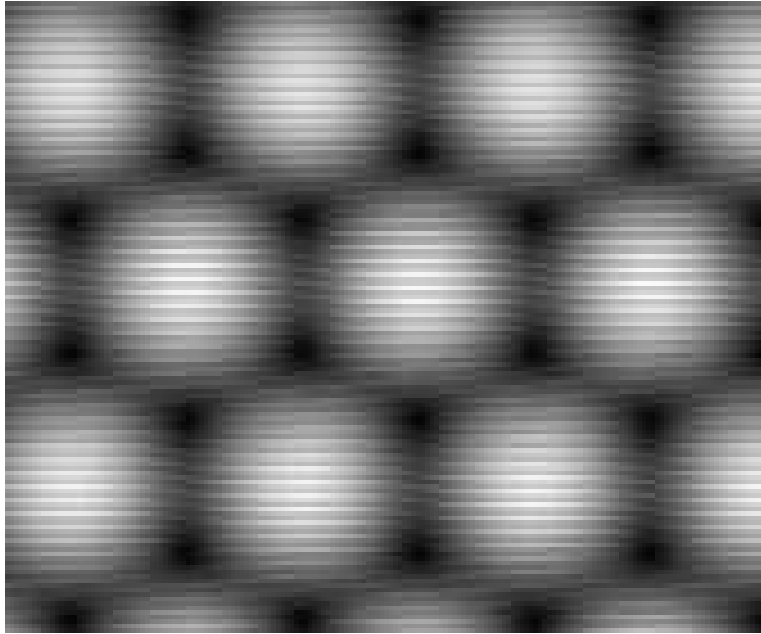
gdzie I_k – k-ty rozkład natężenia, n – ilość zarejestrowanych obrazów.



Rysunek 4.10 Układ pomiarowy do rejestracji obrazów interferencji czterech wiązek z możliwością przesunięcia fazy jednej z nich.



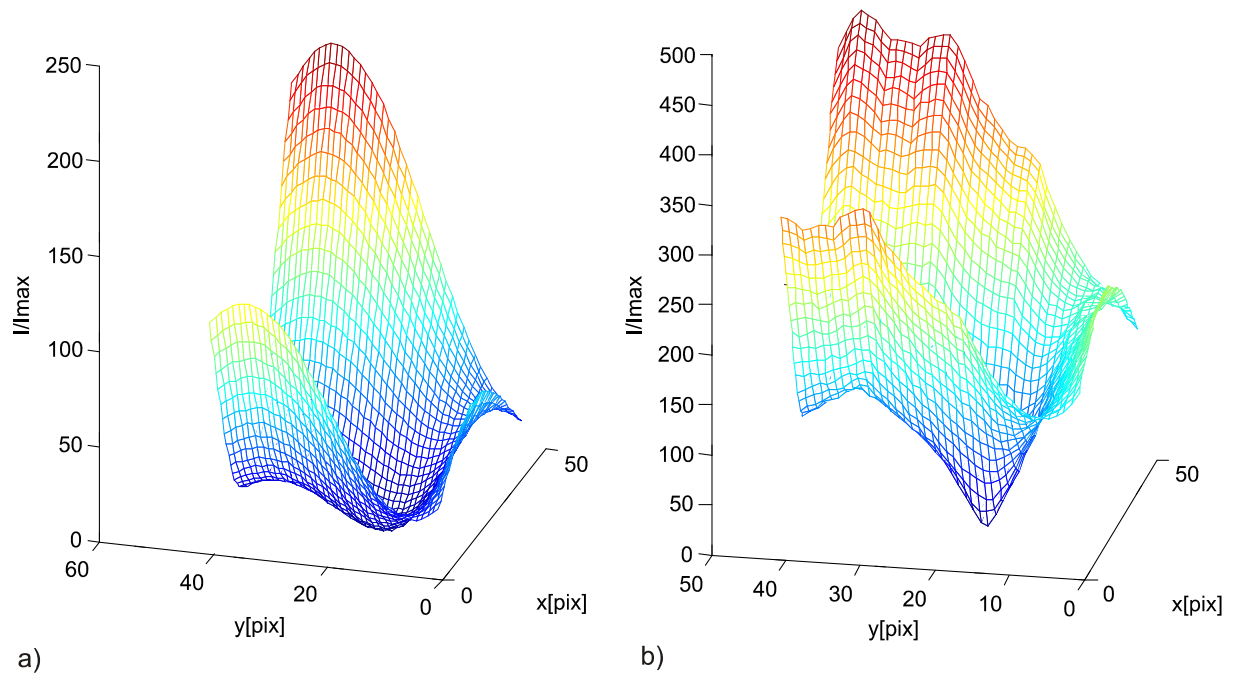
Rysunek 4.11 Przykładowy obraz interferencyjny, interferencji czterech wiązek o odpowiednio dobranych parametrach (eksperyment)



Rysunek 4.12 Rozkład zmian natężenia przy zmianie fazy fali UD

Ponieważ zmianie w kolejnych obrazach serii podlega faza fali UD, zaobserwować można przesunięcie prążków interferencyjnych w całym obszarze. Jednakże położenie „widelców” jest niezmiennie, ponieważ ich lokalizacja jest ściśle związana z położeniem punktów wirowych. Ponieważ w punktach wirowych natężenie światła rejestrowane przez detektor jest równe natężeniu fali UD i nie zależy od pozostałych trzech wiązek UA, UB, UC ($U_A + U_B + U_C = 0$ w punkcie wirowym), w tych punktach zmiany natężenia nie występują. Wynikiem pierwszego etapu działania opisywanej metody jest obraz, w którym występują zaciemnienia odpowiadające położeniu punktów wirowych (Rysunek 4.12).

Dalej działanie metody widelców z przesunięciem fazy jest analogiczne do działania metody minimów z tą różnicą, że minima lokalne są lepiej określone. Obszary ciemne są mniejsze i nachylenie powierzchni w okolicy punktów wirowych jest większe niż przy wykorzystaniu pojedynczego obrazu interferencyjnego trzech wiązek (Rysunek 4.13).



Rysunek 4.13 a) - rozkład natężenia wokół minimum lokalnego w obrazie interferencyjnym trzech wiązek, b) - rozkład zmian natężenia policzony dla tego samego obszaru zgodnie z opisem w tekście. Przesunięcie fazy $\pi/9$, ilość obrazów analizowanych: 18. (rozkłady uzyskane w wyniku symulacji)

4.2. Osiągnięte dokładności lokalizacji

Do określenia dokładności metod lokalizacji zostały wykonane symulacje interferencji trzech lub czterech fal wraz z przewidywanymi zaburzeniami w odpowiednim układzie optycznym (Rysunek 4.2 oraz Rysunek 4.10). Dzięki temu możliwe było porównanie wyników lokalizacji ze znanymi, teoretycznie określonymi położeniami punktów wirowych. Jako punkt odniesienia do określenia dokładności lokalizacji opracowanych metod, zostały przyjęte położenia punktów wirowych, zlokalizowanych w punktach zerowych, jednocześnie dla części rzeczywistej i części urojonej sumy interferujących fal UA, UB, UC. Dokładność określenia położenia punktów wirowych z danych teoretycznych to $1/10$ piksela kamery czyli $0,9 \mu\text{m}$. Takie określenie położenia punktu wirowego było możliwe tylko dzięki znajomości równań zespolonych fal UA, UB, UC. Wygenerowana została seria obrazów o rozdzielczości 768×576 pikseli, co odpowiadało matrycy CCD wykorzystywanej kamery. Wielkość jednego piksela tej kamery to $9 \times 9 \mu\text{m}$. Wartość ta przekłada się na dokładność określenia fazy liniowo, w zależności od szerokości prążków interferencyjnych (tym samym od gęstości sieci wirów optycznych). Zostało przeprowadzone porównanie działania opracowanych metod lokalizacji dla różnych szerokości prążków interferencyjnych od 42 do 73 pikseli oraz dla jednakowych i różnych amplitud interferujących fal. W przypadku różnych amplitud fal UA, UB, UC maksymalna różnica wynosiła ok. 10% co po przeliczeniu na różnicę natężeń wynosi ok. 20%.

W pierwszym etapie porównywane były wyniki działania metod lokalizacji na obrazie powstałym w wyniku interferencji fal o jednakowej amplitudzie bez zaburzeń. W wyniku działania wszystkich opracowanych metod punkty wirowe zlokalizowane zostały z błędem poniżej $\frac{1}{2}$ piksela ($4,5 \mu\text{m}$) niezależnie od gęstości prążków. W drugim etapie porównania interferujące fale miały różne amplitudy. W tym etapie wyniki lokalizacji metodami cosinusów i trójkątów również cechowały się błędem nie większym niż $\frac{1}{2}$ piksela. Natomiast w wyniku działania metod amplitud i wektorów błędy lokalizacji dochodziły do 1.5 piksela ($13,5 \mu\text{m}$) przy dużej szerokości prążków i około 1 piksel ($9 \mu\text{m}$) przy małej szerokości prążków. W trzecim etapie porównania do wyniku interferencji fal płaskich, zostały dodane zaburzenia w postaci dodatkowych fal o amplitudach nie przekraczających 5% wartości amplitud fal UA, UB, UC. W tym porównaniu zauważono wzrost ilości błędnie zlokalizowanych punktów wirowych, odpowiednio o 1 oraz 1,5 piksela w zależności od

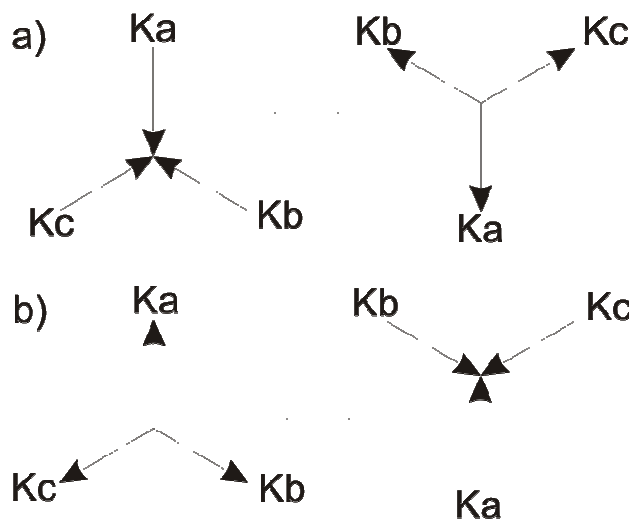
szerokości prążków, przy wykorzystaniu metod amplitud i wektorów natomiast pozostałe metody nie wykazały zwiększenia błędu lokalizacji powyżej 0,5 piksela. Można też było zauważyć, że największą dokładność lokalizacji wyrażoną w pikselach (ponad 90% punktów wirowych zlokalizowanych z błędem poniżej $\frac{1}{4}$ piksela – $2,25\mu\text{m}$) można było uzyskać przy szerokości prążków 55 pikseli (około 0,5mm) i węższych. W przypadku węższych prążków dokładność lokalizacji wyrażona względem szerokości prążka jest mniejsza więc zalecana szerokość prążków do przeprowadzenia pomiarów wynosi około 55 pikseli, co umożliwia zlokalizowanie punktów wirowych z dokładnością $0,04$ szerokości prążka ($0,04*2\pi[\text{rad}]$).

W celu porównania wyników działania metod lokalizacji, przeprowadzone zostały również pomiary w rzeczywistym układzie pomiarowym. Ponieważ lokalizacja punktów wirowych nie była znana „z góry”, zastosowano inny wyznacznik poprawności działania metody. Zlokalizowane położenia punktów wirowych przeniesione zostały na obrazy interferencyjne par wiązek AB, BC, CA, a następnie w tak określonych punktach, odczytane zostały z obrazu wartości natężenia. Z tak uzyskanych wartości natężeń obliczone zostały wartości fazy względnej pomiędzy falami. W punktach wirowych wartości fazy powinny przyjmować dwie wartości w zależności od znaku ładunku topologicznego wiru optycznego, w którego centrum znajduje się zlokalizowany punkt wirowy. Rozrzut uzyskanych wartości w obrębie jednej grupy jest zależny od dokładności lokalizacji punktów wirowych. W tym porównaniu metod lokalizacji można zauważyć najmniejszy rozrzut około $0,01*2\pi[\text{rad}]$ w wyniku działania metody trójkątów, następnie metoda amplitud – $0,05*2\pi[\text{rad}]$, cosinusów i wektorów około $0,15*2\pi[\text{rad}]$. Ponieważ w metodzie widelców z przesunięciem fazy obrazy interferencyjne par wiązek nie są rejestrowane, metoda ta nie została uwzględniona w tym porównaniu. Bardziej szczegółowy opis porównania metod lokalizacji (bez metody widelców) można znaleźć w pracy [37].

5. Określenie znaku ładunku topologicznego

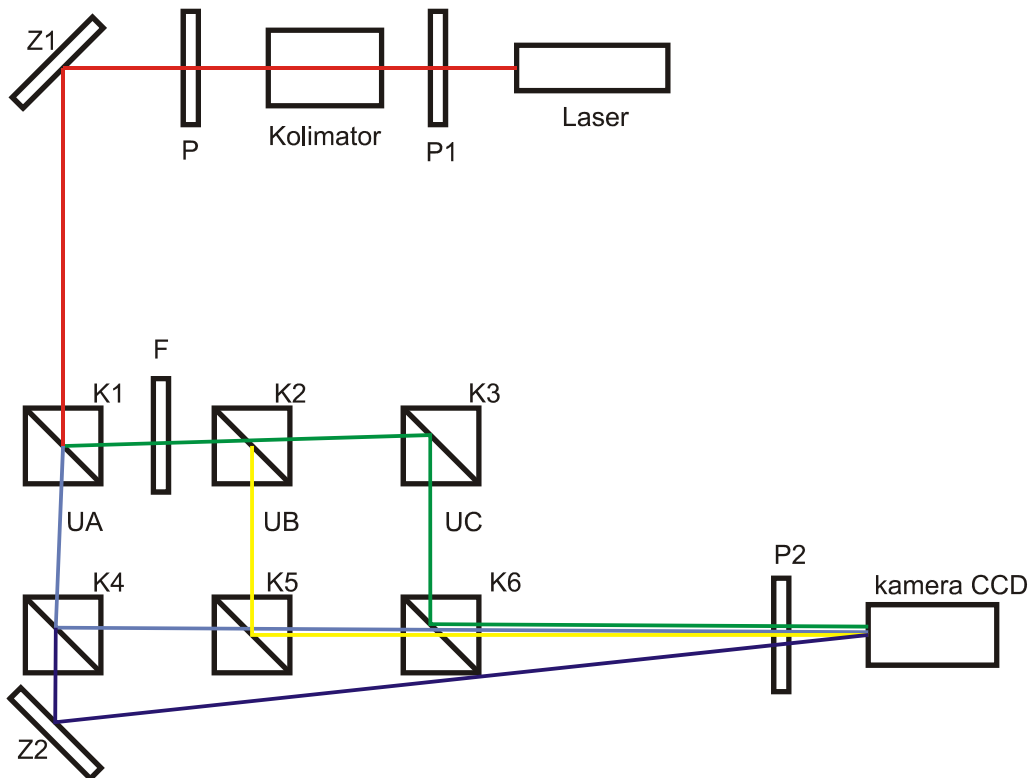
Znak wiru optycznego jest zdeterminowany, jak było to wspomniane w rozdziale 2.1, przez kierunek obrotu helikalnego frontu falowego [5], [11], [20]: jeśli front falowy ulega skręceniu zgodnie z kierunkiem ruchu wskazówek zegara, to znak wiru będącego w jego centrum jest dodatni, w przypadku lewoskrętnej helikoidy – wir ma znak ujemny. Znajomość znaku wiru optycznego rozwiązuje problem sklejanía fazy [58], [59] oraz jest pomocna przy rekonstrukcji frontu falowego. Cechy charakterystyczne frontu falowego (rozkład fazy wokół punktu wirowego) wirów optycznych [20], [22], [25], [38], [60] wspomniane w rozdziale 4 nie mogą być zastosowane bezpośrednio do danych doświadczalnych, ponieważ wymagają one znajomości funkcji amplitudy zespolonej. Jedną z doświadczalnych metod rozróżniania znaków wirów optycznych zaproponowała H.V. Bogatiryova [61]. Jest to metoda umożliwiająca rozpoznanie znaku wiru przenoszonego w wiązce Laguerre – Gaussa. W niniejszym rozdziale zostaną przedstawione i omówione dwie eksperymentalne metody rozróżniania znaków wirów optycznych rozmieszczonych w regularnej sieci powstającej w interferometrze na wirach optycznych [62], [63], [64], [65]. Metody te powstały ze znacznym udziałem autora, przy ścisłej współpracy z E. Frączek.

Informacje zawarte w interferogramach powstałych w wyniku interferencji trzech fal płaskich (I_{ABC} , I_{AB} , I_{AC} , I_{BC}) w interferometrze na wirach optycznych są niewystarczające do określenia znaków wirów optycznych, ponieważ dwa interferogramy przedstawiające dwie sieci wirów różniące się tylko znakami, są takie same. Dwa identyczne interferogramy przedstawiające sieci wirów o dwóch konfiguracjach znaków można uzyskać z interferencji trzech fal płaskich, w dwóch układach różniących się kierunkami rozchodzenia się tych fal. Rysunek 5.1 przedstawia dwa przykładowe ułożenia rzutów wektorów falowych na płaszczyznę obserwacji, w których powstają identyczne obrazy interferencyjne z wirami o przeciwnych znakach. W wyniku interferencji trzech fal płaskich, których kierunki rozchodzenia są takie jak pokazano (Rysunek 5.1 a) i b), powstają dwa identyczne interferogramy. Wiry optyczne wprawdzie w obu przypadkach mają takie samo położenie, ale różnią się znakami. W dalszej części tego rozdziału przedstawione są dwa eksperymentalne sposoby rozróżniania znaków wirów optycznych. Pomiar mający określić znak wirów był przeprowadzony za pomocą układu przedstawionego poniżej (Rysunek 5.2).



Rysunek 5.1 Dwa przypadki rzutów wektorów falowych na płaszczyznę obserwacji a) i b), w których powstają wiry o przeciwnych znakach przy identycznych interferogramach I_{ABC} .

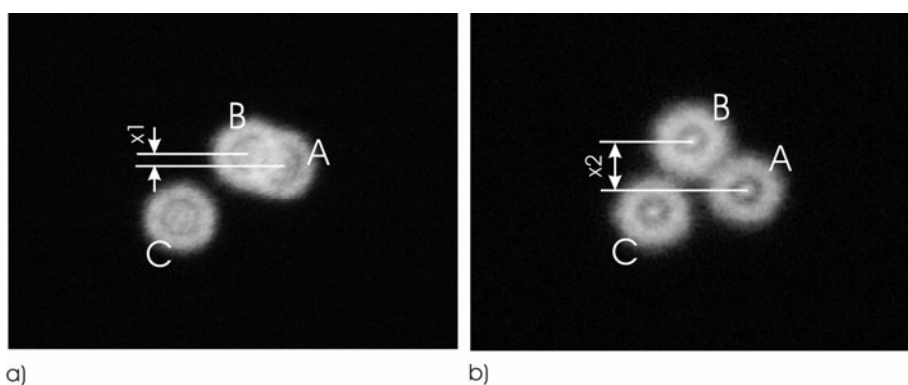
W układzie tym zwierciadło Z2 i filtr F są obecne tylko w zastosowaniu do metody II i nie powinny ich być przy wykorzystaniu metody I. Zwierciadło Z2 wykorzystywane było w metodzie II do powstania struktury prozków rozwidlających się, natomiast obecność filtru F podyktowane jest koniecznością dopasowania natężeń interferujących fal.



Rysunek 5.2 Układ optyczny zastosowany do określenia znaków ładunków topologicznych wirów optycznych. P – przysłona, P1, P2 – polaryzatory, K1-K6 – kostki światłodzielnące, Z1, Z2 – zwierciadła, F – filtr szary.

5.1 Metoda I

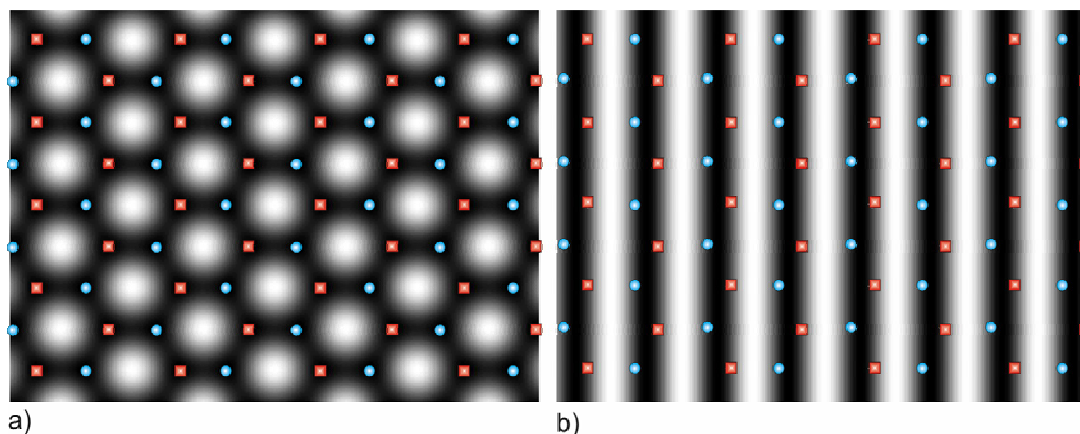
Analizując położenie jasnych obszarów (Rysunek 5.1) można łatwo zauważyć, że w celu określenia ładunków topologicznych wirów optycznych należy określić kierunek propagacji, np. fali UA. Pomiar kierunku rozchodzenia się interferujących wiązek jest prosty – wystarczy zmniejszyć średnicę wiązki za kolimatorem, używając przesłony irysowej do takiej wielkości, aby wiązki były rozróżnialne. Następnie należy zarejestrować natężenia trzech fal w dwóch położeniach ekranu (Rysunek 5.3).



Rysunek 5.3 Natężenia trzech fal UA, UB i UC zarejestrowane: a) w odległości około 10cm za interferometrem IWO b) w odległości około 110 cm za interferometrem IWO. Średnica rejestrowanych wiązek wynosi około 6 mm.

Powyżej (Rysunek 5.3) pokazane są natężenia trzech fal UA, UB i UC zarejestrowane w odległości około 10 cm za interferometrem na wirach optycznych (Rysunek 5.3a) oraz w odległości około 110 cm za interferometrem (Rysunek 5.3b). Wektor falowy fali UA skierowany jest w dół ($x_2 > x_1$).

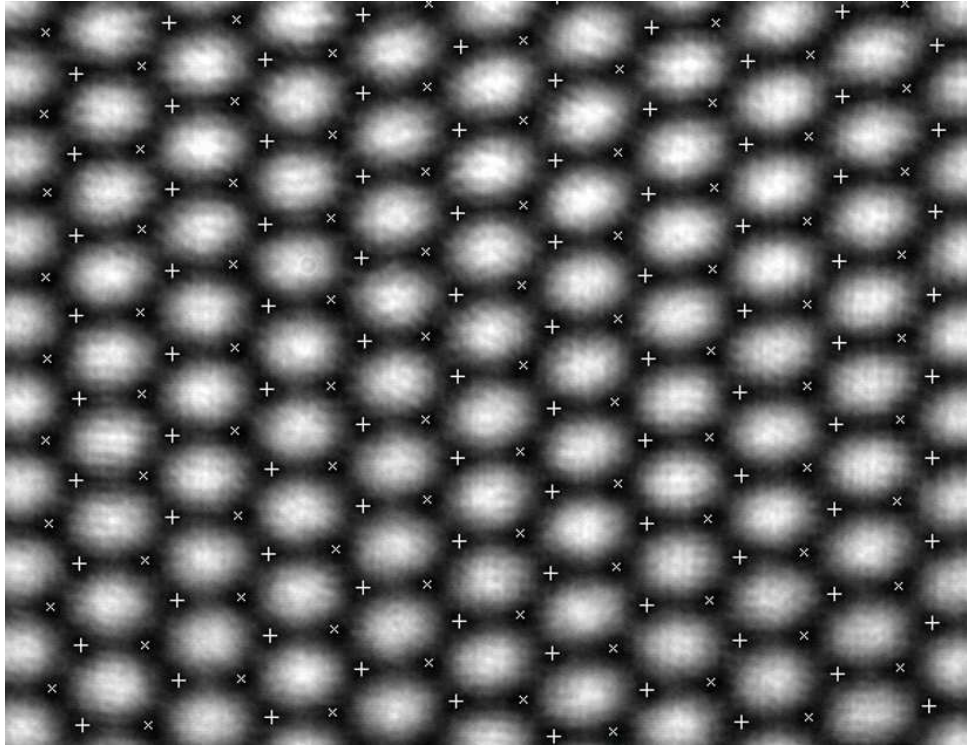
Do rozróżnienia dwóch grup wirów optycznych, różniących się ładunkiem topologicznym, używany jest obraz interferencyjny fal UB i UC. W celu wyjaśnienia sposobu rozdziału dwóch grup wirów optycznych, sporządzony został rysunek (Rysunek 5.4) przedstawiający obraz interferencji trzech fal (I_{ABC}) z zaznaczonymi położeniami punktów wirowych oraz obraz interferencyjny dwóch fal (I_{BC}) z naniesionymi położeniami tych samych punktów wirowych.



Rysunek 5.4 Wygenerowane interferogramy a) I_{ABC} oraz b) I_{BC} z zaznaczonymi położeniami wirów optycznych (czerwone kwadraty oraz niebieskie kółka oznaczają wiry o przeciwnych znakach).

Można zauważyć (Rysunek 5.4b), że wiry o różnych znakach (czerwone kwadraty i niebieskie kółka), naniesione na interferogram I_{BC} , leżą po dwóch przeciwnych stronach prążków interferencyjnych. Analiza rozkładu natężenia pola interferencyjnego dwóch fal płaskich UB i UC, w kierunku prostopadłym do prążków, wzdłuż osi x (z lewej do prawej), pozwala oddzielić wiry tworzące się, gdy wartość natężenia sumy tych dwóch fal wzrasta (czerwone kwadraty), od wirów tworzących się, gdy wartość natężenia sumy tych dwóch fal maleje (niebieskie kółka). W ten sposób rozdzielone wiry optyczne tworzą dwie grupy o różnych znakach. Znak przypisywany jest, po sprawdzeniu kierunku rozchodzenia się wiązki UA, na podstawie wyników symulacji teoretycznych. Jeżeli kierunek rozchodzenia się fali płaskiej jest taki jak na przedstawia Rysunek 5.1a (wektor falowy fali UA skierowany jest w dół) to wiry oznaczone czerwonymi kwadratami (Rysunek 5.4) są dodatnie, w przeciwnym razie - kiedy wektor falowy fali UA skierowany jest do góry (Rysunek 5.1b) – wiry oznaczone czerwonymi kwadratami są ujemne.

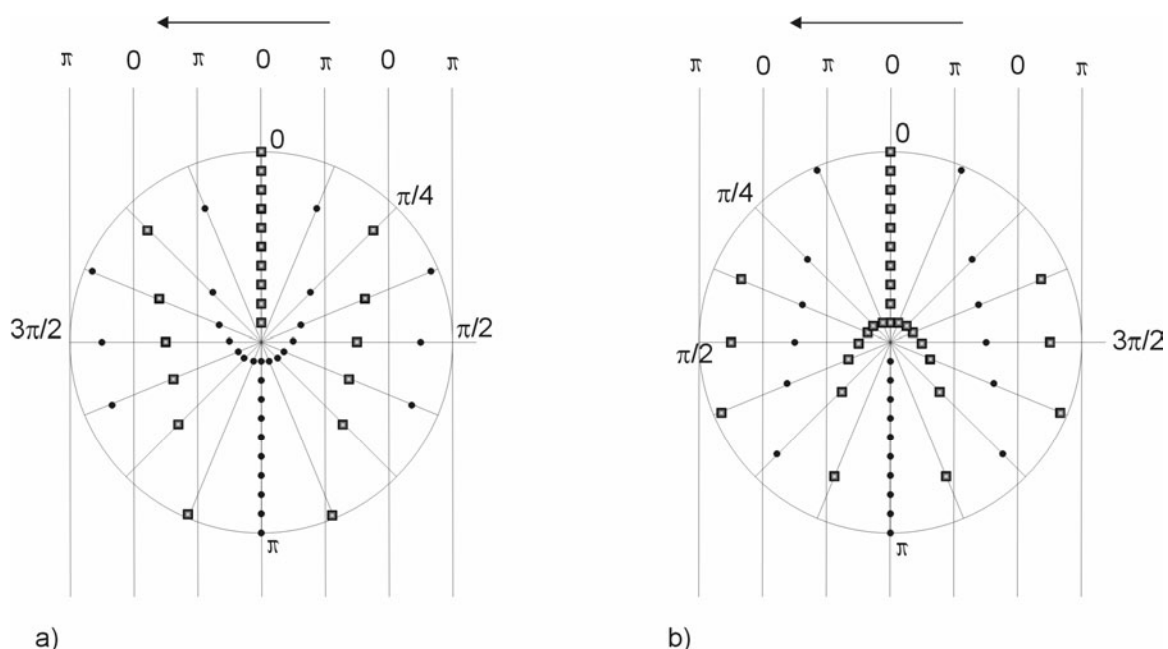
Na poniższym rysunku (Rysunek 5.5) przedstawiony jest przykładowy interferogram I_{ABC} uzyskany doświadczalnie z zaznaczonymi położeniami i znakami („+” – wir dodatni, „x” – wir ujemny) wirów optycznych. Znaki wirów optycznych były wyznaczone metodą opisaną powyżej.



Rysunek 5.5 Zarejestrowany rozkład natężenia I_{ABC} z zaznaczonymi położeniami i znakami wirów optycznych. Znak „+” oznacza wir dodatni, znak „x” oznacza wir ujemny.

5.2 Metoda II

Druga metoda rozróżniania znaków wirów optycznych wymaga zarejestrowania dodatkowego obrazu interferencyjnego z wiązką odniesienia R (Rysunek 5.2), której wartość natężenia jest co najmniej równa sumie natężeń trzech interferujących fal. Warunek ten gwarantuje, że wiązka odniesienia nie wygeneruje dodatkowych wirów optycznych. W wyniku interferencji zaburzenia U_{ABC} z płaską falą odniesienia uzyskujemy charakterystyczny rozkład prążków rozwidlonych zwanych „widelcami” [11][66][67]. Rozgałęzione prążki – widelce wskazują położenia wirów optycznych oraz ich znaki.

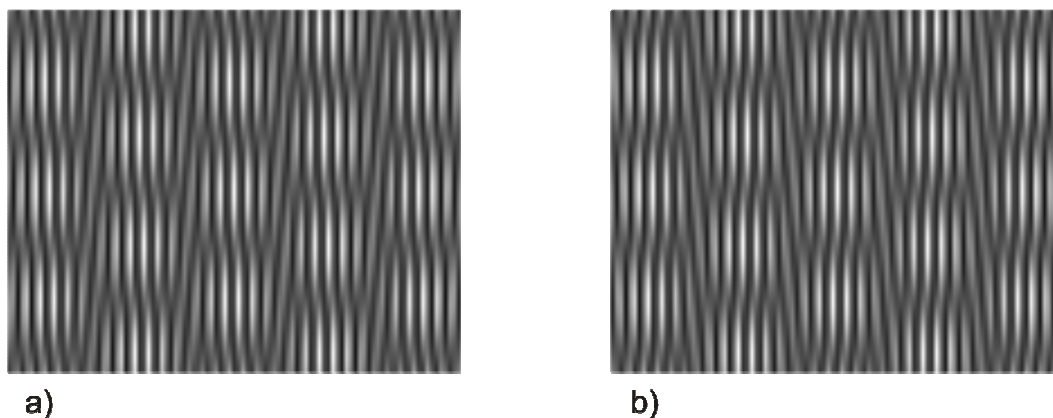


Rysunek 5.6 Przykład interferencji fali przenoszącej wir optyczny z falą płaską (o zaznaczonym strzałką rzucie wektora falowego płaskiej fali odniesienia) ilustrujący powstawanie widelców; a) widelce skierowane do góry – wir dodatni, b) widelce skierowane do dołu – wir ujemny. Czarne kółka wskazują minima, kwadraty – maksima natężenia światła. Wartości fazy są zaznaczone z dokładnością do dowolnej stałej.

Rysunek 5.6 przedstawia przykładowy rozkład fazy fali o helikalnym kształcie frontu falowego z nałożonym rozkładem fazy płaskiej fali odniesienia. Czarnymi kółkami zaznaczono kilka punktów, w których występują minima interferencyjne, zaś kwadratami oznaczono maksima interferencyjne. W części a) widać kształt, utworzony z czarnych kółek, widelca skierowanego w górę, a w części b) widać kształt, utworzony z kwadratów, widelca skierowanego w dół. W części a) znajduje się wir o prawoskrętnym helikalnym froncie falowym więc znak jego ładunku topologicznego ma znak dodatni [20]. Kierunek obrotu

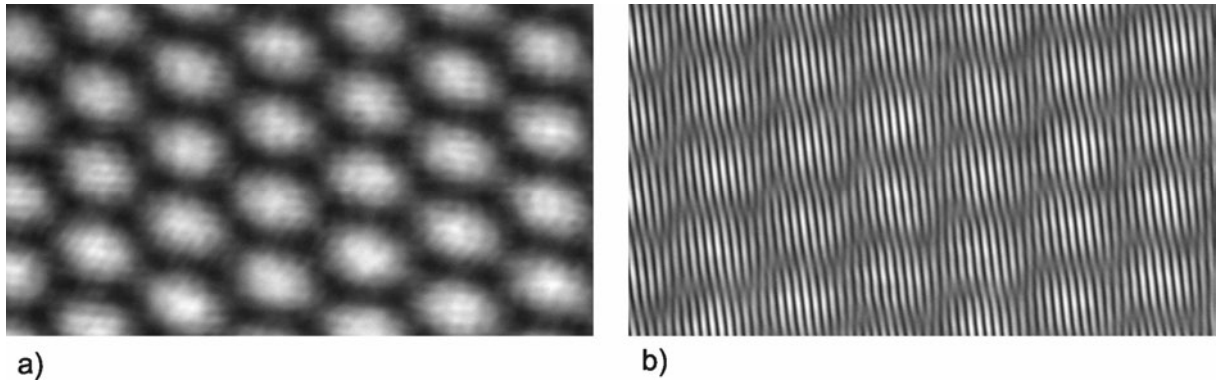
analizowany jest zgodnie z kierunkiem biegu interferujących wiązek. W rezultacie widelec skierowany w górę oznacza wir o znaku dodatnim. W części b) widać, że widelec skierowany jest w dół i oznacza wir o znaku ujemnym. Obserwowane rozwidlenie prążków może wystąpić zarówno dla maksimum natężenia jak również dla minimum (lub wartości pośredniej), zależnie od różnicy faz pomiędzy falą przenoszącą wir optyczny a falą odniesienia.

Układ widelców określający parę wirów o przeciwnych znakach („góra – plus” oraz „dół – minus”) zmienia się, jeżeli kierunek propagacji fali odniesienia zmieni się na przeciwny. Na poniższym rysunku (Rysunek 5.7) przedstawione są dwa obrazy interferencyjne pokazujące sieć wirów optycznych powstałą w wyniku interferencji takich samych trzech fal płaskich. Zmianie ulegał tylko kierunek propagacji fali odniesienia.



Rysunek 5.7 Wygenerowany rozkład natężenia powstały w wyniku interferencji trzech fal płaskich z płaską falą odniesienia, a) - której kierunek propagacji jest taki jak pokazano na rysunku 7.2, b) – bieg wiązki znajdowałby się po przeciwnej stronie trzech pozostałych wiązek.

Na rysunku powyżej (Rysunek 5.7) widać zmiany orientacji widelców wskazujących wiry optyczne o tych samych znakach, które zależą tylko od kierunku propagacji fali odniesienia. W układzie pomiarowym najprostszym rozwiązaniem jest skierowanie fali odniesienia w taki sposób jak pokazano na schemacie układu pomiarowego (Rysunek 5.2). W tym przypadku widelce skierowane do góry oznaczają wir o ładunku dodatnim, zaś widelce skierowane do dołu oznaczają wir o ładunku ujemnym. Na poniższym rysunku (Rysunek 5.8) pokazane są wyniki eksperymentalne.



Rysunek 5.8 Zarejestrowany rozkład natężenia a) trzech fal płaskich I_{ABC} oraz b) trzech fal płaskich i fali odniesienia. Widelce skierowane do góry oznaczają wiry dodatnie, widelce skierowane do dołu – wiry ujemne.

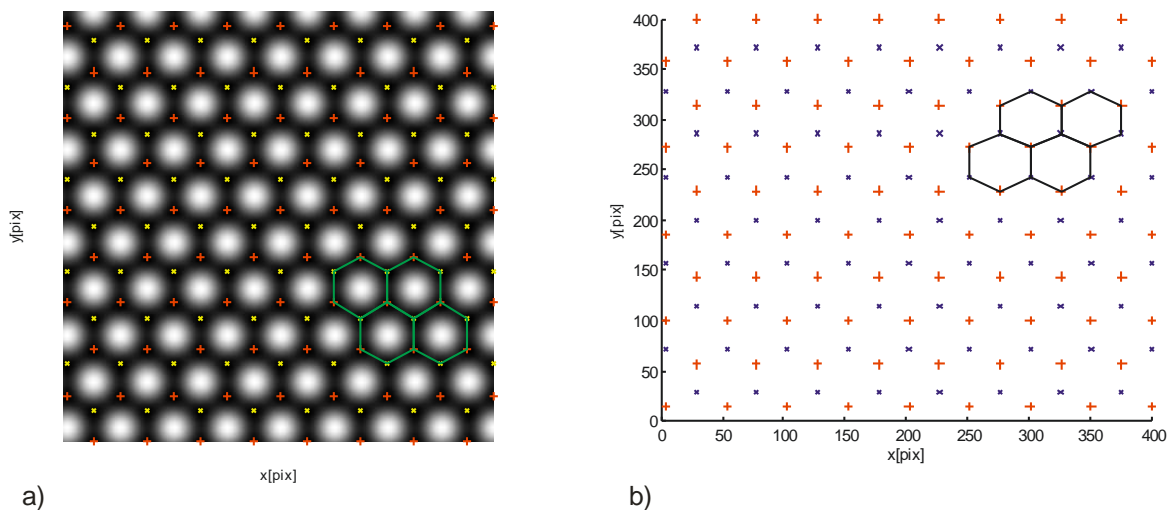
5.3 Podsumowanie

Obydwie zaproponowane eksperymentalne metody rozpoznawania znaków wirów optycznych, wymagają rejestracji interferogramu I_{ABC} – w celu lokalizacji położenia wirów optycznych. Metoda I wymaga rejestracji interferogramu I_{BC} oraz rozkładu natężenia trzech fal U_A , U_B i U_C o zmniejszonych aperturach w dwóch położeniach. Metoda II wymaga rejestracji wyniku interferencji czterech fal I_{ABCR} . Rezultaty obu metod są zgodne. Obydwie metody są proste w zastosowaniu i analizie. W tej sytuacji decyzja o zastosowaniu metody pierwszej lub drugiej zależy od konkretnego problemu pomiarowego; czy wygodniej jest dokonać pomiaru przesunięć zwężonych wiązek, w dwóch przesuniętych płaszczyznach, czy użyć dodatkowej fali odniesienia. Metoda druga wymaga większej ilości elementów optycznych i dodatkowej przesłony, ale nie wymaga zmiany apertury wiązki i położenia kamery CCD, co jest jej dużą zaletą i może zdecydować o jej wykorzystaniu.

6. Analiza położenia punktów wirowych

6.1. Struktura sieci wirów optycznych powstałych w wyniku interferencji trzech fal płaskich

W układzie interferometru na wirach optycznych z trzema wiązkami otrzymać można sieć wirów o strukturze sześciokątnej (heksagonalnej), w której podstawową komórką jest sześciokąt. W szczególnym przypadku, kiedy wektory falowe trzech interferujących wiązek będą układały się jak na rysunku w rozdziale 5 (Rysunek 5.1.), podstawową komórką będzie sześciokąt foremny. Jeżeli amplitudy fal będą nierówne lub wzajemne położenie wektorów falowych będzie inne wtedy powstanie sześciokątna sieć wirów z nieforemną komórką podstawową [37]. Rysunek 6.1. przedstawia przykład sieci heksagonalnej, której komórką podstawową jest sześciokąt foremny. W części a) rysunku widać wynik interferencji trzech fal płaskich, w którym powstaje sześciokątna sieć wirów (komórka zaznaczona zieloną linią). Punkty wirowe zostały zaznaczone znakami '+' i 'x'. Ten sam przypadek widać w części b) rysunku (różnica w położeniu zaznaczonych komórek, wyniki z odwrotnego kierunku osi Y w obrazie interferencyjnym).

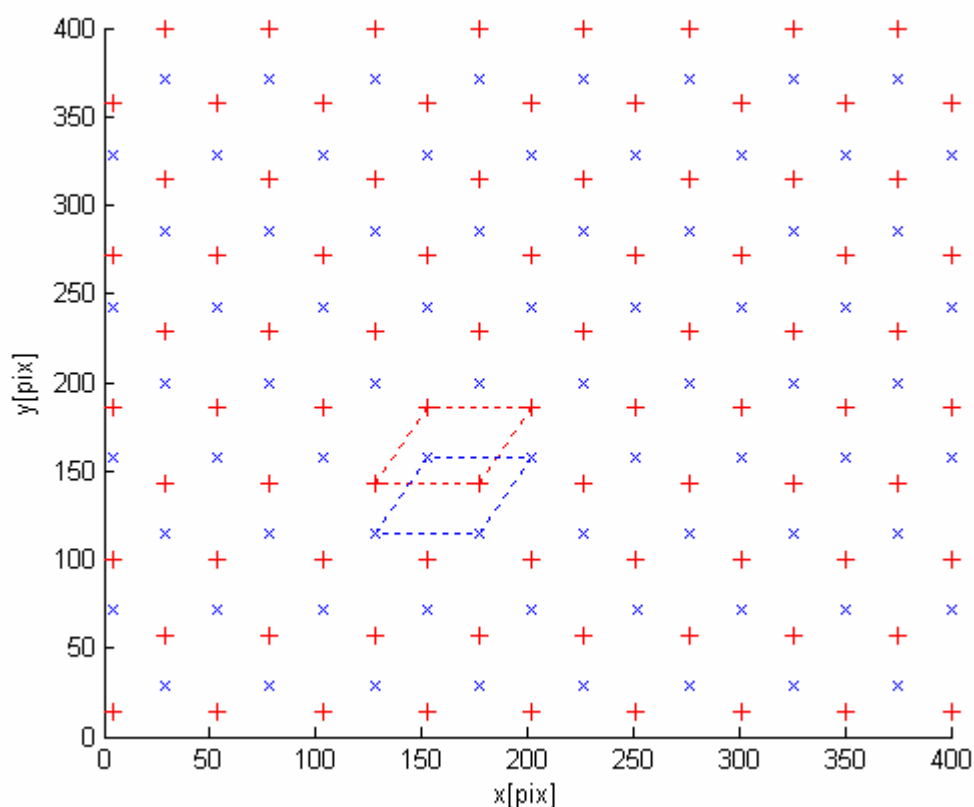


Rysunek 6.1 Sześciokątna struktura sieci wirów optycznych. a) Przykład wygenerowanego numerycznie interferogramu z zaznaczonymi punktami wirowymi, b) sieć punktów wirowych w układzie współrzędnych. Wiry o ładunku dodatnim zaznaczone zostały znakiem '+', a o ładunku ujemnym znakiem 'x'.

Heksagonalną sieć wirów można podzielić na dwie podsieci powstałe odpowiednio z wirów o ładunku topologicznym dodatnim oraz z wirów o ładunku topologicznym

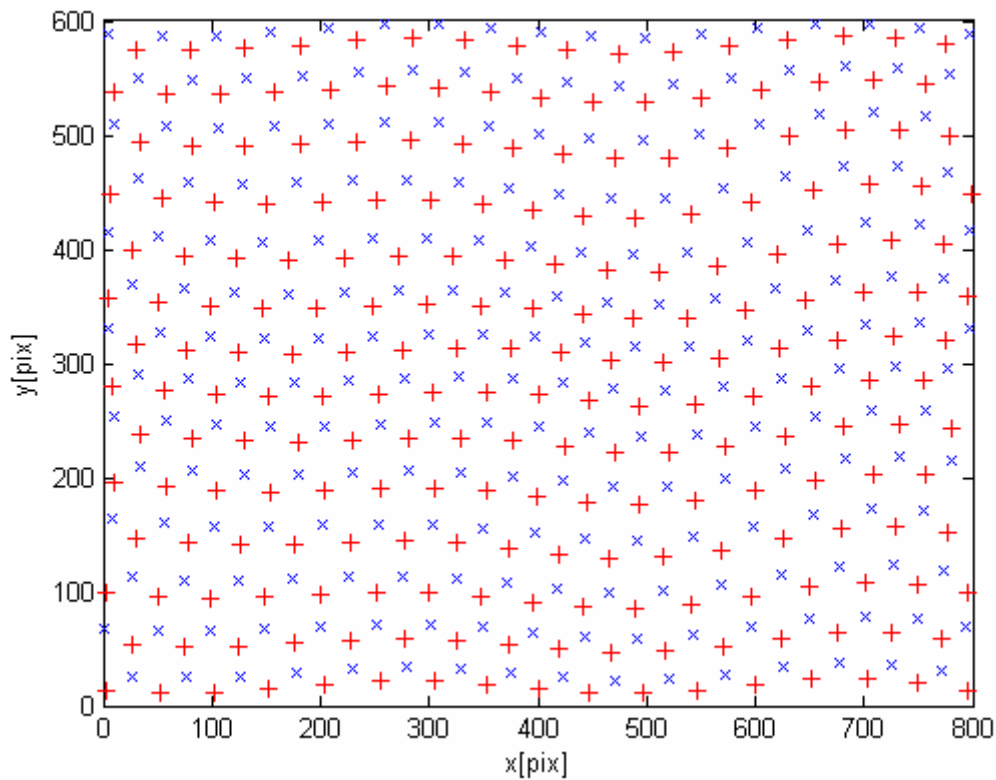
ujemnym. Strukturę sieci wirów o jednakowych znakach można analizować oddzielnie i w odpowiedniej fazie obliczeń, wyniki z obu podsieci połączyć.

Na rysunku poniżej (Rysunek 6.2) przedstawiony jest kształt komórki podstawowej podsieci wirów optycznych o jednakowych znakach. Długość boku tak powstałego rombu odpowiada odległości, w której faza względna dwóch fal zmienia się o 2π . Odległość między punktami wirowymi tego samego znaku będzie w dalszej części rozdziału nazywana *stałą sieci*.



Rysunek 6.2 Komórka podstawowa dla sieci wirów optycznych jednego znaku. Dodatnie - kolor czerwony, ujemne - kolor niebieski.

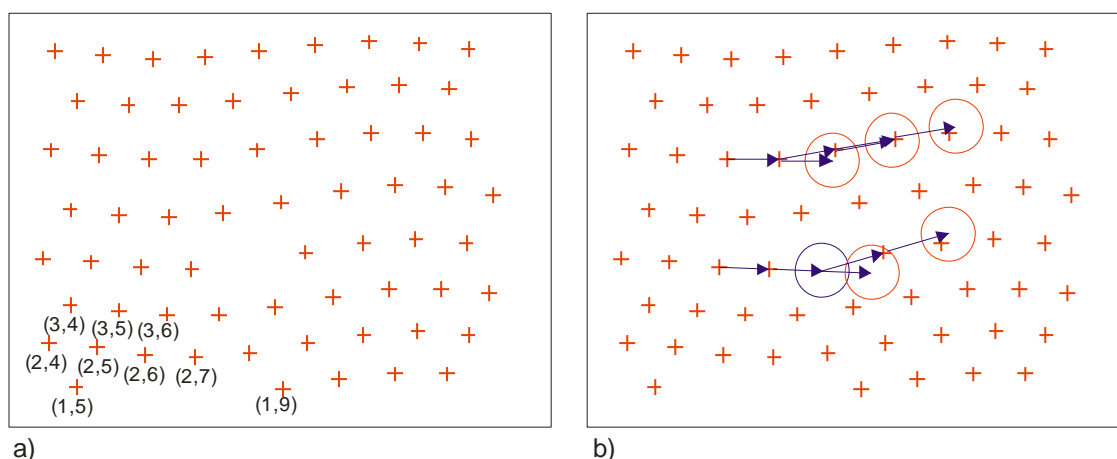
Określenie *stała sieci* odnosi się do rozmiarów komórki podstawowej sieci bez zaburzeń. W przypadku sieci z deformacjami oznacza odległość między punktami wirowymi, gdyby zaburzenia nie wystąpiły. W przypadku eksperymentu stała sieci jest określona w przybliżeniu jako wartość średnia z boków komórek podstawowych. Przykład sieci zaburzonej przedstawiony został na rysunku poniżej (Rysunek 6.3). Analiza takiej sieci wymaga posortowania, pogrupowania i obliczenia względnych położenia poszczególnych współrzędnych punktów wirowych.



Rysunek 6.3 Przykład sieci wirów powstały w wyniku interferencji trzech fal (dwie fale płaskie oraz jedna z wprowadzoną deformacją frontu falowego).

6.2. Indeksowanie punktów wirowych w strukturze równoległobocznej sieci

Na potrzeby przeprowadzonych eksperymentów powstał szereg procedur numerycznych do operacji na współrzędnych punktów wirowych oraz do analizy i interpretacji wyników pomiarów. W wyniku działania metod lokalizacji punktów wirowych oraz rozpoznawania znaków wirów optycznych, opisanych w poprzednich rozdziałach (rozdział 4.1, rozdział 5), otrzymywane są współrzędne punktów wirowych oraz znak wiru przyporządkowany do każdej pary współrzędnych. Z potrzeby analizy względnych odległości między punktami wirowymi wynika konieczność logicznego posortowania analizowanych punktów. Ponieważ komórka podstawowa podsieci wirów o jednakowych znakach ma kształt równoległoboku, możliwe jest umieszczenie punktów wirowych w tablicy, w której każdy element odpowiada parze współrzędnych (x,y) oraz informacji o znaku (-1 lub 1), a indeks elementu w tablicy odpowiada indeksowi położenia wiru w strukturze sieci.



Rysunek 6.4 Indeksowanie położenia punktu wirowego, a) przykładowe indeksy, b) - kolejne kroki działania procedury indeksowania.

| | | | | | | | | |
|-----|-----|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-----|-------------|
| NaN | NaN | NaN | NaN | (9,7;11,7) | NaN | NaN | NaN | (38,0;11,4) |
| NaN | NaN | NaN | (6,0;17,8) | (12,6;17,3) | (19,3;16,3) | (26,1;15,9) | ... | ... |
| NaN | NaN | (8,9;23,1) | (15,5;22,3) | (22,2;21,8) | ... | ... | ... | ... |
| NaN | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |

Rysunek 6.5 Przykładowe współrzędne wirów w postaci macierzy odpowiadające punktom indeksowanym z rysunku powyżej w części a).

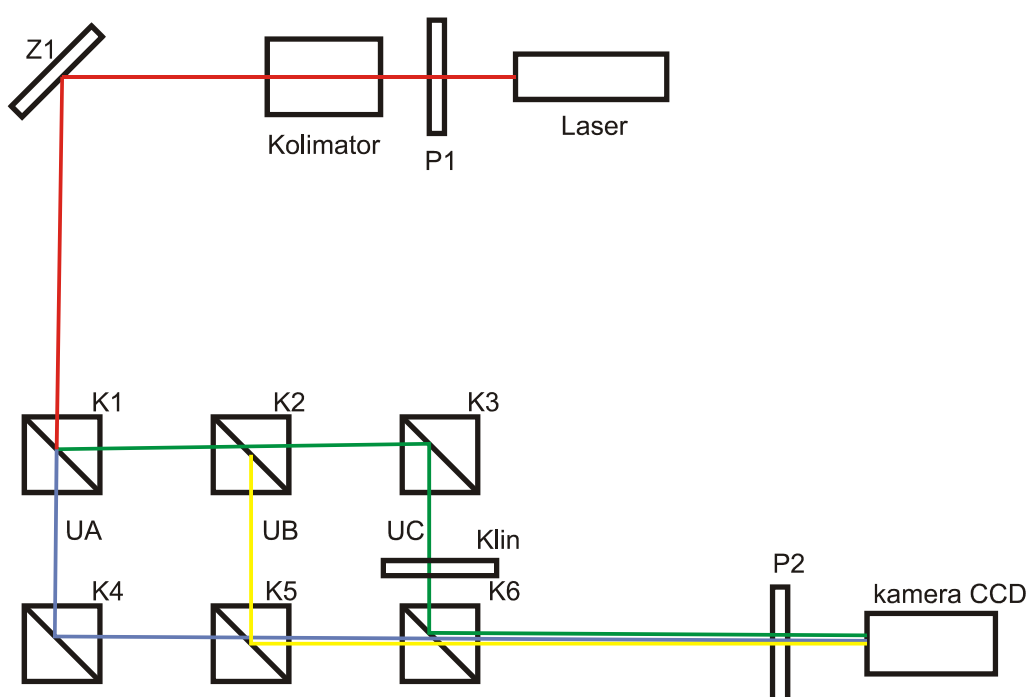
Przykład indeksowania współrzędnych punktów wirowych przedstawia Rysunek 6.4 a). Odpowiadające mu wartości współrzędnych zapisane w macierzy przedstawia Rysunek 6.5 gdzie 'NaN' – (Not a Number) oznacza brak punktu wirowego o tym indeksie, '...' – wartość, która w przedstawionym przykładzie nie została policzona, ale odpowiada punktowi zaznaczonemu na rysunku. Taki sposób indeksowania punktów wirowych ułatwia późniejszą analizę ponieważ kolejne punkty, w których faza względna jednej z par interferujących wiązek zmienia się o pełen okres, różnią się indeksami odpowiednio: pierwszy indeks o jeden – pierwsza para, drugi indeks o '1' - druga para, pierwszy indeks o '+1' i drugi o '-1' – trzecia para. Zasadę działania procedury indeksowania punktów wirowych przedstawia Rysunek 6.4. Pierwszym punktem wirowym wpisywanym do macierzy jest punkt najbliższy początku układu współrzędnych, następnie jest poszukiwany punkt wirowy wzdłuż linii w odległości, w pierwszym kroku równej stałej sieci (oszacowanej na podstawie ilości punktów i wielkości analizowanej powierzchni), a w następnych, jeżeli kolejne punkty zostaną zindeksowane, w odległości i kierunku odpowiadających różnicy położenia dwóch poprzednich punktów. Ponieważ punkty wirowe nie tworzą idealnej linii szukany jest najbliższy punkt wirowy od miejsca, w którym jest on oczekiwany. Nie zawsze wszystkie punkty wirowe są zlokalizowane przez procedury lokalizacji więc procedura indeksacji nie może wprowadzać zaburzeń w strukturze, w przypadku braku punktu wirowego w spodziewanym miejscu. W sytuacji kiedy najbliższy punkt wirowy znajduje się w odległości większej niż połowa stałej sieci (parametr dobrany eksperymentalnie) od miejsca, w którym jest spodziewany w macierz wynikową jest wpisywana informacja o braku punktu sieci o tym indeksie. Następnie poszukiwany jest kolejny punkt wirowy w miejscu dwa razy dalszym od ostatnio poprawnie zindeksowanego punktu. Tak zindeksowane wiry tworzą jeden wiersz macierzy, kolejny jest tworzony analogicznie zaczynając od punktu położonego najbliższego początku układu współrzędnych (punkty wirowe tworzące poprzedni wiersz nie są już brane pod uwagę). Tak powstałe wiersze macierzy są jeszcze sortowane i przesuwane względem siebie (wzdłuż) tak, aby kolejne wiersze zawierały punkty wirowe, w których faza jednej z par interferujących wiązek zmieniała się kolejno o cały okres. Konieczność tej operacji wynika z możliwych braków w strukturze sieci oraz z dużych zaburzeń wprowadzanych przez obiekt badany. Poprawność działania przedstawionego algorytmu indeksowania została zweryfikowana na wygenerowanych syntetycznie obrazach o różnym stopniu deformacji sieci, z przekraczającymi odległość pomiędzy sąsiednimi wierszami. Wzrokowa kontrola poprawnego działania algorytmu indeksowania punktów z zarejestrowanego rzeczywistego obrazu również dała efekt pozytywny.

7. Pomiary z wykorzystaniem wirów optycznych

Metody lokalizacji wirów optycznych, metody określania znaków ładunków topologicznych oraz procedury do analizy położenia wirów optycznych, opisane w poprzednich rozdziałach, zostały opracowane pod kątem wykorzystania wirów w pomiarach. Rozdział niniejszy poświęcony jest właśnie metodom pomiarowym, wykorzystującym zjawisko występowania wirów optycznych w polu optycznym. Ponieważ poniżej przedstawione metody pomiarowe podobnie jak metody lokalizacji wirów zostały opracowane przy współpracy z SOG (Singular Optics Group), sprecyzuję mój udział w powstaniu opisanych metod. Metoda pomiaru małych kątów została zaproponowana i opracowana przez J. Masajadę, ja brałem udział w opracowaniu procedur do analizy zmian struktury sieci po wprowadzeniu w układ obiektu badanego [68]. Metoda pomiaru zaburzeń frontu falowego jest opracowana przeze mnie [69]. Pomiary mające na celu przetestowanie opisywanych metod przeprowadzone zostały wraz z SOG.

7.1. Pomiar małych kątów

Metoda pomiaru małych kątów została opracowana z myślą wykorzystania do pomiaru kątów odchylenia wiązki przez obiekt badany, np. w celu określenia kąta klina optycznego wykonanego z materiału o znanym współczynniku załamania lub odwrotnie. Przedstawiana metoda pomiaru jest metodą różnicową, w której w pierwszym kroku rejestrowane są obrazy interferencyjne interferencji wiązek A, B i C, następnie po wprowadzeniu obiektu badanego w drogę jednej z wiązek ponownie rejestrowane są obrazy interferencyjne. Układ pomiarowy przedstawia poniższy rysunek (Rysunek 7.1).



Rysunek 7.1 Schemat układu pomiarowego do pomiaru kąta łamiącego klina. Na drodze fali UC znajduje się przedmiot badany.

W wyniku przejścia jednej z wiązek przez obiekt badany zmienia się rozmieszczenie punktów wirowych w obserwowanym za pomocą kamery obszarze. Następuje przemieszczenie punktów wirowych oraz zmian struktury sieci spowodowane odchyleniem wektora falowego \mathbf{k}_C fali C.

Klin optyczny zmienia współrzędne wektora falowego \mathbf{k}_C o wielkości Δk_{xC} oraz Δk_{yC} [24][70]:

$$\Delta k_{x_C} = \frac{(\Delta x_2 \cdot \Delta y_{n1} + \Delta x_{n1} \cdot \Delta y_{n2} - \Delta x_1 \cdot \Delta y_{n2} - \Delta x_{n2} \cdot \Delta y_{n1}) \cdot k_{x_{BC}}}{\Delta x_{n1} \cdot \Delta y_{n2} - \Delta y_{n1} \cdot \Delta x_{n2}} + \frac{(\Delta y_2 \cdot \Delta y_{n1} - \Delta y_1 \cdot \Delta y_{n2}) \cdot k_{y_{BC}}}{\Delta x_{n1} \cdot \Delta y_{n2} - \Delta y_{n1} \cdot \Delta x_{n2}}$$

$$\Delta k_{y_C} = \frac{(\Delta y_1 \cdot \Delta x_{n2} + \Delta x_{n1} \cdot \Delta y_{n2} - \Delta y_2 \cdot \Delta x_{n1} - \Delta y_{n1} \cdot \Delta x_{n2}) \cdot k_{y_{BC}}}{\Delta x_{n1} \cdot \Delta y_{n2} - \Delta y_{n1} \cdot \Delta x_{n2}} + \frac{(\Delta x_1 \cdot \Delta x_{n2} - \Delta x_2 \cdot \Delta x_{n1}) \cdot k_{x_{BC}}}{\Delta x_{n1} \cdot \Delta y_{n2} - \Delta y_{n1} \cdot \Delta x_{n2}} \quad (7.1)$$

Do obliczenia wielkości Δk_{x_C} oraz Δk_{y_C} potrzebne są współrzędne trzech punktów wirowych: PW1, PW2 i PW3 (Rysunek 7.2), które tworzą tryplet. Symbole zawierająca „1” np., Δx_1 i Δx_{n1} oznaczają różnicę pomiędzy x i y współrzędną punktów Pw2 i Pw1, natomiast symbole zawierająca „2” oznaczają różnicę pomiędzy x i y współrzędną punktów Pw3 i Pw1. Literka „n” oznacza współrzędne wirów optycznych, zlokalizowane po obrocie fali UC, np. Δx_{n1} . Symbole $k_{x_{BC}}$ oraz $k_{y_{BC}}$ oznaczają różnicę pomiędzy składowymi iksowymi i igrekowymi wektorów falowych \mathbf{k}_B i \mathbf{k}_C [24]:

$$k_{x_{BC}} = k_{x_B} - k_{x_C}, \quad k_{y_{BC}} = k_{y_B} - k_{y_C} \quad (7.2)$$

Wielkości $k_{x_{BC}}$ oraz $k_{y_{BC}}$ można obliczyć korzystając z zarejestrowanych prążków interferencyjnych fal UB i UC lub przy pomocy położenia wirów optycznych. Drugi sposób polega na wyborze trypletów składających się ze współrzędnych najbliższych położonych punktów wirowych. Na rysunku 7-1 owalem znaczone taki przykładowy tryplet (punkty P1, P2, P3). Od punktu P1 do P3 oraz od punktu P1 do P2 różnica faz pomiędzy falami UB i UC wynosi $\Delta \varphi_{13} = \frac{2}{3} \pi$ oraz $\Delta \varphi_{12} = \frac{2}{3} \pi$. Wzory potrzebne do wyznaczenia wielkości $k_{x_{BC}}$ oraz $k_{y_{BC}}$ zostały wyprowadzone przez J. Masajadę [70]:

$$k_{x_{BC}} = \frac{\Delta y_1 \cdot \Delta \varphi_{13} - \Delta y_2 \cdot \Delta \varphi_{12}}{\Delta x_2 \cdot \Delta y_1 - \Delta y_2 \cdot \Delta x_1}, \quad k_{y_{BC}} = \frac{\Delta x_2 \cdot \Delta \varphi_{12} - \Delta x_1 \cdot \Delta \varphi_{13}}{\Delta x_2 \cdot \Delta y_1 - \Delta y_2 \cdot \Delta x_1} \quad (7.3)$$

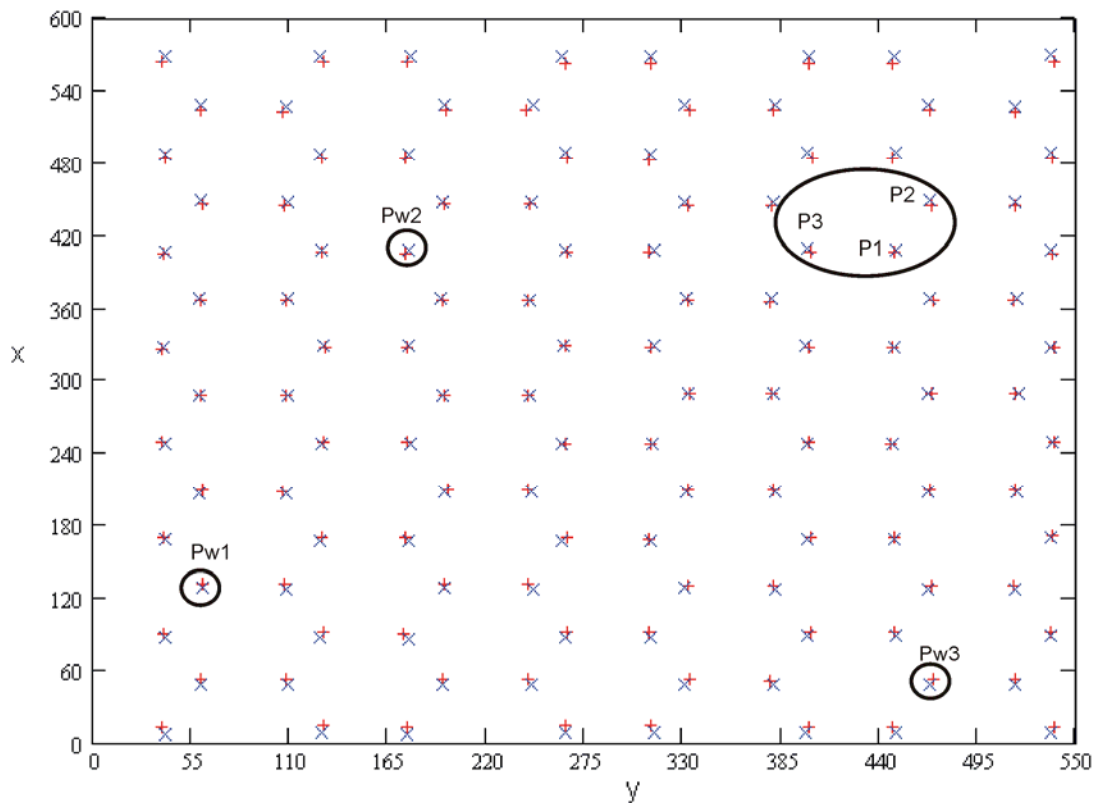
Do obliczeń wielkości $k_{x_{BC}}$ oraz $k_{y_{BC}}$, używane są współrzędne wirów optycznych zlokalizowanych przy użyciu interferogramu odniesienia (tzn. interferogramu zarejestrowanego przed obrotem). Oznaczenia stosowane w równaniach 7.3 są analogiczne jak w równaniach 7.1, czyli symbole zawierająca „1” oznaczają różnicę pomiędzy x i y współrzędną punktów P2 i P1, „2” – oznacza różnicę pomiędzy x i y współrzędną punktów P3 i P1. Do wyznaczenia składowych wektora \mathbf{k}_{BC} wykorzystywane są wszystkie możliwe tryplety utworzone ze współrzędnych najbliższych punktów wirowych. Wielkości $k_{x_{BC}}$ i $k_{y_{BC}}$,

które stosowane są do dalszych obliczeń to wartości średnie, natomiast wielkości Δk_{xC} i Δk_{yC} wyznaczone są na podstawie kilku tysięcy wylosowanych trypletów.

Znając różnicę składowych wektora falowego fali UC, powstałą w wyniku obrotu fali płaskiej przez klin optyczny, można obliczyć kąt łamiący tego klina z następującej zależności [68]:

$$\gamma = \arctan \left(\frac{\sin \left(\frac{\Delta k_{xC}}{k} \right)}{n - \cos \left(\frac{\Delta k_{xC}}{k} \right)} \right), \quad (7.4)$$

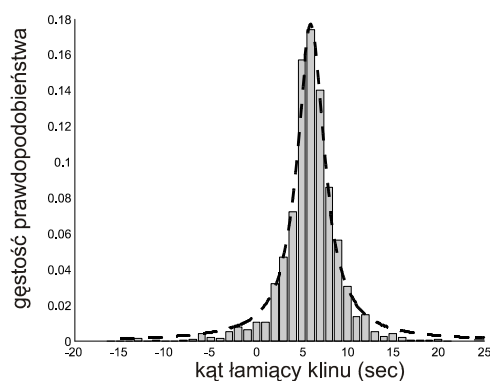
gdzie $k = \frac{2\pi}{\lambda}$, $\lambda = 632,8 \text{ nm}$, $n = 1,515$



Rysunek 7.2 Przykłady trypletów. Z punktów wirowych blisko siebie - punkty P1,P2,P3, oraz z wylosowanych punktów z całego zbioru - Pw1,Pw2,Pw3.

Do obliczenia współczynników Δk_{xC} i Δk_{yC} konieczne jest przyporządkowanie punktów wirowych z obrazu przed i po umieszczeniu w układzie obiektu badanego. Przyporządkowanie to następuje poprzez znalezienie najbliższych sobie punktów wirowych

z obu sieci wirów. Dla poprawnego działania metody pomiarowej w obu sieciach wirów mogą znajdować się tylko odpowiadające sobie punkty wirowe. Punkty zlokalizowane tylko w jednej sieci (np. z powodu zakłóceń) nie mogą brać udziału w dalszych obliczeniach. Punkty takie są eliminowane przez parametr określający maksymalną odległość odpowiadających sobie wirów. Parametr ten jest obliczany na podstawie gęstości występowania punktów wirowych w analizowanym obszarze. Jeżeli odległość punktu wirowego od każdego punktu wirowego drugiej sieci przekracza wartość graniczną, taki punkt jest eliminowany z dalszej analizy. Taka procedura doboru punktów wirowych w pary ogranicza działanie procedury tylko do przypadków, w których różnica w położeniach punktów wirowych po umieszczeniu obiektu badanego w układzie pomiarowym jest niewielka. Dobre pary punktów wirowych z obu podsieci są losowane (po trzy pary) w celu uzyskania trypletów. Jest losowana tylko część z możliwych kombinacji po trzy pary punktów wirowych, ze względu na bardzo dużą ilość możliwych zestawień. Wykorzystanie niektórych wylosowanych zestawień par jest niepożądane ze względu na wnoszone błędy. Nie są pożądane zestawienia tworzące trójkąt, w którym suma dwóch boków jest bliska długości trzeciego boku, dlatego takie tryplety są usuwane z wylosowanego zestawienia i na ich miejsce losowane są kolejne. Duża ilość wylosowanych trypletów i tym samym duża ilość obliczonych wartości kąta łamiącego, umożliwia zastosowanie do oceny wartości kąta metod statystycznych. Uzyskany w eksperymencie przykład rozkładu gęstości prawdopodobieństwa w funkcji otrzymanego wyniku, przedstawiony jest poniżej (Rysunek 7.3)



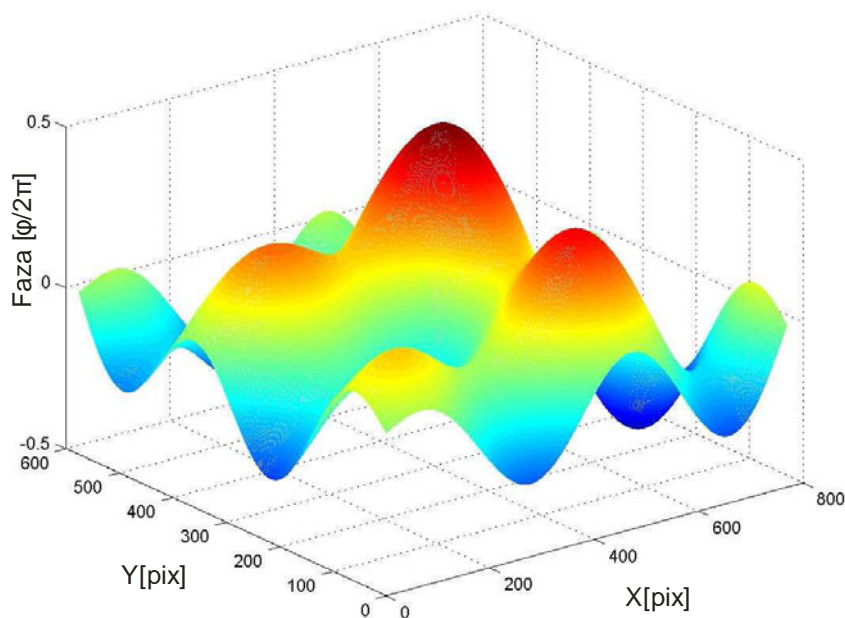
Rysunek 7.3 Wynik pomiaru kąta łamiącego klina. Dopasowanie rozkładu Couchy'ego do histogramu. Parametry rozkładu to: $X_0=5,99$, $\gamma=1,8$.

Zastosowanie analizy statystycznej oraz wykorzystanie informacji całego obszaru analizy zmniejsza zależność wyników metody od kształtu frontu falowego fali przechodzącej przez obiekt badany. Przy pomocy tej metody możliwy jest precyzyjny pomiar małych

wartości kątów, jednocześnie w dwóch prostopadłych osiach. Przedstawiony powyżej (Rysunek 7.3) przykład pomiaru kąta łamiącego klina dotyczy osi w której wartość tego kąta wynosiła (6 ± 2) sec (pomiar wykonany niezależnie przy pomocy goniometru). Do histogramu uzyskanego z obliczeń wartości kąta, dopasować można rozkład Cauchy'ego. Próby zastosowania rozkładu normalnego nie dały tak dobrego dopasowania rozkładów do uzyskiwanych histogramów, jak miało to miejsce przy wykorzystaniu rozkładu Cauchy'ego. Wynik pomiaru zaprezentowaną metodą to 0,0 w jednej z osi, oraz 6.0 w drugiej osi. Warto zaznaczyć, że test został przeprowadzony z wykorzystaniem do lokalizacji wirów metody minimów, a dokładność lokalizacji wirów wpływa na szerokość uzyskiwanego rozkładu i tym samym na dokładność pomiaru.

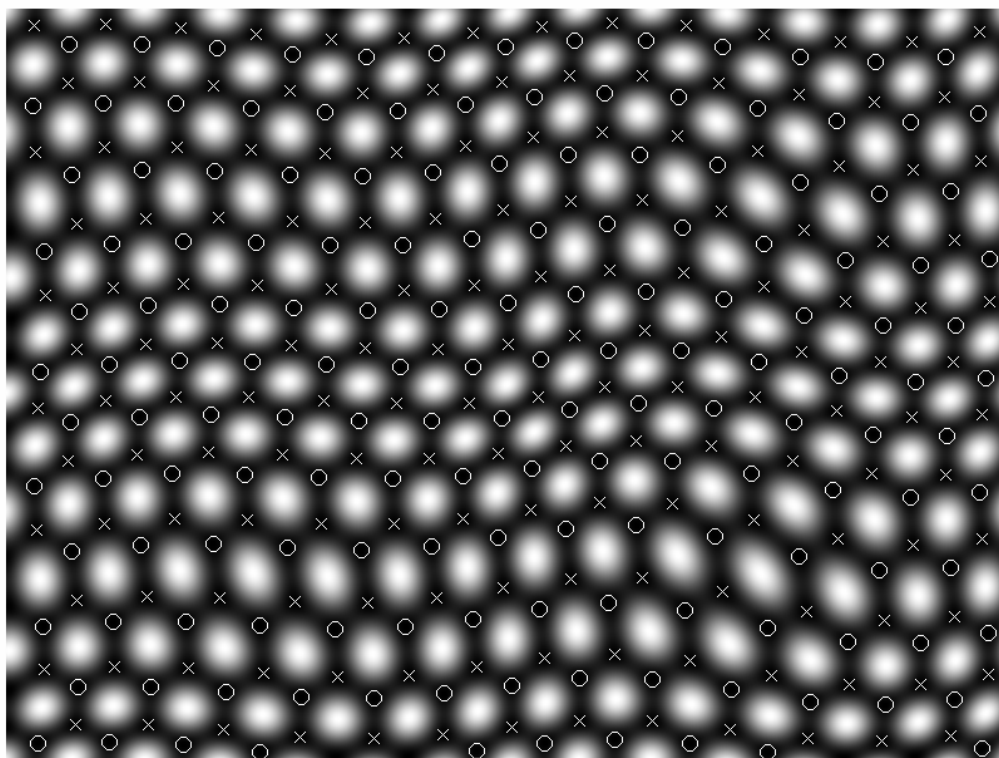
7.2. Pomiar zaburzeń frontu falowego fali płaskiej

Przedstawiany w niniejszej pracy pomiar zaburzeń frontu falowego, podobnie jak istniejące w literaturze metody, bazuje na określeniu fazy pomiędzy falą badaną i wzorcową. Do określenia rozkładu fazy w obserwowanym obszarze wykorzystywana jest informacja o względnym rozmieszczeniu punktów wirowych. Korzystając z jednego układu pomiarowego i jednego zestawu zarejestrowanych obrazów potrzebnych do lokalizacji punktów wirowych oraz do określenia znaku ładunku topologicznego wirów optycznych, można uzyskać informację o fazie pomiędzy dwoma falami dowolnie wybranymi z trzech interferujących. Przedstawiony poniżej sposób obliczenia fazy dotyczy jednej z możliwych do wyboru par fal interferujących. Obliczenia przedstawione są dla fazy fali B względem fali A (ϕ_{ab}), oraz fazy fali A względem fali C (ϕ_{ca}), fazę ϕ_{bc} można uzyskać w sposób analogiczny. Do przedstawienia zasady działania opisywanej metody wykorzystane zostaną obrazy interferencyjne uzyskane w wyniku symulacji interferencji fal o znanym kształcie frontu falowego. Fale A i C są w falami płaskimi, a fala B posiada front falowy o kształcie przedstawionym poniżej (Rysunek 7.4).



Rysunek 7.4 Kształt zaburzenia fazowego jednej z interferujących fal. Na osiach poziomych 1pix odpowiada $9 \mu\text{m}$.

Obliczona zostanie faza ϕ_{ab} i ϕ_{ca} , co pozwoli na porównanie otrzymanych wyników z oczekiwanymi (faza ϕ_{ab} – kształt powierzchni powinien być taki, jak kształt frontu falowego fali B, faza ϕ_{ca} – wynikiem powinna być płaszczyzna). Obraz interferencyjny fal A, B oraz C przedstawiony został poniżej (Rysunek 7.5).



Rysunek 7.5 Obraz interferencyjny przedstawiający rozkład natężenia w wyniku interferencji trzech fal, z których dwie są falami płaskimi, natomiast front falowy trzeciej przedstawiony jest na rysunku powyżej. Punkty wirowe zaznaczone zostały na rysunku znakami 'o' oraz znakami 'x'. Znak 'o' - odpowiada wirowi o ładunku topologicznym dodatnim, znak 'x' - ujemnym.

W pierwszym kroku po rejestracji obrazów interferencyjnych należy zlokalizować punkty wirowe oraz określić ich znaki zgodnie z procedurami opisanymi w poprzednich rozdziałach. Przykład wyniku lokalizacji punktów wirowych oraz określenia znaku ładunków topologicznych wirów optycznych przedstawiony jest powyżej (Rysunek 7.5). Otrzymana sieć wirów, następnie rozdzielana jest na dwie podsieci – w pierwszej znajdują się wiry optyczne o ładunku topologicznym dodatnim, a w drugiej te o ładunku ujemnym.

Ponieważ w rzeczywistych pomiarach amplitudy trzech fal nie zawsze spełniają warunek równości amplitud, więc konieczne jest określenie fazy względnej, pomiędzy parami fal odpowiednio AB, BC i CA. Jeżeli wiadomo jest, że w eksperymencie amplitudy są równe,

wtedy szukane fazy względne wynoszą $2\pi/3$. Jeżeli warunek ten nie jest spełniony, wtedy należy w analizowanym obszarze w wyznaczonych punktach (punkty wirowe) określić fazę względną par interferujących wiązek. Z obrazów interferencyjnych prążkowych można obliczyć fazę względną interferujących fal, porównując natężenie w interesującym punkcie z minimalnym i maksymalnym natężeniem w analizowanym obszarze. Wyniki otrzymane w ten sposób z poszczególnych punktów, nie są jednakowe ze względu na dokładności procedur numerycznych oraz zakłócenia w obrazie interferencyjnym. We wszystkich punktach wirowych będących centrum wirów optycznych tego samego znaku ładunku topologicznego, fazy względne powinny mieć taką samą wartość więc za wartość oczekiwaną można przyjąć wartość średnią z uzyskanych wcześniej wyników, odpowiednio dla wirów optycznych o ładunku dodatnim oraz oddzielnie dla tych o ładunku ujemnym. Warunkiem koniecznym do przeprowadzenia takiej operacji numerycznej jest równomierny rozkład amplitud wszystkich trzech fal w analizowanym obszarze. W ten sposób, dzięki uwzględnieniu dodatkowej informacji o fazie w punktach wirowych oraz dzięki możliwości wykorzystania wartości średniej zamiast pojedynczych wyników, można uzyskać dokładniejszą informację o fazie względnej w konkretnych punktach obrazu interferencyjnego niż przy zastosowaniu tylko analizy pojedynczego obrazu interferencyjnego.

W części teoretycznej pracy przedstawione są (Rysunek 2.14) trójkąty złożone z wektorów amplitud zespolonych interferujących fal w punktach wirowych. W zależności od znaku ładunku topologicznego wiru optycznego fazy względne pomiędzy interferującymi falami różnią się, dlatego w kolejnym kroku konieczne jest uwzględnienie tego faktu.

Odpowiednio w punktach wykonywane są przeliczenia fazy:

$$\varphi_{nk} = \pi - \varphi_{nk} \quad (7.5)$$

dla wirów o ładunku topologicznym dodatnim oraz

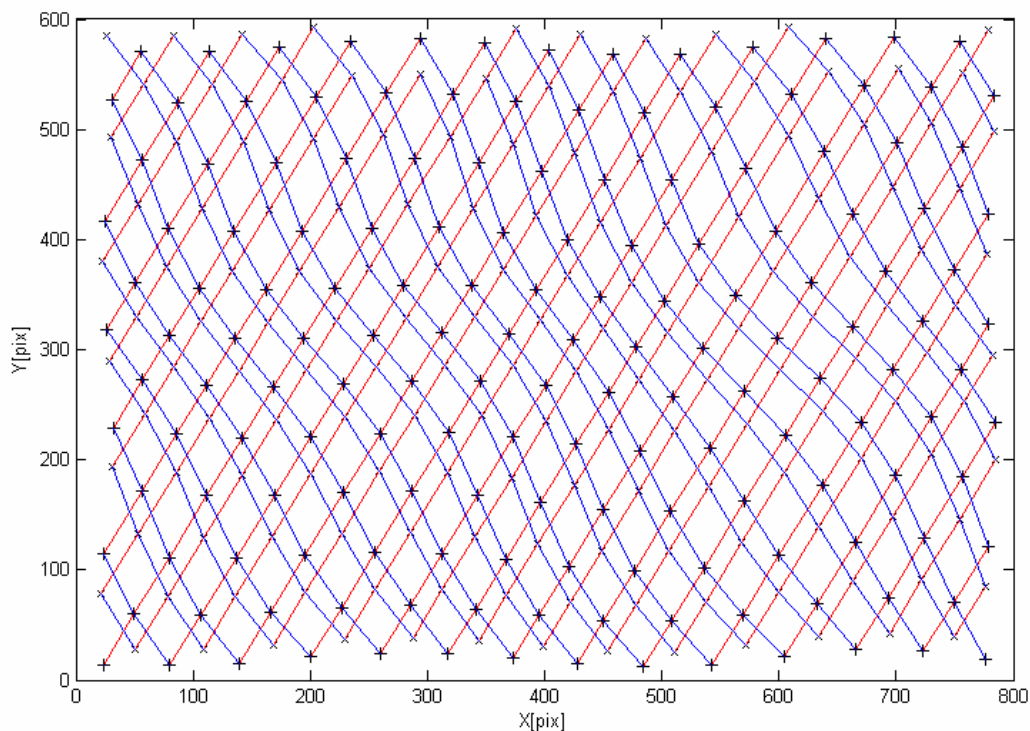
$$\varphi_{nk} = \pi + \varphi_{nk} \quad (7.6)$$

dla wirów o ładunku topologicznym ujemnym.

Oba przeliczenia wykonywane są dla każdej z par interferujących wiązek n i k (odpowiednio A , B lub C)

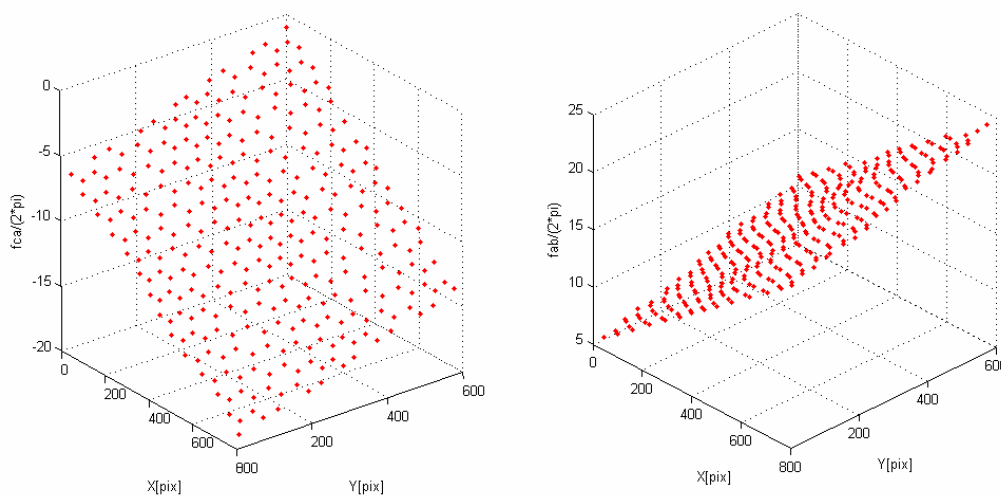
W każdym punkcie wirowym jednej podsięci wartość fazy ma taką samą wartość. Dotyczy to przedziału $0-2\pi$, ponieważ wartość fazy pomiędzy punktami wirowymi tej samej

podsięci może różnić się o wielokrotność 2π . Można wyróżnić grupy punktów wirowych, w których faza przyjmuje jednakową wartość, tworzące tzw. „linię równej fazy” nie dosłownie, ponieważ na tej linii pomiędzy punktami wirowymi wartość fazy jest inna. Takie „linie równej fazy” będą przebiegać inaczej dla fazy ϕ_{ab} oraz ϕ_{ca} . Przebiegają one jak można się spodziewać w kierunkach zgodnych z prążkami interferencyjnymi powstałymi odpowiednio w wyniku interferencji fal U_A i U_B oraz U_A i U_C . W celu ułatwienia określenia „linii równych faz” w kolejnym kroku, punkty wirowe w obu podsięciach osobno są indeksowane zgodnie z procedurą opisaną w punkcie 6.2 niniejszej rozprawy. W obu podsięciach wyznaczane są „linie równych faz” odpowiednio dla dwóch interesujących faz (ϕ_{ab} , ϕ_{ca}) (Rysunek 7.6). Sąsiednie „równoległe” linie zawierają grupy punktów wirowych, które różnią się wartością fazy o 2π . Liniami w kolorze czerwonym oznaczono „linie równej fazy” ϕ_{ca} , liniami w kolorze niebieskim „linie równej fazy” ϕ_{ab} . Jak można zauważyć linie czerwone są liniami prostymi, a linie niebieskie nie. Świadczy to o niejednorodnym rozkładzie fazy ϕ_{ab} w płaszczyźnie obserwacji. Odkształcenie od prostoliniowości wynika ze zniekształcenia frontu falowego fali U_B .



Rysunek 7.6 Określone "linie równej fazy" dla fazy ϕ_{ab} i ϕ_{ca} w obu podsięciach. Podsięci wirów o ładunkach topologicznych odpowiednio: 'x' - ujemnym oraz '+' - dodatnim. Płaszczyzna XY określa analizowany obszar gdzie $\text{pix}=9 \mu\text{m}$.

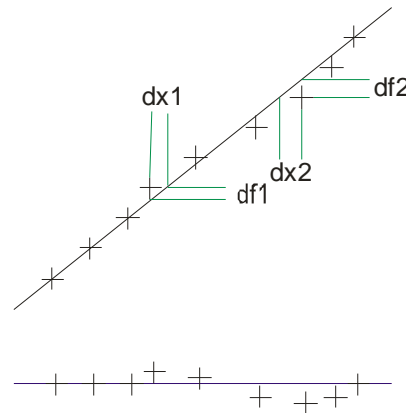
Następnym krokiem jest określenie płaszczyzn odniesienia i obliczenie rozkładu fazy na analizowanym obszarze. Ponieważ wartości fazy w punktach wirowych znajdujących się na sąsiednich „liniach równej fazy” jednej podsieci różnią się o 2π , należy wartości fazy w punktach wirowych zmienić o kolejną wielokrotność 2π dla każdej kolejnej linii. Kierunek tej zmiany (zwiększenie, zmniejszenie) zależy od znaku fazy badanej pary wiązek w punktach wirowych. Powierzchnie utworzone przez rozmieszczenie punktów wirowych w przestrzeni, gdzie oś pionowa odpowiada wartości fazy względem pełnego kąta można zobaczyć poniżej (Rysunek 7.7).



Rysunek 7.7 Powierzchnie utworzone przez rozmieszczenie punktów wirowych po uwzględnieniu różnic fazy będących wielokrotnością 2π . Z lewej strony wynik operacji dla fazy f_{ca} . Z prawej dla fazy f_{ab} . W obu przypadkach uwzględnione są obie podsieci punktów wirowych.

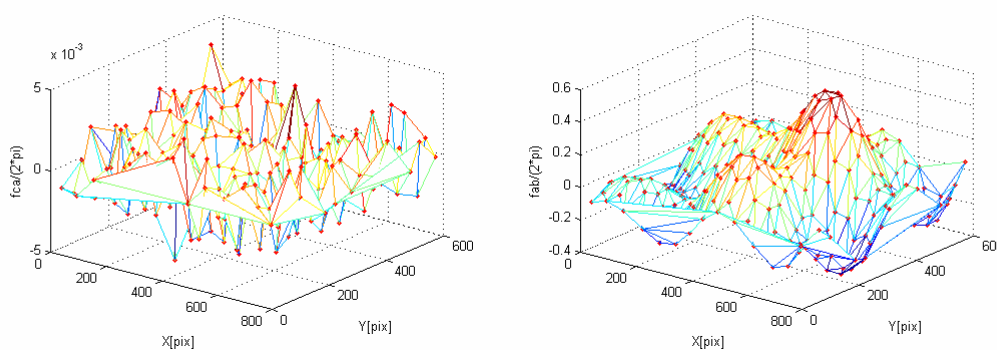
Płaszczyzny, względem których liczone są deformacje faz, wyznaczane są przy pomocy metody najmniejszych kwadratów, z punktów wirowych tworzących przedstawione powyżej powierzchnie. Następnie liczona jest różnica w osi pionowej pomiędzy powierzchniami tworzonymi przez punkty wirowe i płaszczyzny odniesienia. Obliczone różnice wyrażają stopień deformacji rozkładu fazy w obszarze badanym. Sposób obliczenia przedstawiony jest na przykładzie jednowymiarowego obszaru na rysunku (Rysunek 7.8). Linia prosta w kolorze czarnym przedstawia uzyskaną płaszczyznę odniesienia. Znakami ‘+’ oznaczone są punkty wirowe. Położenie w pionie kolejnych punktów jest równomierne i odpowiada wartości fazy 2π , natomiast położenie w poziomie nie jest równomierne i zależy od rozkładu fazy. Przemieszczenie dx przekształca się w takiej operacji na deformację fazy df . Rozkład fazy

przedstawiony jest względem poziomej linii prostej oznaczonej kolorem niebieskim na tym samym rysunku poniżej.



Rysunek 7.8 Sposób obliczenia deformacji rozkładu fazy z przemieszczenia wirów. 'dx' – przemieszczenie, 'df' – deformacja rozkładu fazy odpowiadająca przemieszczeniu punktu wirowego względem pozycji w regularnej strukturze.

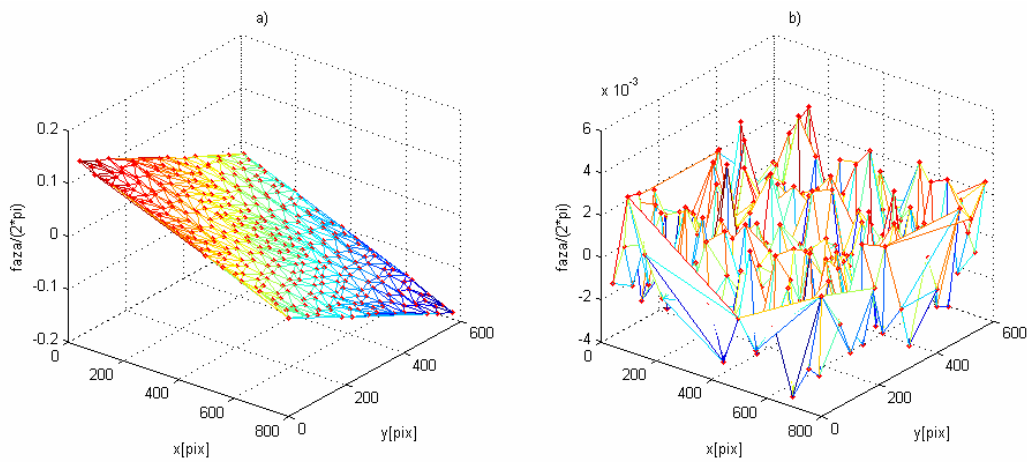
Wynik obliczenia rozkładu fazy f_{ca} i f_{cb} w analizowanym obszarze, w sposób przedstawiony powyżej, przedstawia rysunek poniżej (Rysunek 7.9). Jak można zauważyć na wykresie z lewej strony rysunku, wartości deformacji fazy są rzędu 10^{-3} długości fali. Taka dokładność wynika z błędów lokalizacji i dokładności obliczeń. Powierzchnia na wykresie z prawej strony rysunku, odpowiada powierzchni frontu falowego fali UB (Rysunek 7.4). Przy czym wartość rozkładu fazy jest określona w punktach, w których znajdowały się punkty wirowe.



Rysunek 7.9 Uzyskany wynik rekonstrukcji fazy f_{ca} - z lewej oraz f_{cb} - z prawej.

Ponieważ w przedstawianym przykładzie dokładnie znany jest kształt frontu falowego fali UB, można obliczyć błąd odtworzenia fazy jako różnicę wartości zadanej i wartości otrzymanej w wyniku przedstawionej metody. Błąd określenia zniekształcenia powierzchni fazowej (Rysunek 7.10 a) wynika w większości z wyznaczenia płaszczyzny odniesienia,

względem której obliczana jest deformacja. Ten błąd zależy od wartości deformacji rozkładu fazy, ponieważ wykorzystana jest metoda najmniejszych kwadratów. Błąd wynikający z wyboru płaszczyzny odniesienia wpływający na wynik obliczeń rozkładu fazy, ma ściśle określony charakter i w związku z tym może być wyeliminowany, ponieważ wyraża on niedokładność wyznaczenia pochylenia płaszczyzny. Po skorygowaniu nachylenia płaszczyzny odniesienia błąd odtworzenia zaburzeń rozkładu fazy fab znacznie się zmniejsza do wartości rzędu 10^{-3} (Rysunek 7.10. b), tak jak w przypadku odtworzenia zaburzeń fazy fca.



Rysunek 7.10 Błąd odtworzenia zaburzeń fazy fab. a) - różnica wartości uzyskanej od zadanej na wstępie, b) - wartość błędu odtworzenia po korekcji (błąd odtworzenia kształtu zaburzenia). Obszar analizowany określony przez płaszczyznę XY gdzie 1pix=9 μ m.

Opracowana metoda pomiaru zniekształceń frontu falowego wykorzystuje stworzone wcześniej metody lokalizacji punktów wirowych oraz metody określania znaku ładunku topologicznego wiru optycznego. Dotychczas ta metoda pomiaru testowana była tylko teoretycznie przy pomocy symulacji komputerowych, do czasu zredagowania niniejszej rozprawy wyniki eksperymentalne potwierdzające poprawne działanie opracowanej metody pomiarowej nie są jeszcze znane.

8. Podsumowanie

Obecnie prowadzone są prace nad wykorzystaniem wirów optycznych w wielu dziedzinach nauki i techniki. Niniejsza praca skoncentrowana została na wykorzystaniu wirów optycznych do celów metrologicznych, z wykorzystaniem technik interferencyjnych. Przedstawione powyżej wyniki są częścią szerszych prac poświęconych wykorzystaniu techniki IWO dlatego, ze względu na przejrzystość, nieuniknione było przedstawienie wyników uzyskanych niebezpośrednio przeze mnie, jednakże w każdym przypadku zostało to w pracy zaznaczone.

W prezentowanej rozprawie zostały przedstawione kolejne etapy pracy nad wykorzystaniem nieciągłości fazy w polu optycznym, zwane wirami optycznymi, do zastosowań metrologicznych. Koncepcja pomiaru, przedstawionego w pracy, realizowana przez opracowane algorytmy, polega na zarejestrowaniu obrazu interferencyjnego w układzie interferometru na wirach optycznych bez obiektu badanego oraz z obiektem badanym na drodze jednej z wiązek, a następnie porównanie wyników interpretacji powstałych rozkładów rozmieszczenia punktów wirowych w obu sesjach.

Ze względu na bardzo duży wpływ dokładności lokalizacji wirów optycznych na dokładności pomiarów z wykorzystaniem sieci wirów optycznych, opracowywanych było jednocześnie kilka sposobów lokalizacji wirów optycznych. Opracowanie kilku metod w tym samym czasie było wskazane również ze względu na możliwość porównania efektów ich działania. W wyniku przeprowadzonych symulacji i analizy wybrane zostały cztery procedury przetwarzania i interpretacji obrazów interferencyjnych Iabc, Iab, Ibc oraz Iac, które zostały opisane w niniejszej pracy (rozdział 4). Wykorzystanie obrazów interferencyjnych powstałych w wyniku interferencji czterech wiązek, z których faza jednej jest kontrolowana, nastąpiło znacznie później, a podyktowane było powstaniem układu interferometru na wirach optycznych, w którym zastosowanie poprzednio wspomnianych metod nie jest możliwe (Rysunek 2.17).

Wir optyczny zgodnie z przytoczoną z literatury tematu wiedzą, powstaje w przypadku interferencji trzech wiązek w miejscu ściśle określonym przez fazę oraz amplitudy interferujących fal. Dzięki temu, przy określonych amplitudach interferujących fal punkt wirowy może być traktowany jako znacznik fazy w polu optycznym. W wykorzystywanym układzie interferometru powstają dwie grupy takich znaczników

określających różne wartości faz interferujących fal. Możliwe jest wykorzystanie znaczników bez określenia, który punkt wirowy należy do której grupy, jak w przypadku opisanej metody pomiaru małych kątów (rozdział 7.1) albo, jak w przypadku metody pomiaru zaburzeń frontu falowego (rozdział 7.2) konieczne jest określenie, do której grupy należy każdy z wykorzystanych punktów. Ze względu na konieczność rozdzielenia wirów optycznych na dwie grupy o różnych znakach ładunków topologicznych oraz możliwości wykorzystanie informacji o ich znakach, opracowane i przedstawione zostały dwie procedury określenia znaków ładunków topologicznych (rozdział 5) do wykorzystania w zależności od konfiguracji stosowanego układu optycznego. Szczególne znaczenie może mieć metoda widelców, która w połączeniu z metodą lokalizacji wirów z wykorzystaniem przesunięcia fazy może być realizowana w jednym układzie optycznym bez zmiany jego konfiguracji.

Kolejnym etapem po lokalizacji punktów wirowych oraz określeniu ich znaku jest analiza powstałej struktury. W pracy zostały zaproponowane sposoby analizy takich struktur (rozdział 6) w celu późniejszego przetworzenia informacji o położeniach znaczników na wartość wielkości mierzonej.

Jako przykłady zastosowania wirów optycznych do celów pomiarowych z wykorzystaniem opracowanych technik zaprezentowane zostały (rozdział 7) dwie metody pomiarowe. Jedna z nich z wykorzystaniem technik statystycznych służy do określenia kąta łamiącego klina optycznego jako jednej wartości, druga z metod, służąca do pomiaru zaburzeń frontu falowego wprowadzanego przez badany element optyczny, wykorzystuje rozkład punktów wirowych do określenia mierzonego parametru w funkcji położenia w obszarze badanym.

Przedstawione w niniejszej pracy wyniki moich badań zostały opublikowane w recenzowanych czasopismach lub przedstawiane były na konferencjach naukowych wymienionych poniżej.

1. J. Masajada, A. Popiołek – Masajada, E. Frączek, **W. Frączek**, “Vortex Points Localization Problem in Optical Vortices Interferometry”, *Optics Communications*, **234** (2004) p. 23-28.
2. E. Frączek, **W. Frączek**, “The experimental method to recognize signs of optical vortices”, *SPIE Proc.* **5945** (XIV Slovak-Czech-Polish Optical Conference, Nitra, September 2004)

3. E. Frączek, **W. Frączek**, J. Mroczka, „The experimental method for topological charge determination of optical vortices in a regular net.”, *Optical Engineering* **44(2)** (2005), p.25601
4. E. Frączek, **W. Frączek**, “Two methods to determination topological charge in regular net of optical vortices.” *SPIE* vol. **5858**, (Optical Metrology, Monachium, June 2005)
5. **W. Frączek**, E. Frączek, J. Mroczka, „High precision parallel glass plate test with the use of the optical vortex interferometer” *SPIE* vol. **6189** (Photonics Europe, Strasbourg, April 2006)
6. E. Frączek, **W. Frączek**, J. Masajada, “The new method of topological charge determination of optical vortices in the interference field of the optical vortex interferometer”, *Optik*, no. **9**, vol. **117**, (2006), s. 423-425,
7. A. Popiołek-Masajada, M. Borwińska and **W. Frączek**, "Testing a new method for small-angle rotation measurements with the optical vortex interferometer", *Meas. Sci. Technol.* **17** (2006) 653-658
8. G. Budzyń, E. Frączek, **W. Frączek**, J. Mroczka „The influence of a laser beam frequency stability on vortex points dislocation in an Optical Vortices Interferometer”, *Appl. Optics*, vol **45** ,No.**17** (2006)
9. **W. Frączek**, A. Popiołek-Masajada, J. Masajada „Phase shifting technique for Vortex points localization in optical vortex interferometer. (XVI Polish-Czech-Slovak Optical Conference, Polanica Zdrój, September 2008)

W przypadku pozycji 9 powyższej listy nie został wydany wolumin SPIE z konferencji w Polanicy Zdroju do czasu ukończenia redagowania niniejszej pracy, dlatego nie znajduje się on na liście.

W moim przekonaniu zaprezentowane wyniki pracy potwierdzają postawioną tezę o możliwości opracowanie metod pomiarowych wielkości pola optycznego dzięki analizie pozycji nieciągłości fazowych w tym polu. Jednocześnie osiągnięty został cel pracy.

Bibliografia

- [1] I. Freund, N. Shvartsman, "Wave-field phase singularities: The sign principle", *Phys. Rev. Lett.* **50** (1994), 5164
- [2] J. Masajada, B. Dubik, "Optical vortex generation by three plane wave interference", *Opt. Comm.* **198** (2001), 21-27
- [3] E. Schonbrunn, R. Piastun, P. Jordan, J. Cooper, K. Wulff, J. Courtial, M. Padgett, "3D interferometric optical tweezers using a single spatial light modulator", *Opt. Express*, **13** (2005), 3777-3786
- [4] J.H. Lee, G. Foo, E.G. Johnson, G.A. Swartzlander, "Experimental verification of an optical vortex coronagraph", *Phys. Rev. Lett.* **97** (2006), 053901-4
- [5] C. Velzel, J. Masajada, "Superresolution phase image microscope", *Opt. Appl.* **39** (1999), 293-300
- [6] E. Johnson, J. Stack, C. Koehler, "Light coupling by a vortex lens into graded index fiber", *J. Lightwave Technol.* **19** (2001), 753-758
- [7] J. Courtial, K. O'Holleran, „some of the mechanical and quantum-mechanical properties of optical vortices", *Eur. Phys. J.* **145** (2007), 35-47
- [8] J.F. Nye, M.V. Berry, "Dislocations in wave trains", *Proc. R. Soc. Lond. A.* **336** (1974), 165-190
- [9] J.E. Pearson, T.C. McGill, S. Kurtin, A. Yariv, "Diffraction of Gaussian Laser Beams by a Semi-Infinite Plane", *J. Opt. Soc. Am.* **59** (1969), 1440-1445
- [10] J. Barzykowski "Współczesna metrologia", WNT, Warszawa 2004
- [11] M. Vasnetsov, K. Staliunas, "Optical vortices", Nova Science Publishers 1999
- [12] B.I. Halperin. "Statistical mechanics of topological defects.", *Physics of Defects*, Amsterdam 1981, 813-857
- [13] M.V. Berry. "Much ado about nothing: optical dislocation lines (phase singularities, zeros, vortices...)", *SPIE*, vol. **3487** (1998), 1-15
- [14] M.R. Dennis „Topological Singularities in Wave Fields" University of Bristol, praca doktorska, November 2001
- [15] P. Senthilkumaran, "Optical phase singularities in detection of laser beam collimation" *Appl. Opt.* **42** (2003), 6314-6320

- [16] L.Marrucci, C.Manzo, D.Paparo, "Optical Spin-to-Orbital Angular Momentum Conversion in Inhomogeneous Anisotropic Media" *Phys. Rev. Lett.* **96** (2006), 163905
- [17] V.Yu. Bazhenov, M.S. Soskin, M.V. Vasnetsov, "Screw dislocations in light wavefronts", *J. Mod. Opt.* **39** (1992), 985-990
- [18] M.S. Soskin, M.V. Vasnetsov, "Singular optics", *Progress in Optics* **42** (2001), Chapter 4,
- [19] M.R. Dennis "Local phase structure of wave dislocation lines: twist and twirl" *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* **6** (2004), S202-S208
- [20] I.V. Basisty, M.S. Soskin, M.V. Vasnetsov, "Optical wavefront dislocation and their properties" *Opt. Comm.*, **199** (1995), 604-612
- [21] L. Allen, M.J. Padgett, M. Babiker, "The orbital angular momentum of light" *Progress in Optics*, E. Wolf (Ed.), Vol. **XXXIX** (1999), Chapter IV
- [22] I. Freund, "Optical vortices in Gaussian random wave fields: statistical probability densities", *J. Opt. Soc. Am. A*, **11** (1994), 1644-1652
- [23] I. Freund, V. Freilikher, "Parametrization of anisotropic vortices", *J. Opt. Soc. Am. A*. vol. **14**, No. **8** (1997), 351-359
- [24] J. Masajada, "Optical vortices and their application to interferometry", OWPW Wrocław 2004
- [25] I. Freund, "Vortex derivatives", *Opt. Comm.* **137** (1997), 118-126
- [26] M.V. Berry, "Coloured phase singularities", *New Journal of Physics* **4** (2002), 66.1-66.14
- [27] M.V. Berry, "Exploring the colours of dark light", *New Journal of Physics* **4** (2002), 74.1-74.14
- [28] J. Leach, M.J. Padgett, "Chromatic effects near a white-light vortex" *Europhysics News* vol. **35**, No. **2** (2004)
- [29] N.R. Heckenberg, R. McDuff, C.P. Smith, A.G. White, "Generation of optical phase singularities by computer-generated holograms", *Opt. Lett.* **17** (1992), 221-223
- [30] E.G. Abramochkin, N. Losevsky, V. Volostnikov, "Generation of spiral-type laser beams", *Opt. Comm.*, **141** (1997), 59-64
- [31] T. Ackemann, E. Krieger, W. Lange, "Phase singularities via nonlinear beam propagation in sodium vapor", *Opt. Comm.* **155** (1995), 339
- [32] A.V. Mamaev, M. Saffman, A.A. Zazulya "Propagation of dark stripe beams in nonlinear media; snake instability and creation of optical vortices", *Phys. Rev. Lett* **76** (1996), 2262

- [33] I. Freund, „Saddles, singularities, and extrema in random phase fields”, *Phys. Rev. E*, **52** (1995), 2348-2360
- [34] J.F. Nye, “Natural focusing and fine structure of light”, IOP Bristol 1999
- [35] J. Masajada “Synthetic holograms for optical vortices generation – Image evaluation” *Optik*, **110** (1999), 554-558
- [36] Z.S. Sacks, D. Rozas, G.A. Swartzlander, “Holographic formation of optical-vortex filaments”, *J. Opt. Soc. Am. B* **15**, No. **8**, (1998), 2226-2234
- [37] E. Frączek, „Interferometr na wirach optycznych.”, Raporty Inst. Fiz. PWroc. 2006 Ser. PRE nr 29, <http://www.dbc.wroc.pl/publication/1251>
- [38] L. Allen, S.M. Barnett, M.J. Padgett, „Optical Angular Momentum“, Institute of Physics Publishing, London 2003
- [39] J. Courtial, M.J. Padgett, “Performance of a cylindrical lens mode converter for producing Laguerre-Gaussian laser modes”, *Opt. Comm.* **159** (1999), 13-18
- [40] M.W. Beijersbergen, R.P.C Coerwinkel, M. Kristensen, J.P. Woerdman “Helical-wavefront laser beam produced with a spiral phaseplate”, *Opt. Comm.*, **112** (1994), 321-327
- [41] S.N. Khonina, V.V. Shinkaryev, V.A. Soifer, G.V. Uspleniev, “The phase rotor filter”, *J. Mod. Opt.*, **39** (1992), 1147-1154
- [42] B. Harke, J. Keller, C.K. Ullal, V. Westphal, A. Shonle, S.W. Hell, “Resolution scaling in STED microscopy” *Opt. Express*, Vol. **16**, No. **6** (2008) 4154-4162
- [43] T. Young, “Experimental demonstration of the General Law of the Interference of Light”, *Philos. Trans. R. Soc. London* **94**, (1804)
- [44] J. Masajada, A. Popiołek-Masajada, M. Leniec, „Creation of vortex lattices by a wavefront division” *Opt. Express*, Vol. **15** No. **8** (2007), 5196
- [45] K.W. Nicholls, J.F. Nye, “Three-beam model for studying dislocations in wave pulses”, *J. Phys. A: Math. Gen.* **20** (1987), 4673-4696
- [46] J. Masajada, A. Popiołek-Masajada, D.M. Wieliczka, “The interferometric system using optical vortices as phase marks” *Opt. Comm.* **207** (2002), 85-93
- [47] P. Kurzynowski, W.A. Woźniak, E. Frączek „Optical vortices generation Rusing the Wollaston prism”, *App. Opt.* Vol. **45** , No. **30** (2006), 7898-7903
- [48] W. Wang, N. Ishii, S.G. Hanson, Y. Miyamoto, M. Takeda, “Phase singularities in analytic signal of white-light speckle pattern with application to micro-displacement measurement”, *Opt. Comm.* **248** (2005), 59-68

- [49] W. Wang, T. Yokozeki, R. Ishjima, A. Wada, Y. Miyamoto, M. Tekada, S. Hanson, "Optical Hortex metrology for nanometric spece displacement measurement", *Opt. Express* **14** (2006), 120-127
- [50] K. Patorski, M. Kujawińska, L. Sałbut, „Interferometria laserowa”, OWPW, Warszawa 2005
- [51] J. Masajada, A. Popiołek-Masajada, E. Frączek, W. Frączek, "Vortex point localization problem in optical vortices interferometry" *Opt. Comm.* **234** (2004), 23-28
- [52] **W. Frączek**, A. Popiołek-Masajada, J. Masajada „Phase shifting technique for Vortex points localization in optical vortex interferometer. (XVI Polish-Czech-Slovak Optical Conference, Polanica Zdrój, September 2008) SPIE (In Press)
- [53] J.R. Mayer-Arendt, „Wstęp do optyki”, PWN, Warszawa 1977
- [54] G. Budzyń, E. Frączek, W. Frączek, J. Mroczka „Influence of a laser beam's frequency stability on dislocation of vortex points in an optical vortex interferometer" *App. Opt.* Vol.**45**. No.**17** (2006), 3982-3984
- [55] E. Frączek, J. Mroczka, "Influence of selected factors for localization accuracy in the Optical Vortex Interferometer", *Metrology and Measurement Systems*, vol. **XV**, No**1** (2008), 3-8
- [56] V.P. Aksenov, O. Tikhomirowa, "Theory of singular-phase reconstruction for an optical speckle field in the turbulent atmosphere", *J. Opt. Soc. Am. A.* vol. **19**, No. **2**, (2002), 351-359
- [57] W. Wang, S.G. Hanson, Y. Miyamoto, M. Takeda, „Experimental Investigation of Local Properties and Statistics of Optical Vortices in Random Wave Fields“, *PRL* **94** (2005), 103902
- [58] D. Malacara, M. Servín, Z. Malacara, "Interferogram Analysis for Optical Testing", Marcel Dekker, New York 1998
- [59] Edit by D.W. Robinson, G.T Reid, "Interferogram Analysis", Institute of Physics Publishing, London 1993
- [60] M.S. Soskin, V.N. Gorshkov, M.V. Vasnetsov, J.T. Malos, N.R. Heckenberg, "Topological charge and angular momentum of light beams carrying optical vortices", *Physical Review A*, **56** (1997), 4064-75,
- [61] H.V. Bogatiryova, C.V. Felde, P.V. Polyanskii, "Referenceless testing of vortex optical beams." *Optica Applicata*, vol. **XXXIII**, No. **4** (2003)
- [62] E. Frączek, **W. Frączek**, "The experimental method to recognize signs of optical vortices", *SPIE Proc.* **5945** (2004)

- [63] E. Frączek, **W. Frączek**, J. Mroczka, “The experimental method for topological charge determination of optical vortices in a regular net” *Optical Engineering* **44(2)** (2005), 25601
- [64] E. Frączek, **W. Frączek** J. Masajada, “The new method of topological charge determination of optical vortices in the interference field of the optical vortex interferometer”, *Optik*, vol. **117**, no. **9**, (2006), s. 423-425
- [65] E. Frączek, **W. Frączek**, “Two methods to determination topological charge in regular net of optical vortices” *SPIE Proc.***5858** (2005)
- [66] I. Freund, N. Shvartsman, V. Freilikhen, „Optical dislocation networks in highly random media”, *Opt. Comm.* **101**, 247-264 (1993)
- [67] H. He, M.E.J. Friese, N.R. Heckenberg, H. Rubinsztein-Dunlop „Direct observation of transfer of angular momentum to absorptive particles from a laser beam with a phase singularity“, *Phys. Rev. Lett.*, **75** (1995), 826
- [68] A. Popiołek-Masajada, M. Barwińska, **W. Frączek**, „Testing a New method for small-angle rotation measurements with the optical vortex interferometer.” *Meas. Sci. Technol.* **17** (2006), 653-658
- [69] **W. Frączek**, E. Frączek, J. Mroczka, „High precision parallel glass plate test with the use of the optical vortex interferometer”, , *SPIE Proc.***6189** (2006)
- [70] J. Masajada, „Small angle rotation measurement with optical vortex interferometer” *Opt. Commun.* **234**, 373–81