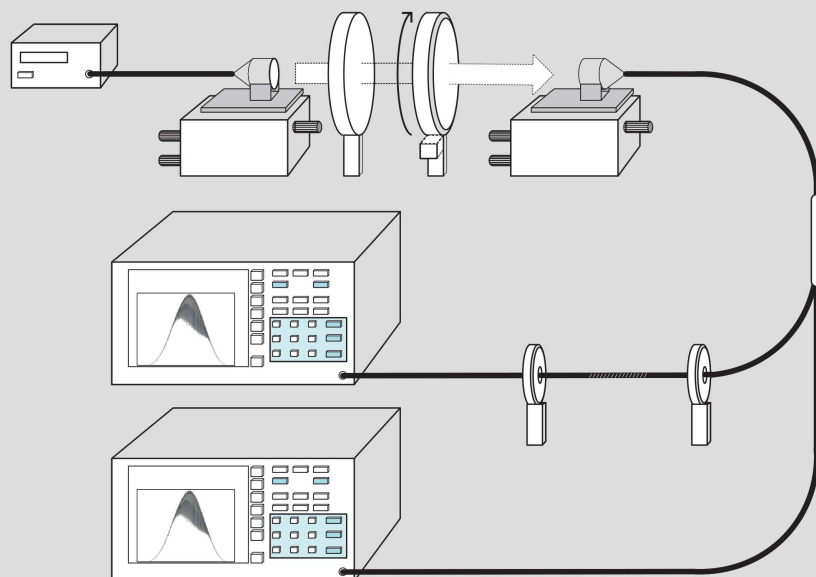


Metoda wyznaczania kąta obrotu płaszczyzny polaryzacji światła z wykorzystaniem skośnej siatki Bragga i transformaty falkowej

Marta Dziuba-Kozieł



**Metoda wyznaczania
kąta obrotu płaszczyzny
polaryzacji światła
z wykorzystaniem
skośnej siatki Bragga
i transformaty falkowej**

Rada Naukowa Wydawnictwa Politechniki Lubelskiej

Przewodnicząca:

Agnieszka Rzepka

Dyrektor CINT:

Katarzyna Weinper

Przedstawiciele Dyscyplin Naukowych Politechniki Lubelskiej:

Marzenna Dudzińska

Małgorzata Franus

Arkadiusz Gola

Beata Kowalska

Grzegorz Komarzyniec

Jarosław Latański

Tomasz Lipecki

Zbigniew Łagodowski

Lucjan Pawłowski

Natalia Przesmycka

Halina Rarot

Magdalena Rzemieniak

Arkadiusz Syta

Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej:

Magdalena Chołojczyk

Karolina Famulska-Ciesielska

Katarzyna Pełka-Smętek

MONOGRAFIE POLITECHNIKI LUBELSKIEJ

Metoda wyznaczania kąta obrotu płaszczyzny polaryzacji światła z wykorzystaniem skośnej siatki Bragga i transformaty falkowej

Marta Dziuba-Kozieł



WYDAWNICTWO
POLITECHNIKI
LUBELSKIEJ

Lublin 2025

Recenzent:

dr hab. inż. **Grzegorz Świrniak**, prof. PWr, Politechnika Wrocławska

Autor:

dr inż. **Marta Dziuba-Kozieł**, ORCID: 0009-0002-8281-6072

Politechnika Lubelska – ROR: <https://ror.org/024zjzd49>

Redaktor prowadzący: **Magdalena Chołojczyk**

Korekta językowa: **zespół redakcyjny**

Skład i łamanie: **Katarzyna Pełka-Smętek**

Projekt graficzny serii: **Łukasz Maj**

Monografia powstała na podstawie rozprawy doktorskiej dr inż. Marty Dziuby-Kozieł pt. „Optyczna metoda wyznaczania kąta obrotu płaszczyzny polaryzacji światła z wykorzystaniem transformaty falkowej”, napisanej pod kierunkiem prof. dr. hab. inż. Piotra Kisały, obronionej w 2024 r. na Politechnice Lubelskiej.

Zdjęcie na okładce wykonane zostało przez autorkę.

O ile nie wskazano inaczej, rysunki stanowią opracowanie własne autorki.

Publikacja wydana za zgodą **Rektora Politechniki Lubelskiej**

ISBN: 978-83-7947-644-2 (wersja drukowana)

ISBN: 978-83-7947-645-9 (wersja elektroniczna)

DOI: 10.35784/9788379476459

Wydawca: Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej
www.wpl.pollub.pl
ul. Nadbystrzycka 36C, 20-618 Lublin
tel. (81) 538-46-59



WYDAWNICTWO
POLITECHNIKI
LUBELSKIEJ

Książka udostępniona jest na licencji Creative Commons Uznanie autorstwa – na tych samych warunkach 4.0 Międzynarodowe (CC BY-SA 4.0)

Nakład: 50 egz.

Spis treści

1. Wstęp	11
2. Światłowodowe struktury Bragga wykorzystywane w charakterze czujników wielkości fizycznych	13
2.1. Zasada działania struktur Bragga	13
2.2. Podstawowe parametry struktur optycznych z siatkami Bragga	14
2.3. Rodzaje struktur dyfrakcyjnych we włóknach światłowodowych	16
2.3.1. Jednorodne proste siatki Bragga	16
2.3.2. Siatki apodyzowane	18
2.3.3. Siatki Bragga o liniowej zmianie okresu	19
2.3.4. Struktury dyfrakcyjne długookresowe	20
2.3.5. Struktury o przesuniętej fazie	20
2.3.6. Struktury Bragga o pochylonych płaszczyznach dyfrakcyjnych	22
3. Wytwarzanie struktur dyfrakcyjnych na potrzeby pracy	25
3.1. Metody wytwarzania siatek Bragga	25
3.2. Stanowisko do wytwarzania struktur	28
3.3. Charakterystyki widmowe uzyskanych siatek	30
4. Metody pomiaru kąta obrotu płaszczyzny polaryzacji światła	31
5. Badania laboratoryjne kąta obrotu płaszczyzny polaryzacji światła propagującego we włóknach światłowodowych	37
5.1. Stanowisko pomiarowe	37
5.2. Pomiar kąta obrotu polaryzacji światła	39
5.3. Identyfikacja zakresu długości fal do dalszej analizy	40
6. Opis metody wyznaczania i pomiaru pośredniego kąta obrotu płaszczyzny polaryzacji światła wykorzystującej światłowodowe pochylone struktury dyfrakcyjne TFBG	45
6.1. Transformata falkowa	45
6.2. Zależności pomiędzy współczynnikami transformaty	49
6.3. Analiza przydatności wybranych falek i ich współczynników w ocenie kąta obrotu płaszczyzny polaryzacji światła	52
6.4. Metoda automatycznego wyboru falek i poziomów dekompozycji	66
6.5. Kalibrowanie układu pomiarowego	68
6.6. Metoda wyznaczania kąta obrotu na podstawie danych z analizatora widma	70
6.7. Dodatkowa kalibracja na potrzeby pomiaru w zakresie 82–98 stopni	74
6.8. Pomiar w zakresie 82–98 stopni obrotu	77
6.9. Dyskusja wyników	79

7. Analiza wpływu zmian parametrów proponowanej metody na uzyskane wyniki	83
7.1. Analiza wpływu zastosowanej falki na dokładność pomiaru	83
7.2. Analiza wpływu akceptowanego poziomu zakłóceń na błąd pomiaru	93
7.3. Analiza wpływu stopnia regresji zastosowanego wielomianu na dokładność pomiaru	96
7.4. Analiza efektywności obliczeniowej	97
8. Wnioski	103
Bibliografia	107

Metoda wyznaczania kąta obrotu płaszczyzny polaryzacji światła z wykorzystaniem skośnej siatki Bragga i transformaty falkowej

Streszczenie

Tematem monografii jest zagadnienie pomiaru kąta obrotu płaszczyzny polaryzacji światła propagującego w światłowodzie. W zastosowanym układzie pomiarowym elementem czułym na zmiany kąta obrotu płaszczyzny polaryzacji światła jest skośna siatka Bragga. Widmo światła propagującego przez siatkę rejestrowane jest za pomocą analizatora widma, a następnie przetwarzane numerycznie w celu wyliczenia zmierzonego kąta obrotu.

Dokonano analizy możliwości wykorzystania dyskretnej transformaty falkowej do przetworzenia zmierzonego widma światła na kąt obrotu płaszczyzny polaryzacji światła. Zaproponowano, wykonano, przebadano i przedyskutowano autorską metodę wyznaczania kąta obrotu polaryzacji światła wykorzystującą dyskretną transformatę falkową, udowadniając tym samym możliwość zastosowania analizowanego przetworzenia w badanym zastosowaniu. W pierwszej części monografii opisano działania siatek Bragga oraz omówiono ich rodzaje. Przedstawiono również metody wytwarzania siatek Bragga oraz sposób wytworzenia siatek na potrzeby niniejszej pracy. Drugą część monografii poświęcono zagadnieniu pomiaru kąta obrotu płaszczyzny polaryzacji światła. Omówiono istniejący stan techniki. Przedstawiono stanowisko laboratoryjne wykorzystywane w trakcie badań. Przeanalizowano właściwości dyskretnej transformaty falkowej w kontekście jej przydatności w prowadzonych badaniach. Na podstawie przeprowadzonej analizy zaprojektowano autorską metodę pomiaru kąta obrotu płaszczyzny polaryzacji światła wykorzystującą badane przekształcenie.

W monografii udowodniono, że możliwy jest pomiar kąta obrotu płaszczyzny polaryzacji światła propagującego w światłowodzie w zakresie 0° – 180° , a dyskretna transformata falkowa może być z powodzeniem użyta do przeprowadzenia wymaganych obliczeń.

Słowa kluczowe: TFBG, pomiar, polaryzacja światła, DWT

The method for determining the light polarisation plane rotation using tilted fibre Bragg grating and wavelet transform

Abstract

The subject of the monograph is the measuring the rotation angle of the polarisation plane of light propagating through an optical fibre. The measurement system employs a tilted Bragg grating as the element sensitive to changes in the polarisation plane's rotation angle. The spectrum of the light transmitted through the grating is recorded using a spectrum analyser and subsequently processed numerically to compute the rotation angle.

An analysis of the feasibility of applying a discrete wavelet transform (DWT) to convert the measured light spectrum into the rotation angle of the polarisation plane is presented. The author introduces, implements, tests, and discusses a method for determining the light polarisation plane rotation using a discrete wavelet transform, demonstrating the effectiveness of the proposed approach for the studied application. The first part of the monograph provides a detailed description of the working principles of Bragg gratings, including a discussion of their various types. Additionally, methods for the production of Bragg gratings are presented, along with a description of the gratings fabricated for this research. The second part focuses on measuring the rotation angle of light's polarisation plane. It reviews the current state of the art in this area and describes the laboratory setup employed during the research. The properties of the discrete wavelet transform are analysed concerning their potential applicability in ongoing research. Based on this analysis, an original method for measuring the angle of rotation of light's polarisation plane using a discrete wavelet transform is proposed.

The monograph demonstrates that it is feasible to measure the rotation angle of the polarisation plane of light propagating in optical fibre within the range of 0° to 180° , and that a discrete wavelet transform can be successfully applied to perform the necessary calculations.

Keywords: TFBG, measurement, light polarisation, DWT

Wykaz ważniejszych oznaczeń

CFBG	– (ang. <i>chirped fibre Bragg grating</i>) światłowodowa siatka Bragga o liniowej zmianie okresu
DWT	– (ang. <i>discrete wavelet transform</i>) dyskretna transformata falkowa
FBG	– (ang. <i>fibre Bragg grating</i>) światłowodowa prosta siatka Bragga
FWHM	– (ang. <i>full width at half maximum</i>) szerokość połówkowa
LPFG	– (ang. <i>long period fibre grating</i>) światłowodowa długookresowa siatka Bragga
MSE	– (ang. <i>mean square error</i>) błąd średniokwadratowy
OSA	– (ang. <i>optical spectrum analyser</i>) analizator widma optycznego
PSFBG	– (ang. <i>phase shifted fibre Bragg grating</i>) światłowodowa siatka Bragga o przesuniętej fazie
SLD	– (ang. <i>superluminescent diode</i>) dioda superluminescencyjna
SLSR	– (ang. <i>side lobes suppression ratio</i>) współczynnik tłumienia wstęg bocznych
TFBG	– (ang. <i>tilted fibre Bragg grating</i>) światłowodowa skośna siatka Bragga
UV	– (ang. <i>ultraviolet</i>) światło ultrafioletowe
F	– funkcja zmiany wartości X_{sum} w funkcji kąta obrotu płaszczyzny polaryzacji światła
K	– zbiór odczytanych wartości kąta obrotu
K_I	– podzbiór zbioru K zawierający $\alpha \in [0^\circ, 90^\circ)$
K_{II}	– podzbiór zbioru K zawierający $\alpha \in (90^\circ, 180^\circ]$
M	– liczba współczynników transformaty na określonym poziomie dekompozycji
N	– liczba płaszczyzn dyfrakcyjnych w siatce
$N1$	– liczebność zbioru K_I
$N2$	– liczebność zbioru K_{II}
P	– liczba punktów pomiarowych
R_{sum}	– aproksymacja wartości X_{sum}
W	– przebieg zmienności współczynnika DWT w funkcji kąta obrotu płaszczyzny polaryzacji światła
X_{sum}	– suma wartości wszystkich współczynników wybranego poziomu transformaty
k	– współczynnik sprzęgania modów
$\rightarrow k_{in}$	– wektor falowy rozchodzenia się fali światła wejściowego padającego na siatkę
$\rightarrow k_r$	– wektor falowy światła odbitego od TFBG
$\rightarrow k_\Theta$	– wektor falowy światła propagującego przez TFBG

l	– długość siatki
n	– poziom dekompozycji falkowej
n_j	– j -ty współczynnik transformaty na n -tym poziomie dekompozycji
n_o	– średnia wartość współczynnika załamania rdzenia
x	– wartość współczynnika DWT
Δn	– amplituda zmian współczynnika załamania rdzenia
Θ	– kąt pochylenia płaszczyzn dyfrakcyjnych
Λ_g	– stała siatki Bragga
Λ_{max}	– najdłuższy okres pomiędzy dwoma strukturami Bragga występującymi w siatce
Λ_{min}	– najkrótszy okres pomiędzy dwoma strukturami Bragga występującymi w siatce
Λ_{pi}	– długość fali modów płaszczowych
α	– kąt obrotu płaszczyzny polaryzacji światła
$\alpha_{I\dot{s}r}$	– średni kąt obrotu płaszczyzny polaryzacji światła obliczony z wartości ze zbioru K_I
$\alpha_{II\dot{s}r}$	– średni kąt obrotu płaszczyzny polaryzacji światła obliczony z wartości ze zbioru K_{II}
β	– stała propagacji
κ	– współczynnik sprzężenia modów
λ	– długość fali światła
λ_B	– długość fali światła odpowiadająca rezonansowi Bragga
σ	– uśredniony współczynnik sprzęgania
σ_I	– odchylenie standardowe zbioru K_I
σ_{II}	– odchylenie standardowe zbioru K_{II}
σ_i	– współczynnik samosprzęgania
ϕ	– przesunięcie fazowe siatki PSFBG
ψ	– funkcja macierzysta falki

1. Wstęp

Wynalezienie światłowodu zapoczątkowało rewolucję technologiczną. Jej najpowszechniej znanym przejawem jest wszechobecny przesył danych przez łącza światłowodowe. Sieci światłowodowe zapewniają łączność na całym świecie. Światłowody znajdziemy nawet pod powierzchnią oceanów i mórz, gdzie pełnią rolę konektorów pomiędzy kontynentami [1]. Ich obecna przepustowość jest rzędu terabitów na sekundę i jest ciągle zwiększana [1]. Światłowody, ze względu na swoje właściwości, stosowane są tam, gdzie inne media komunikacyjne zawodzą – w środowiskach o wysokiej temperaturze [2], ciśnieniu, pod wysokim napięciem [3] [4], w środowisku o znaczącym poziomie promieniowania [5], w obecności agresywnych substancji, pola elektromagnetycznego i innych [6]. Istotne jest również, że światłowody nie tylko umożliwiają komunikację, ale także pozwalają na konstruowanie czujników pracujących w trudnych warunkach czy też pozwalających na pomiar ekstremalnych wartości, często niemożliwych do zmierzenia za pomocą innych technik pomiarowych. Przykładami takich czujników są: niewrażliwe na temperaturę czujniki wysokiego ciśnienia [7], czujniki stosowane w przemyśle naftowym do pomiaru ciśnienia czy monitorowania przepływu, profilowania termicznego [8] [9], czujniki optyczne odporne na promieniowanie [5], czujniki temperatury i odkształcenia przystosowane do pracy w temperaturze do 1000°C [10] i do 1200°C [11], czujniki gazów [12] oraz wiele innych. Istotne są również małe rozmiary czujników światłowodowych, ich wysoka precyzja oraz mnogość zastosowań [13] [14] [15] [16] [17] [18] [19].

Niemniej jednak wiele czujników światłowodowych jest wrażliwych na zmianę kąta polaryzacji światła [20]. W wielu zastosowaniach istotne jest określenie kąta obrotu płaszczyzny polaryzacji światła wprowadzanego do układu lub też po przejściu przez układ pomiarowy [4]. Problemem jest jednak niska precyzja istniejących czujników światłowodowych pozwalających na pomiar kąta obrotu płaszczyzny polaryzacji światła. Obecnie kąt obrotu płaszczyzny polaryzacji światła jest mierzony najczęściej przy użyciu polaryzatorów. Polaryzator jest obracany, a natężenie światła przechodzącego przez niego jest mierzone. Pomiar polega na zidentyfikowaniu kąta obrotu polaryzatora, przy którym zmierzone natężenie światła będzie największe [21]. Kąt ten będzie również kątem obrotu płaszczyzny polaryzacji światła. Wadą tej metody jest zastosowanie elementów ruchomych oraz znaczny rozmiar urządzenia pomiarowego. Uniknięcie stosowania elementów ruchomych możliwe jest poprzez przepuszczenie wiązki światła przez substancję skręcającą płaszczyznę polaryzacji światła, której kąt skręcania płaszczyzny polaryzacji światła jest proporcjonalny do wartości indukcji pola magnetycznego przechodzącego przez tę substancję [22]. W rozwiązaniu tym możliwe jest zastosowanie pomiaru pośredniego poprzez zmierzenie natężenia prądu indukującego pole magnetyczne, przy którym natężenie światła przechodzącego przez analizator będzie maksymalne. Pomiar kąta obrotu płaszczyzny polaryzacji światła z dużą precyzją umożliwiają magnetometry atomowe lub polarymetry atomowe [23].

Wybór urządzeń pozwalających na pomiar kąta jest dosyć różnorodny. Jednak dostępne urządzenia są trudne do zminiaturyzowania, mogą być wrażliwe na zanieczyszczenia lub inne czynniki zewnętrzne. Urządzenia o dużej precyzji będą również drogie. Rozwiązanie wymienionych problemów może zostać osiągnięte przez zastosowanie czujników światłowodowych. Charakteryzują się one niewielkimi rozmiarami – najczęściej spotykana średnica włókna wraz z płaszczem wynosi 125 mikrometrów. Umieszczenie czujnika kąta obrotu płaszczyzny polaryzacji światła wewnątrz włókna światłowodowego pozwoli na uzyskanie wymienionych zalet. Mierniki kąta obrotu płaszczyzny polaryzacji światła mogą być stosowane jako czujniki położenia obracających się elementów lub znaleźć zastosowanie przy ich pozycjonowaniu.

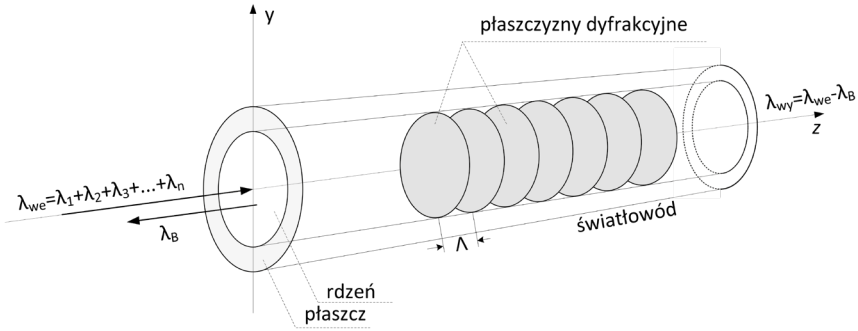
W niniejszej monografii zaprezentowany został układ do pomiaru kąta obrotu płaszczyzny polaryzacji światła wykorzystujący skośne siatki Bragga oraz bazujący na przekształceniu falkowym. Przekształcenie to jest używane do przetworzenia widma światła propagującego przez TFBG i wyliczenia wartości współczynników dyskretnej transformaty falkowej używanych do obliczenia zmierzonego kąta obrotu płaszczyzny polaryzacji światła.

2. Światłowodowe struktury Bragga wykorzystywane w charakterze czujników wielkości fizycznych

Siatki Bragga to zaburzenie efektywnego współczynnika załamania światła w rdzeniu światłowodu [24]. Zazwyczaj są to periodyczne struktury wytwarzane we włóknach światłowodowych. Składają się z naprzemiennie ułożonych warstw o różnym współczynniku załamania światła [25].

2.1. Zasada działania struktur Bragga

Warstwy o różnym współczynniku załamania umieszczane są w światłowodzie w taki sposób, że propagujące światło wielokrotnie je napotyka. Światło, napotykając te warstwy, ulega dyfrakcji. Odbiciu ulegają tylko fale o określonej długości λ_p , odpowiadającej rezonansowi Bragga [26]. Długość odbijanej fali świetlnej λ_i zależy od odległości pomiędzy płaszczyznami dyfrakcyjnymi. Fale świetlne odbite od kolejnych płaszczyzn dyfrakcyjnych sumują się. Dlatego też współczynnik odbicia siatki zależy od liczby płaszczyzn dyfrakcyjnych wytworzonych w światłowodzie, czyli od długości siatki [26]. Sposób ułożenia warstw dyfrakcyjnych i zasadę działania struktury Bragga zaprezentowano na rysunku 2.1 [27].



Rys. 2.1. Schemat i zasada działania struktury Bragga

2.2. Podstawowe parametry struktur optycznych z siatkami Bragga

Podstawowymi parametrami struktur Bragga są okres siatki oraz efektywny współczynnik załamania rdzenia światłowodu. Od nich zależy centralna długość fali siatki [28]. W przypadku jednorodnej prostej siatki Bragga odbijane są fale o długości λ_B , którą można wyznaczyć ze wzoru:

$$\lambda_B = 2(n_{eff}^r) \cdot \Lambda_g, \quad (2.1)$$

gdzie: n_{eff}^r oznacza efektywną wartość współczynnika załamania rdzenia światłowodu, Λ_g jest stałą siatki Bragga odpowiadającą odległości pomiędzy kolejnymi płaszczyznami dyfrakcyjnymi, zwaną również okresem siatki Bragga [29] [28] [30]. Siatka o strukturze spełniającej warunek Bragga działa jak lustro odbijające fale o długości λ_B . Pozostałe długości fal transmitowane są bez ich zakłócania. Współczynnik odbicia prostej struktury Bragga jest obliczany na podstawie teorii modów sprzężonych Erdogena [31] według wzoru [29]:

$$R_i(\lambda) = \frac{\sinh^2(l\sqrt{k^2 - \sigma_i^2})}{\cosh^2(l\sqrt{k^2 - \sigma_i^2}) - \frac{\sigma_i^2}{k^2}}, \quad (2.2)$$

gdzie: λ jest długością fali, k jest współczynnikiem sprzężenia modów, l oznacza długość siatki, σ_i jest współczynnikiem samosprzęgania wyznaczanym według wzoru:

$$\sigma_i = \delta + \sigma - \frac{1}{2} \frac{d\varphi}{dz}, \quad (2.3)$$

gdzie: σ oznacza uśredniony współczynnik sprzęgania, $\frac{d\varphi}{dz}$ jest zmianą chirpu siatki, wartość δ wyliczana jest według wzoru:

$$\delta = 2\pi n_{eff} \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_D} \right), \quad (2.4)$$

gdzie: $\lambda_D \equiv 2n_{eff}\lambda_g$ jest długością fali Bragga dla siatek spełniających warunek $\delta_{eff} \rightarrow 0$.

Każda ze struktur o podwyższonym współczynniku refrakcji odbija część światła. Uzyskanie wysokiego współczynnika odbicia wymaga zastosowania wielu takich struktur, przy czym zależność współczynnika odbicia od liczby struktur refrakcyjnych jest nieliniowa [26] [31].

Kolejnym parametrem struktury Bragga jest jej długość. Od niej pośrednio zależy współczynnik refrakcji. Im dłuższa siatka, tym więcej struktur Bragga może się w niej zmieścić. Oczywiście liczba struktur będzie zależała nie tylko od długości siatki, ale również od okresu siatki. Pasma transmisyjne i pasmo odbiciowe to parametry, które definiują, jakie długości fal będą propagowały przez siatkę, a jakie zostaną przez nią odbite. Pasma odbiciowe typowo obejmuje wąski zakres długości fal, które są odbijane przez siatkę. Jego środek definiowany jest przez warunek Bragga zapisany w równaniu 2.1.

Szerokość połówkowa FWHM jest parametrem charakterystycznym dla prostych jednorodnych siatek Bragga. Określa ona, jaka jest różnica długości fal, pomiędzy którymi refleksyjność minimum stanowiącego rezonans Bragga osiąga wartość 50% [28]. Definiowana jest ona przez równanie [26]:

$$\Delta\lambda = \lambda_B s \sqrt{\left(\frac{\Delta n}{2n_0}\right)^2 + \left(\frac{1}{N}\right)^2}, \quad (2.5)$$

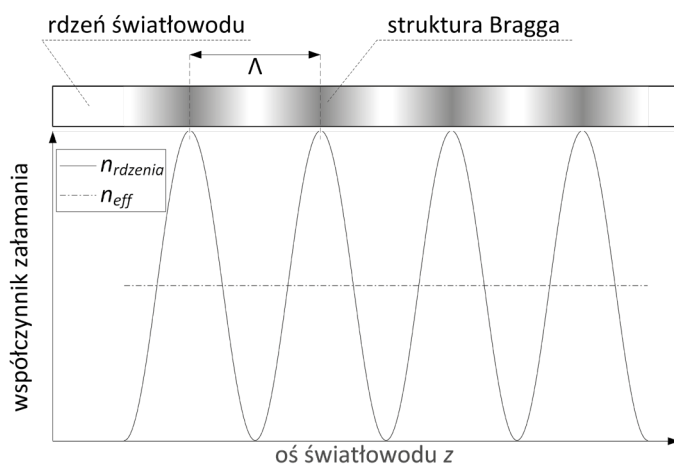
gdzie: N oznacza liczbę płaszczyzn dyfrakcyjnych w siatce, Δn jest amplitudą zmian współczynnika załamania rdzenia, n_0 to średnia wartość współczynnika załamania rdzenia, s jest wartością równą 1 dla siatek o współczynniku odbicia równym jeden lub 0,5 w przypadku pozostałych siatek [30].

2.3. Rodzaje struktur dyfrakcyjnych we włóknach światłowodowych

Struktury dyfrakcyjne wytworzone w światłowodzie mogą posiadać różne rozmieszczenie wzdłuż osi włókna, jak również mogą być pochylone względem płaszczyzny prostopadłej do osi włókna. Modyfikacja wymienionych parametrów pozwala na uzyskanie siatki o innej strukturze i właściwościach.

2.3.1. Jednorodne proste siatki Bragga

Jednorodna prosta siatka Bragga jest strukturą periodyczną wytworzoną w rdzeniu światłowodu. Jej płaszczyzny dyfrakcyjne rozmieszczone są w równych odległościach od siebie i są ułożone prostopadłe do osi włókna. W praktyce płaszczyzny dyfrakcyjne nie są „krążkami” o jednorodnej wartości współczynnika załamania. Ze względu na aspekty techniczne procesu wytwarzania współczynnik załamania płaszczyzny refrakcyjnej zmienia się sinusoidalnie wzdłuż osi włókna. Na rysunku 2.2 przedstawiono schemat jednorodnej prostej siatki Bragga oraz wykres zmian współczynnika załamania siatki FBG.



Rys. 2.2. Schemat prostej siatki Bragga oraz wykres zmian współczynnika załamania światła wzdłuż osi włókna światłowodowego

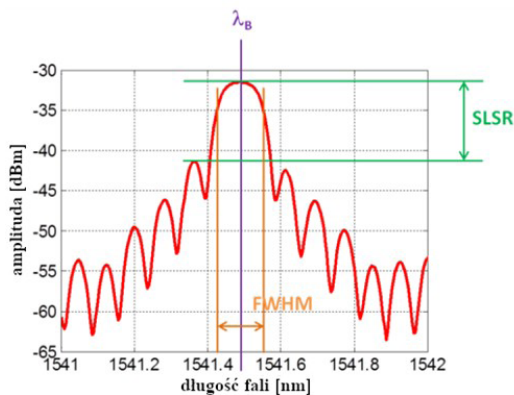
Siatka FBG charakteryzuje się tym, że wszystkie wytworzone w niej struktury Bragga (zwane również płaszczyznami dyfrakcyjnymi) mają jednakowy współczynnik refrakcji. Charakterystyczne dla siatek FBG jest to, że odbijają fale o długości fali Bragga (wzór 2.1). Fale te na każdej strukturze Bragga

ulegają częściowemu rozproszeniu oraz odbiciu. Fale odbite przez wszystkie struktury Bragga nakładają się, tworząc mod światła odbitego [28]. Współczynnik odbicia siatki FBG zależy od jej wartości zmian amplitudy współczynnika załamania Δn i może zostać wyliczony z zależności:

$$R(l, \lambda) = \frac{\kappa^2 \sinh^2(\gamma l)}{\Delta \beta^2 \sinh^2(\gamma l) + \gamma^2 \cosh^2(\gamma l)}, \quad (2.6)$$

gdzie: l to długość siatki Bragga, λ oznacza długość fali światła, n_0 jest uśrednioną wartością współczynnika załamania światła, $\beta = 2\pi n_0 / \lambda$ oznacza stałą propagacji, $\Delta \beta = \beta - \pi / \gamma$ jest parametrem określającym odstrojenie wiązki wejściowej od rezonansu Bragga, κ oznacza współczynnik sprzężenia modów, wartość $\gamma = \sqrt{\kappa^2 - \Delta \beta^2}$.

W rzeczywistości siatka FBG odbija nie tylko fale o długości fali Bragga, ale również fale o innych długościach. Fale te jednak są odbijane znacznie słabiej. Definiowane jest to przez współczynnik tłumienia wstęg bocznych SLSR. Wstęgami bocznymi nazywamy dodatkowe zakresy częstotliwości odbijane przez FBG. Widmo odbijane przez przykładową FBG zostało zaprezentowane na rysunku 2.3.

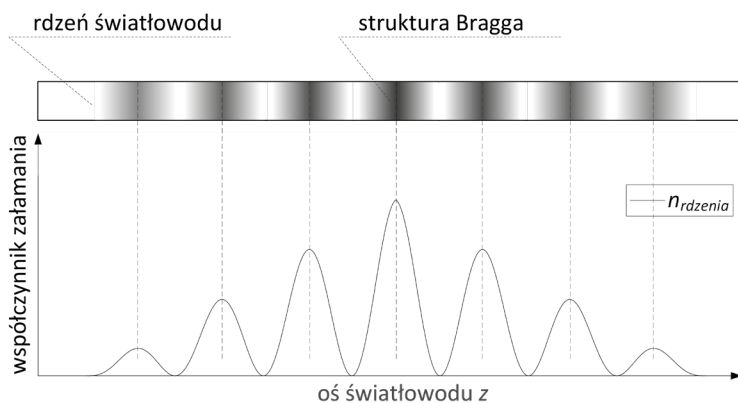


Rys. 2.3. Charakterystyka odbiciowa prostej siatki Bragga [40]

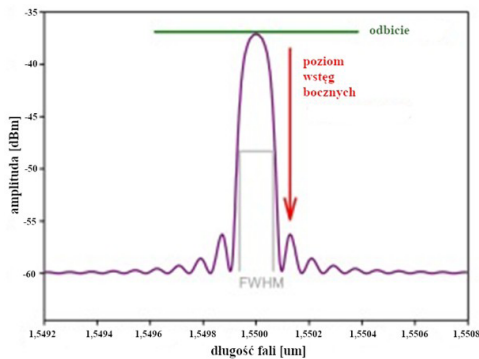
Siatki FBG wykorzystywane są do tworzenia filtrów pasmowo-przepustowych, kompensowania wpływu temperatury w pomiarach wykonywanych za pomocą innych siatek [32], wykonywania czujników temperatury [33] [34], odkształcenia [35], ciśnienia [36], wibracji [37] i innych [38]. Używane są też jako elementy odbijające światło propagujące w światłowodzie [39].

2.3.2. Siatki apodyzowane

Przedstawione w rozdziale 2.3.1 siatki FBG charakteryzują się tym, że każda ze struktur Bragga wchodzących w skład siatki ma taki sam współczynnik załamania światła. Możliwe jest uzyskanie siatki, w której poszczególne struktury będą charakteryzowały się różną wartością współczynnika załamania światła, jak to pokazano na rysunku 2.4.



Rys. 2.4. Siatka apodyzowana



Rys. 2.5. Charakterystyka odbiciowa apodyzowanej siatki Bragga [41]

Apodyzacja stosowana jest w celu uzyskania siatki o zmodyfikowanych właściwościach spektralnych. Siatki apodyzowane cechują się silnym tłumieniem wstęg bocznych [41]. Wstęgi boczne są falami świetlnymi z innych zakresów położonych w sąsiedztwie pasma odbijanego. Ich amplituda jest mniejsza od amplitudy pasma odbiciowego, lecz nadal są one niepożądane,

gdyż w układach pomiarowych istotne jest odbicie określonego zakresu długości fal świetlnych. Odbijanie innych długości fal może zwiększyć błąd pomiarowy. Dlatego też stosowana jest apodyzacja siatek FBG, która jest sposobem na ograniczenie amplitudy wstęg bocznych. Przykład widma siatki apodyzowanej pokazano na rysunku 2.5. Wyróżnia się następujące typowe profile apodyzacji: jednolity, gaussowski, hiperboliczno-tangensowy, kwadratowo-sinusoidalny [42] [43].

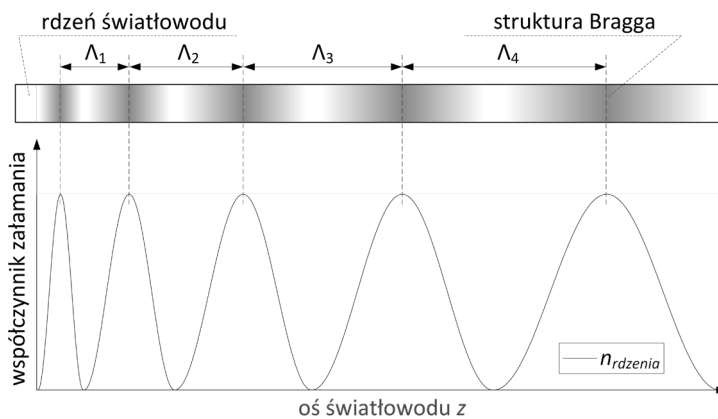
2.3.3. Siatki Bragga o liniowej zmianie okresu

Siatki Bragga o liniowej zmianie okresu CFBG to struktury, w których okres siatki jest zmienny. Oznacza to, że odległości pomiędzy kolejnymi strukturami Bragga zmieniają się liniowo, tak jak to pokazano na rysunku 2.6.

Zmiana okresu omawianej siatki Bragga skutkuje tym, że każda ze struktur odbija falę o innej długości. W efekcie otrzymana struktura odbija szerszy zakres fal niż siatka FBG. Zakres ten może być zdefiniowany jako:

$$\Delta\lambda_{ch} = 2n_{eff}(\Lambda_{max} - \Lambda_{min}), \quad (2.7)$$

gdzie: Λ_{min} oznacza najkrótszy okres pomiędzy dwoma strukturami Bragga występującymi w siatce, Λ_{max} jest najdłuższym okresem pomiędzy dwoma strukturami Bragga występującymi w siatce.



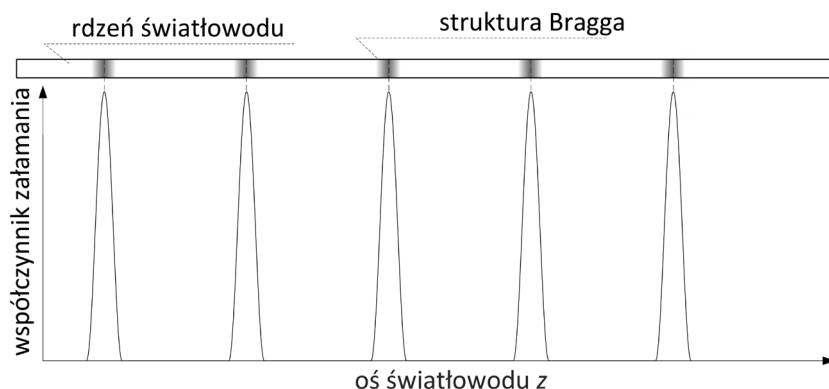
Rys. 2.6. Siatka Bragga o liniowej zmianie okresu

2.3.4. Struktury dyfrakcyjne długookresowe

O siatkach długookresowych LPFG mówimy w przypadku siatek, w których okres siatki jest znacząco dłuższy od długości fali propagującego przez nią światła. Okres ten jest zazwyczaj rzędu ułamka milimetra. Siatka LPFG powoduje sprzęganie światła do modów płaszczowych. Oznacza to, że część propagującego światła jest rozpraszana i propaguje dalej w okładzinie światłowodu, gdzie finalnie zanika ze względu na absorpcję i rozpraszanie. Różne długości fali światła reagują z różną siłą na wspomniane zjawisko rozpraszania. Mamy więc do czynienia z selektywnym rozpraszaniem wybranych długości fal świetlnych [44].

Ze względu na duże odległości pomiędzy strukturami Bragga w siatkach LPFG są one stosunkowo łatwe do wytworzenia. Niemniej jednak trudno jest uzyskać wysoką powtarzalność wytworzonych siatek [28].

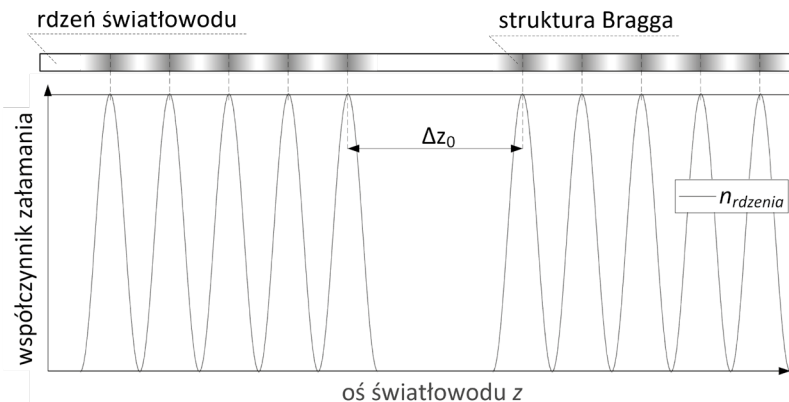
Siatki LPFG charakteryzują się wyższą czułością na zginanie w porównaniu z siatkami FBG [45]. Jednak trudne jest rozróżnienie zmian widma powodowanych zginaniem od zmian widma wywoływanych przez inne czynniki, takie jak temperatura czy współczynnik załamania [28]. Schemat budowy siatki LPFG został przedstawiony na rysunku 2.7.



Rys. 2.7. Schemat i zmiany współczynnika załamania siatki LPFG

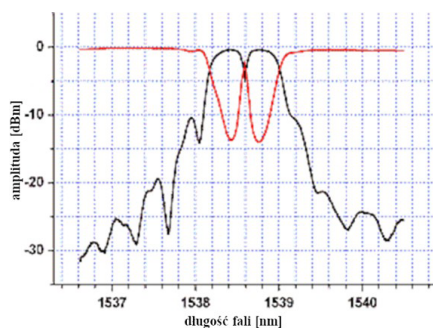
2.3.5. Struktury o przesuniętej fazie

Struktury o przesuniętej fazie (PSFBG) są złożeniem dwóch struktur jednorodnych, które są przesunięte względem siebie o Δz_0 wzdłuż osi włókna światłowodu. Strukturę taką przedstawiono na rysunku 2.8.



Rys. 2.8. Schemat i zmiany współczynnika załamania siatki PSFBG

Siatki PSFBG posiadają charakterystykę spektralną, w której wewnątrz pasma długości fal, które ulegają odbiciu od siatki, znajduje się wąskie pasmo transmisyjne. Przykładową charakterystykę siatki PSFBG pokazano na rysunku 2.9.



Rys. 2.9. Charakterystyka spektralna siatki PSFBG [46]

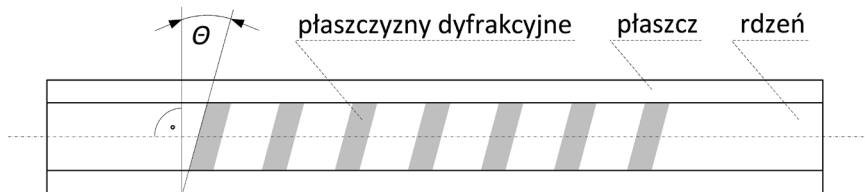
Przesunięcie fazowe siatki PSFBG opisane jest równaniem:

$$\frac{\phi}{2} = \frac{2\pi n_{eff}}{\lambda} \Delta z_0. \quad (2.8)$$

W przypadku gdy $\phi = \pi$, okno transmisyjne występuje w środku pasma odbiciowego [30].

2.3.6. Struktury Bragga o pochylonych płaszczyznach dyfrakcyjnych

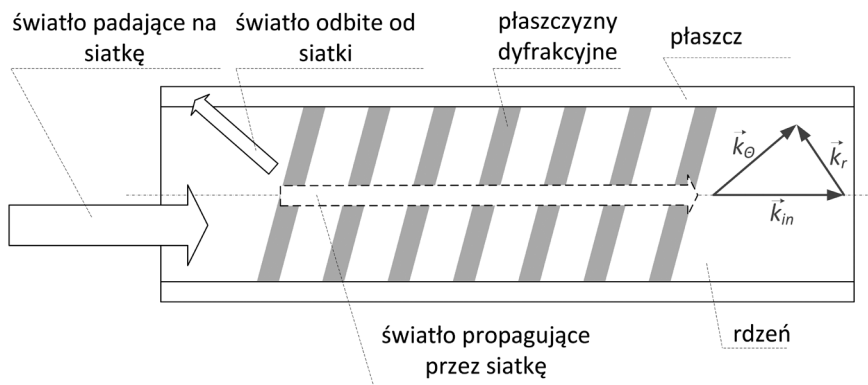
Struktury dyfrakcyjne mogą być umieszczone w rdzeniu światłowodu pod niezerowym kątem względem przekroju poprzecznego włókna, tak jak to pokazano na rysunku 2.10.



Rys. 2.10. Schemat budowy siatki TFBG

Siatki złożone z pochylonych struktur Bragga nazywamy siatkami o pochylonych płaszczyznach dyfrakcyjnych lub po prostu skośnymi siatkami Bragga. Na rysunku 2.10 symbolem θ oznaczono kąt pochylenia płaszczyzn dyfrakcyjnych.

Zastosowanie pochylonych płaszczyzn dyfrakcyjnych znacząco zmienia właściwości siatki Bragga. Spowodowane jest to tym, że propagujące światło odbijane oraz załamane jest pod pewnym kątem, jak to pokazano na rysunku 2.11. Powoduje to kierowanie światła w stronę płaszcza światłowodu.



Rys. 2.11. Załamanie światła w rdzeniu siatki TFBG

Na rysunku 2.11 kolorem czerwonym oznaczono charakterystyczne dla siatki TFBG wektory falowe. Symbolem $\vec{k}_{in}$ oznaczono wektor falowy rozchodzenia się fali światła wejściowego padającego na siatkę TFBG. Wektor falowy światła odbitego od TFBG oznaczono jako $\vec{k}_r$, $\vec{k}_\theta$ jest wektorem falowym światła propagującego przez TFBG [47].

Światło skierowane w stronę płaszcza światłowodu propaguje na granicy rdzenia i płaszcza [48]. Powoduje to wrażliwość na różne wielkości fizyczne [49]. Przykładami mogą być refraktometry [50], czujniki skręcenia [20] [51], zgięcia [28] czy wibracji [37]. Pokrycie światłowodu warstwą innego materiału skutkuje uzyskaniem wrażliwości na kontakt z różnymi substancjami oraz wpływem innych zjawisk fizycznych, pozwalając na tworzenie sensorów biochemicznych [52], czujników pola elektromagnetycznego [53], magnetycznego [54] czy wilgotności [55].

W przypadku siatki TFBG warunek Bragga (formuła 2.1) spełniony jest dla modów światła propagujących od źródła światła do siatki oraz w kierunku przeciwnym. Okres siatki TFBG wyliczany jest według równania [48]:

$$\Lambda_g = \frac{\Lambda}{\cos(\theta)}. \quad (2.9)$$

Pochylenie płaszczyzn dyfrakcyjnych siatki powoduje sprzęganie światła propagującego od źródła do modów płaszczyznowych. Długość fali modów płaszczyznowych może być wyliczona według formuły [28]:

$$\Lambda_{Pi} = (n_{eff}^r + n_{eff}^p) \frac{\Lambda_g}{\cos(\theta)}. \quad (2.10)$$

Z punktu widzenia niniejszej pracy istotny jest fakt, że sprzęganie światła spolaryzowanego do modów płaszczyznowych daje inne wyniki dla każdego z kątów obrotu płaszczyzny polaryzacji światła. Spowodowane jest to zmianą kąta wektora płaszczyzny polaryzacji światła względem płaszczyzn dyfrakcyjnych. Zjawisko to nie występuje w prostych siatkach Bragga, gdyż tam kąt wektora płaszczyzny polaryzacji światła względem płaszczyzn dyfrakcyjnych będzie stały niezależnie do kąta obrotu płaszczyzny polaryzacji światła. Z tego powodu wybrano siatkę TFBG do zastosowania w układzie pomiarowym wykorzystywanym w niniejszej pracy (rozdział 5.1).

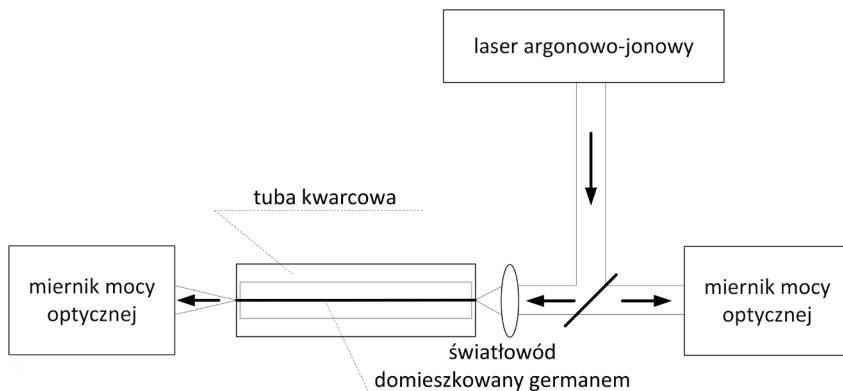
3. Wytwarzanie struktur dyfrakcyjnych na potrzeby pracy

Struktury dyfrakcyjne powstają w wyniku naświetlenia rdzenia włókna światłowodowego promieniowaniem UV [26]. Naświetlanie skutkuje rozrywaniem więzby szkła w łańcuchach polimerów, powodując wzrost współczynnika załamania światła. Struktury periodyczne uzyskiwane są poprzez naświetlanie rdzenia światłowodu w taki sposób, by uzyskać oddalone od siebie płaszczyzny o zwiększonym współczynniku załamania światła [56].

3.1. Metody wytwarzania siatek Bragga

Wytworzenie struktury periodycznej wymaga naświetlenia rdzenia światłowodu w wybranych obszarach. Proces formowania siatki nazywany jest zapisywaniem do włókna. Wyróżniamy dwa sposoby zapisywania: wewnętrzne i zewnętrzne.

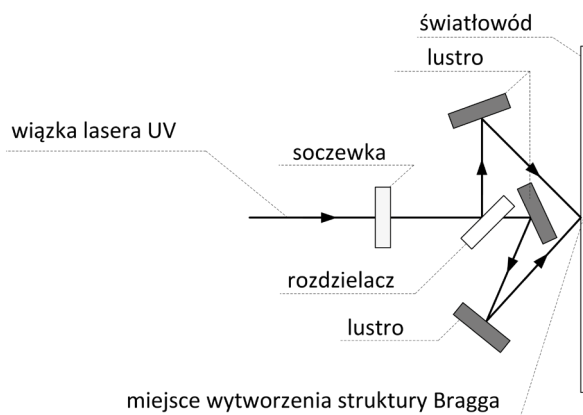
Zapis wewnętrzny możliwy jest przy użyciu lasera argono-jonowego, który używany jest do naświetlania fotouczulonego włókna światłowodowego [57]. Światło wprowadzone do włókna odbija się od zakończenia światłowodu i interferuje, tworząc falę stojącą. Schemat stanowiska do wytwarzania struktur Bragga tą metodą został przedstawiony na rysunku 3.1. Metoda ta praktycznie nie jest stosowana ze względu na fakt, że możliwe są do osiągnięcia jedynie niewielkie zmiany współczynnika załamania światła [29].



Rys. 3.1. Układ do wytwarzania struktur Bragga metodą wewnętrzną

Do wytwarzania struktur Bragga powszechnie używany jest zapis zewnętrzny. Po raz pierwszy został zaproponowany w [58]. Może on być wykonywany przy pomocy różnych technik: interferencyjnej, linia po linii, maski fazowej, punkt po punkcie. Technika interferencyjna polega na naświetleniu włókna światłowodowego interferującym światłem UV.

W technice interferencyjnej wykorzystywane jest zjawisko interferencji fal. Wiązka światła emitowana przez laser UV za pomocą układu optycznego rozdzielana jest na dwie wiązki. Wiązki te kierowane są na włókno światłowodowe w taki sposób, by interferowały ze sobą we włóknie [59]. Dzięki interferencji pewne płaszczyzny włókna naświetlane są mocniej, a inne słabiej. W ten sposób powstają struktury Bragga. Schemat układu do wytwarzania struktur Bragga techniką interferencyjną został zaprezentowany na rysunku 3.2.

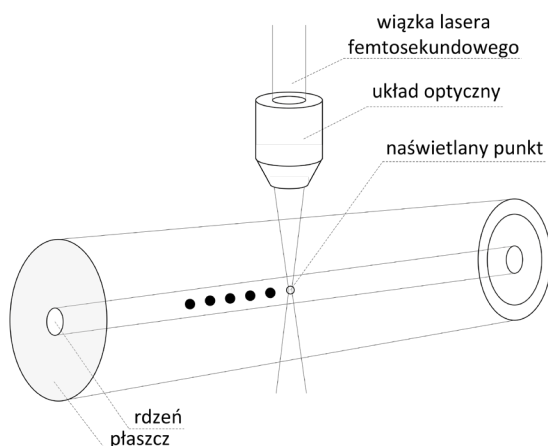


Rys. 3.2. Schemat układu do wytwarzania siatek Bragga techniką interferencyjną [29]

Okres wytworzonych perturbacji współczynnika refrakcji zależy od długości fali promieniowania UV oraz kąta jego padania na światłowod. Problemem przedstawionej metody jest uzyskanie spójności wiązki UV, czyli zgodności obu promieni wykorzystywanych do naświetlania pod względem fazy i długości fali [29].

Alternatywą do przedstawionych metod jest metoda maski fazowej. Pozwala ona na uzyskanie dużej precyzji wytwarzanych struktur i wysokiej powtarzalności ich wytwarzania. W metodzie tej wiązka lasera UV kierowana jest na maskę fazową, na której ulega dyfrakcji na wiele wiązek [60]. Wiązki te interferują ze sobą. W miejscu wystąpienia interferencji wiązek, za maską fazową umieszczany jest światłowod, w którym wytwarzana jest struktura Bragga. Źródłem światła UV w tej metodzie jest zazwyczaj laser ekscymerowy o długości fali 248 nm. Ze względu na możliwość wystąpienia niepożądanego zmiany długości fali lasera ekscymerowego w trakcie zapisu lub wystąpienia innych zakłóceń, takich jak drgania powietrza [61], preferowane są lasery femtosekundowe, generujące ultrakrótki impuls świetlny i pozwalające na tworzenie precyzyjnych siatek Bragga [29].

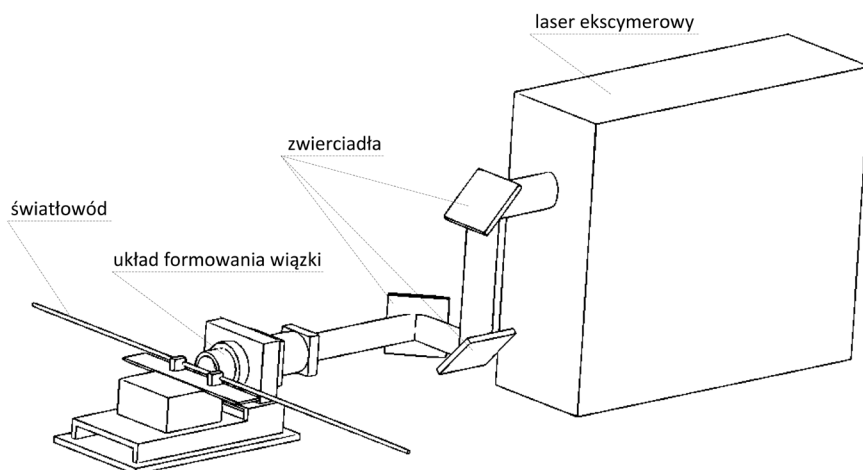
Lasery femtosekundowe pozwalają również na tworzenie struktur Bragga metodami punkt po punkcie, linia po linii i płaszczyzna po płaszczyźnie. W przypadku metody punkt po punkcie laser jest precyzyjnie pozycjonowany nad punktem, w którym ma zostać zmodyfikowany współczynnik załamania. Światło lasera kierowane jest poprzez skupiający układ optyczny na wybrany punkt rdzenia światłowodu, jak to pokazano na rysunku 3.3. Wytworzenie struktury wymaga precyzyjnego przesuwania lasera i wykonywania kolejnych naświetleń [29].



Rys. 3.3. Wytwarzanie struktur Bragga metodą punkt po punkcie [29]

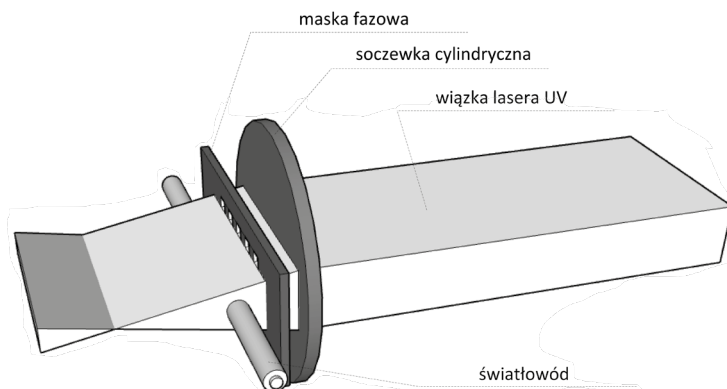
3.2. Stanowisko do wytwarzania struktur

Struktury Bragga użyte na potrzeby niniejszej pracy wytworzone zostały na stanowisku wytwarzania struktur periodycznych w Laboratorium Optoelektroniki i Technik Laserowych Politechniki Lubelskiej. Stanowisko do wytwarzania siatek Bragga znajduje się w tzw. pomieszczeniu bezpyłowym, czyli wydzielonym pomieszczeniu wyposażonym w układy oczyszczania powietrza usuwające kurz. Dodatkowo wiązka lasera prowadzona jest wewnątrz osłony. Osprzęt umieszczony został na stole Thorlabs Nexus tłumiącym drgania, a laboratorium znajduje się w budynku znacznie oddalonym od arterii komunikacyjnych co znacząco redukuje narażenie na drgania. Stanowisko to wykorzystuje układ do zapisu metodą maski fazowej. Źródłem światła jest laser ekscymeryowy Coherent Bragg Star M. Laser ten zapewnia generację impulsów światła UV o długości fali 248 nm, czasie trwania 20 ns i energii 140 mJ. Światło lasera formowane jest w owalną wiązkę o wymiarach $12,5 \times 4$ mm. Ze względu na to, że wyjście owej wiązki z obudowy lasera umieszczone jest dosyć wysoko – 378 mm ponad powierzchnią posadowienia lasera, konieczne było zastosowanie układu pozwalającego na zmianę wysokości prowadzenia wiązki i jej obrócenie o kąt 90° , tak by trafiała w soczewki układu zapisującego struktury Bragga. W tym celu zastosowany został układ lusterek UV mocowanych na specjalnych uchwytach umożliwiających precyzyjne ustawienie kąta pochylenia lusterek [28]. Cały układ został umieszczony na stole Thorlabs Nexus tłumiącym drgania. Szkic zastosowanego układu został przedstawiony na rysunku 3.4.



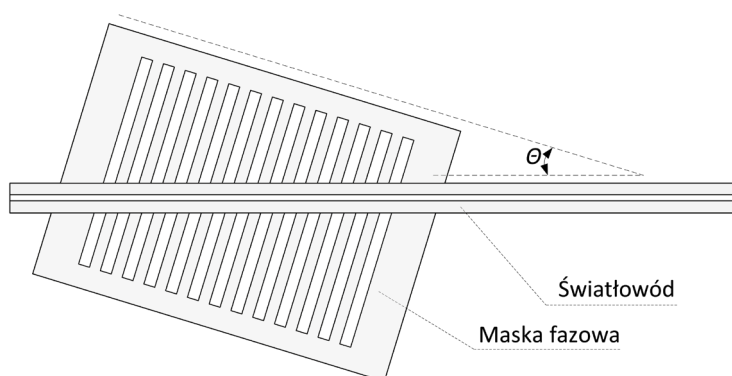
Rys. 3.4. Szkic użytego stanowiska wytwarzania struktur Bragga [28]

Układ zapisujący struktury Bragga wyposażony jest w ruchomą soczewkę cylindryczną skupiającą wiązkę lasera ekscymerowego. Wiązka ta przechodzi przez maskę fazową, a następnie trafia w światłowód umieszczony bezpośrednio za maską, tak jak to pokazano na rysunku 3.5.



Rys. 3.5. Układ zapisujący struktury Bragga [28]

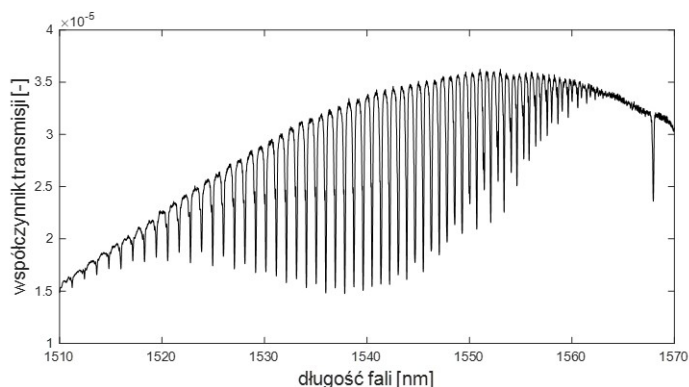
Maska fazowa zamontowana jest w układzie pozwalającym na obracanie jej wokół osi wiązki światła UV. Kąt obrotu maski fazowej ustawiany jest za pomocą stolika obrotowego Thorlabs NR360S. Deklarowana dokładność ustawienia stolika wynosi 5 minut kątowych. Za pomocą tego urządzenia obrócono siatkę o żądany kąt w celu uzyskania skośnej struktury periodycznej TFBG, jak to przedstawiono na rysunku 3.6.



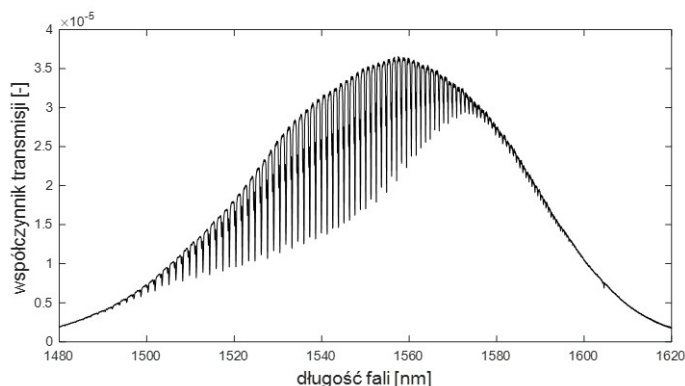
Rys. 3.6. Ustawienie maski fazowej względem światłowodu podczas wykonywania pochylonych struktur periodycznych

3.3. Charakterystyki widmowe uzyskanych siatek

Na potrzeby badań przedstawionych w niniejszej pracy wykonano siatki Bragga o kątach pochylenia struktur Bragga $\Theta = 5^\circ$ oraz $\Theta = 7^\circ$. Struktury wytwarzane były z wykorzystaniem lasera ekscymerowego pracującego na długości fali wynoszącej 248 nm (Coherent Inc). Laser pracował z mocą równą 100 mJ oraz częstotliwością repetycji wynoszącą 100 Hz. Zapisanie jednej struktury Bragga wymagało pracy lasera przez okres 50 s. Po wytworzeniu siatki wspawano w światłowód zakończony odpowiednimi złączami. Następnie zbadano ich charakterystyki widmowe, które zaprezentowano na rysunkach 3.7 i 3.8. Obszary modów płaszczowych dla obu zbadanych siatek obejmują różne zakresy długości fal oraz posiadają różną liczbę minimów.



Rys. 3.7. Charakterystyka widmowa wytworzonej siatki TFBG o kącie pochylenia struktur dyfrakcyjnych $\Theta = 5^\circ$



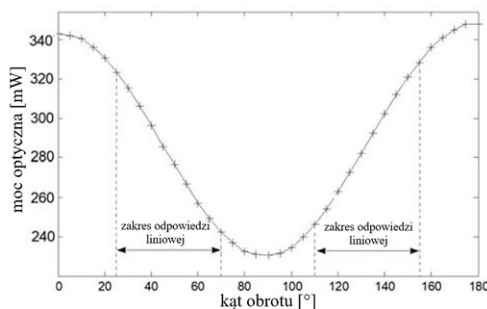
Rys. 3.8. Charakterystyka widmowa wytworzonej siatki TFBG o kącie pochylenia struktur dyfrakcyjnych $\Theta = 7^\circ$

4. Metody pomiaru kąta obrotu płaszczyzny polaryzacji światła

Pomiar kąta obrotu płaszczyzny polaryzacji światła propagującego w światłowodzie zazwyczaj wykonywany jest poza światłowodem. Na końcu światłowodu dołączane jest dodatkowe urządzenie – przeważnie jest to polarymetr [4]. Czujniki zintegrowane z włóknem światłowodowym znajdują się we wczesnej fazie rozwoju. W monografii znalazła się wzmianka o możliwości określania kątów polaryzacji wejściowej poprzez obserwację widma transmitowanego światła [62].

W pracy [63] wykazano możliwość pomiaru kąta obrotu płaszczyzny polaryzacji światła propagującego w światłowodzie i wykonano testowe pomiary. W układzie zastosowanym przez autorów światło spolaryzowane propagowało przez TFBG, a następnie przez cyrkulator kierowane było do światłowodu z FBG. Zadaniem FBG było odbijanie wąskiego zakresu długości fal świetlnych, odpowiadających wybranemu modowi płaszcwowemu zastosowanej siatki TFBG. Odbite światło było kierowane poprzez cyrkulator do detektora połączanego z miernikiem mocy optycznej. W analizowanym przypadku wybrany mod zawierał światło o długościach fali z zakresu 1520,6–1520,9 nm i silnie reagował na zmianę kąta obrotu płaszczyzny polaryzacji światła. Autorzy zaprezentowali wyniki pomiarów w zakresie 0–180° z rozdzielczością 9°, w których widoczny jest spadek mierzonej mocy optycznej podczas zmiany kąta obrotu w zakresie 0–90°, a następnie jej wzrost w przedziale 90–180° (rys. 4.1). Autorzy wskazali, że zmiana mocy w zakresach 25–65° i 115–155° ma charakter quasi-liniowy. W artykule brakuje dyskusji na temat pomiaru w pozostałych

zakresach kąta obrotu. Prezentowana zależność mocy optycznej w funkcji kąta obrotu płaszczyzny polaryzacji światła osiąga minimum dla 90° i maksima lokalne dla 0° i 180° . W sąsiedztwie tych kątów obrotu omawiana zależność ma wypłaszczony przebieg, co sugeruje, że określenie kąta obrotu będzie obarczone znacznym błędem. Autorzy wskazują, że przy pomiarach wykonywanych omawianą metodą niemożliwe jest rozróżnienie zakresów $25\text{--}65^\circ$ i $115\text{--}155^\circ$.



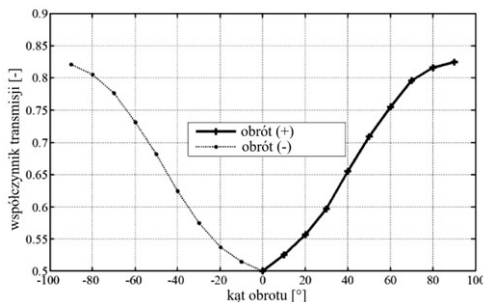
Rys. 4.1. Zależność mocy optycznej od kąta obrotu [63]

W pracy [20] przedstawiono badanie wykazujące możliwość zmierzenia kąta obrotu płaszczyzny polaryzacji światła poprzez monitorowanie zmian wartości współczynnika transmisji światła dla jednej długości fali. W zaprezentowanym przykładzie była to fala o długości $1541,2\text{ nm}$. Jest to podejście podobne do zaproponowanego w pracy [63]. Długość badanej fali nie została bowiem dobrana przypadkowo, lecz odpowiada ona miejscu, w którym dla użytej siatki TFBG występuje mod typu P [64] [65], a jego wartość znacząco się zmienia w funkcji kąta obrotu płaszczyzny polaryzacji światła.

W badaniu tym zastosowano układ pomiarowy składający się ze źródła światła w postaci diody superluminescencyjnej SLD, z której za pomocą światłowodu i soczewek przesyłano światło do polaryzatora i półfalówki. Następnie światło przesyłane było do TFBG o kącie pochylenia struktur periodycznych $\Theta = 6^\circ$, z którego trafiało do analizatora widma optycznego OSA.

Autorzy wykonali dwie serie pomiarów z rozdzielczością 10° . Jedna z nich obejmowała obrót włókna z siatką TFBG w zakresie $0\text{--}90^\circ$ w stronę prawą. Druga seria obejmowała obrót włókna z siatką TFBG w zakresie $0\text{--}90^\circ$ w stronę lewą (rys. 6.2). W ten sposób autorzy zmierzili obrót o łącznym zakresie wynoszącym 180° . Na podstawie wykonanych pomiarów utworzona została charakterystyka przetwarzania badanej struktury periodycznej. Jej wygląd jest bardzo podobny do charakterystyki przedstawionej w pracy [63]. Wynika to z wykorzystania w obu metodach zmian wartości jednego wybranego modu.

Autorzy wskazują, że ich badania potwierdzają występowanie zmian transmisji światła dla badanej długości fali w funkcji obrotu płaszczyzny polaryzacji światła. Określono również, że prezentowana metoda oferuje maksymalną czułość w zakresie $30\text{--}70^\circ$, a natura zmian jest taka sama w przypadku obrotu w prawą, jak i w lewą stronę.



Rys. 4.2. Zależność współczynnika transmisji od kąta obrotu [20]

Omawiana metoda pozwala więc na wykrywanie zmian kąta obrotu płaszczyzny polaryzacji światła. Nie daje natomiast możliwości rozróżnienia, w którą stronę została obrócona siatka TFBG.

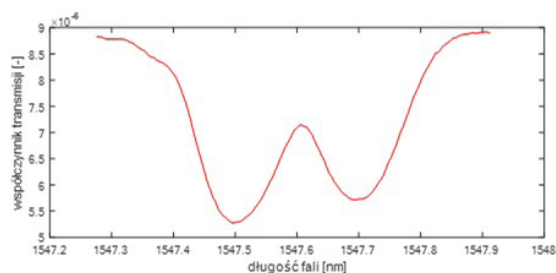
Rozwiązanie pozwalające na pomiar kąta obrotu w zakresie $0\text{--}180^\circ$ zostało przedstawione w pracy [66]. Autorzy wykorzystali szybką transformatę Fouriera (FFT) do przetwarzania widm światła propagującego przez skośną siatkę Bragga. Na podstawie pomiarów wykonanych z rozdzielczością 2° wykonali kalibrację układu polegającą na zapamiętaniu wartości wybranych współczynników FFT dla wybranych kątów obrotu. Problemem tej metody jest konieczność zaangażowania doświadczonego specjalisty w proces kalibracji. Jego rolą jest wybranie współczynników transformaty, które pozwolą na uzyskanie najlepszej dokładności pomiaru. Pomiar odbywa się poprzez porównanie wartości wybranych współczynników FFT otrzymanych w wyniku transformacji widma, uzyskanego w pomiarze z odpowiadającymi im wartościami współczynników zapamiętanymi podczas kalibracji układu. Na podstawie każdego ze współczynników obliczane są kąty obrotu. Następnie cały przedział pomiarowy dzielony jest na podprzedziały o szerokości 1° . Zliczane są kąty obrotu należące do każdego z przedziałów. Przedział o największej liczbie zgrupnie wyznacza zmierzony kąt obrotu. Wartość ta jest następnie doprecyzowywana poprzez analizę obliczonych kątów obrotu, których wartość znajduje się w przedziale $\pm 2^\circ$ od wyznaczonego zgrupnie wyniku. Po odrzuceniu wartości odstających obliczana jest średnia z pozostałych wartości. Stanowi ona ostateczny wynik pomiaru. Metoda uzyskuje dobrą precyzję

(średni błąd pomiaru wynosi $0,076^\circ$), jednak problemem jest zwiększona wartość błędu dla kątów obrotu zbliżonych do 0° , 45° , 90° , 135° , 180° .

Szerszy przegląd metod pomiaru kąta obrotu zamieszczony został w pracy [47]. Autor dokonał ich kompleksowego przeglądu i weryfikacji [20]. Do światłowodu zostało wprowadzone światło spolaryzowane liniowo o znanej płaszczyźnie polaryzacji. Źródłem światła była dioda SLD o centralnej długości fali równej 1550 nm. W toku badań modyfikowano kąt obrotu włókna zawierającego TFBG o $\Theta = 6^\circ$. Włókno obracano o 80° w prawą oraz w lewą stronę. Autor zauważył, że w wyniku obrotu największe zmiany w widmie transmitowanego światła zachodziły w przedziale 1566–1548 nm. Wskazane zostało, że reakcja na obrót objawiła się w postaci zmiany amplitud minimów modów płaszczowych we wskazanym zakresie długości fal. Dodatkowo autor zaobserwował i potwierdził empirycznie, że wraz ze zmianą kąta obrotu następowało przesunięcie minimów modów płaszczowych oraz zmiana pobudzenia modów typu P i S. Oba te zjawiska zostały zbadane, w wyniku czego określony został zakres zmian wartości współczynnika transmisji dla wybranej długości fali oraz oszacowana została czułość zastosowanej siatki na obrót w przypadku wykorzystania zjawiska przesunięcia minimum wybranego modu. Autor zauważył również, że w charakterystykach widmowych występuje zakres, w którym wartość mocy nie ulega zmianie. Przeprowadzone badania wykazały, że charakter zmian przy obrocie w prawo oraz w lewo pozostaje ten sam. Nie jest więc możliwe rozróżnienie kierunku obrotu włókna. Analogiczna sytuacja występuje w przypadku próby określenia kąta obrotu na podstawie przesunięcia minimum wybranego modu – charakter zmian jest podobny, a na dodatek pewne fragmenty charakterystyk są mocno wypłaszczone.

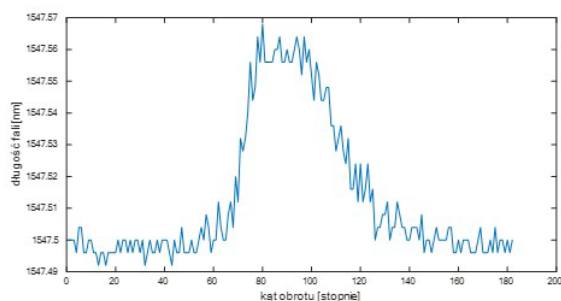
Dokładna dyskusja na temat przedstawionych w pracy [47] wyników jest trudna, ze względu na fakt, że pomiary wykonano z rozdzielczością 10° . O ile pomiary kąta obrotu poprzez analizę mocy sygnału dla wybranej długości fali lub zakresu długości wydają się dobrze zbadane, co potwierdza zbieżność wyników przedstawionych w pracach [47], [63] i [20], o tyle koncepcja wykorzystania przesunięcia minimum wybranego modu w funkcji zmiany kąta obrotu wydaje się interesująca. W związku z tym przeprowadzono analizę możliwości wykorzystania przedstawionego zjawiska.

W tym celu wybrano mod płaszczowy występujący w zakresie długości fali 1547,7–1547,9 nm. Jego postać zmierzoną dla kąta obrotu równego 41° przedstawiono na rysunku 4.3.

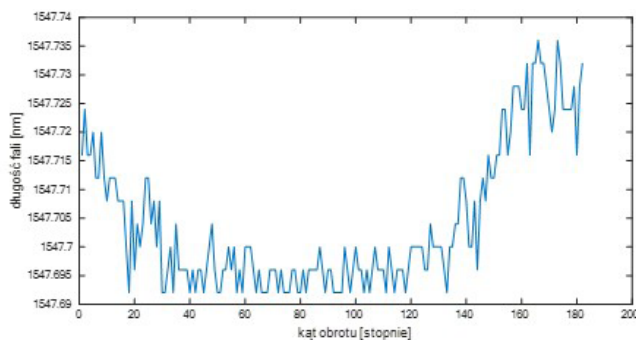


Rys. 4.3. Mod płaszczyzowy dla kąta obrotu płaszczyzny polaryzacji światła równego 41°

Wykonano pomiary widma światła propagowanego przez TFBG w zakresie $0-180^\circ$ z rozdzielczością 1° obrotu. Przeanalizowano przesunięcie minimów analizowanego modu w zakresie długości fali pod wpływem obrotu kąta płaszczyzny polaryzacji światła. Wykresy prezentujące przesunięcie obu minimów zamieszczono na rysunkach 4.4 i 4.5.

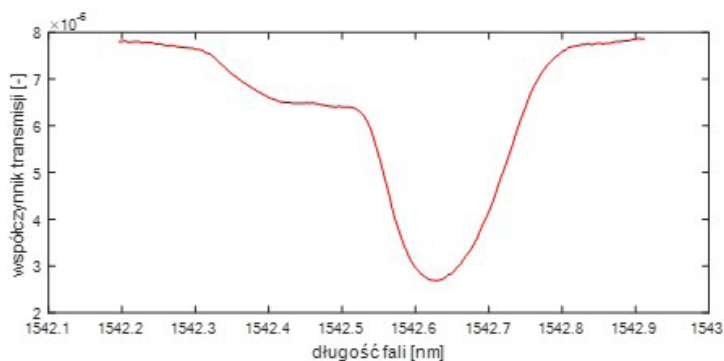


Rys. 4.4. Położenie minimum modu typu P w funkcji zmiany kąta obrotu płaszczyzny polaryzacji światła



Rys. 4.5. Położenie minimum modu typu S w funkcji zmiany kąta obrotu płaszczyzny polaryzacji światła

Przeprowadzona analiza wykazała, że zaobserwowane w pracy [47] przesunięcie rzeczywiście występuje, jednak wysoki poziom zaszumienia odczytu oraz jego płaska charakterystyka w zakresie $20\text{--}130^\circ$ dla modu S i $0\text{--}60^\circ$ oraz $130\text{--}180^\circ$ dla modu P pozwalają jedynie na zgrubne oszacowanie kąta obrotu, lecz nie dają możliwości wykonania precyzyjnego pomiaru. W celu zweryfikowania poprawności wyciągniętego wniosku badanie powtórzono dla innych modów. W żadnym z badanych przypadków nie uzyskano lepszych wyników. Ponadto zaobserwowano, że w przypadku niektórych z modów płaszczowych mod P może całkowicie zanikać, a w jego miejscu otrzymujemy krzywą malejącą wraz ze wzrostem długości fali – jak to zaprezentowano na rysunku 4.6.



Rys. 4.6. Mod płaszczowy występujący w zakresie długości fali 1542,2–1542,9 nm dla kąta obrotu równego 84°

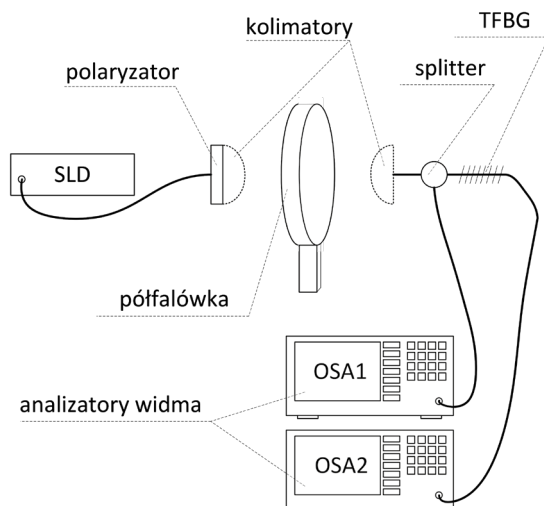
5. Badania laboratoryjne kąta obrotu płaszczyzny polaryzacji światła propagującego we włóknach światłowodowych

5.1. Stanowisko pomiarowe

Zgodnie z przedstawionym w rozdziale trzecim uzasadnieniem, elementem czułym na zmiany kąta obrotu płaszczyzny polaryzacji światła jest siatka TFBG. Została więc ona umieszczona w układzie pomiarowym. Stanowisko pomiarowe zostało skonstruowane tak, by możliwe było podawanie na wejście siatki TFBG światła spolaryzowanego liniowo. Ponadto zapewniono możliwość zmiany kąta obrotu płaszczyzny polaryzacji światła na wejściu siatki. Pomiar odpowiedzi siatki został zrealizowany poprzez połączenie wyjścia siatki z wejściem analizatora widma. Dodatkowym założeniem przyjętym podczas konstruowania stanowiska było zminimalizowanie wpływu dodatkowych urządzeń wchodzących w skład stanowiska na wynik pomiaru. Dlatego też przed siatką TFBG umieszczony został splitter, do którego przyłączono dodatkowy analizator widma. Umożliwiał on monitorowanie zmian sygnału podawanego na wejście siatki TFBG. Schemat stanowiska pomiarowego przedstawiono na rysunku 5.1. Aby uniknąć wpływu temperatury na pomiar, element światłowodu zawierający siatkę umieszczono w komorze klimatycznej w stabilizowanej temperaturze 24°.

Źródłem światła w układzie pomiarowym była dioda superluminescencyjna. Zastosowano laboratoryjne źródło światła w postaci urządzenia Thorlabs

S5FC1550S-A2. Jest ono wyposażone w niskoszumowe źródło stałoprądowe oraz jednostkę kontroli temperatury, co zapewnia stabilne parametry pracy.



Rys. 5.1. Schemat układu pomiarowego

Do źródła światła podłączono za pomocą światłowodu układ kontroli kąta obrotu płaszczyzny polaryzacji światła. Składał się on z polaryzatora, który został ustawiony zgodnie z polaryzacją światła docierającego do niego ze źródła światła. Za polaryzatorem umieszczono kolimator Thorlabs CFP2-1550A, którego zadaniem było utworzenie równoległej wiązki światła propagującego w powietrzu. Za kolimatorem na drodze wiązki światła umieszczono półfalówkę Thorlabs WPHSM05-1550, o sterowanym elektronicznie obrocie, zapewniającą precyzję ustawienia kąta obrotu na poziomie $0,1^\circ$. Za jej pomocą modyfikowano kąt obrotu płaszczyzny polaryzacji światła. Światło wychodzące z półfalówki trafiało do drugiego kolimatora Thorlabs CFP2-1550A, który skupiał światło i kierował je do światłowodu. Kolimator ten zamocowany był na trójosiowym stoliku umożliwiającym pozycjonowanie kolimatora w trzech wymiarach.

Za kolimatorem umieszczono splitter 1×2 z deklarowanym podziałem światła 50 : 50. Do pierwszego wyjścia splittera podłączono analizator widma Yokogawa AQ6730D. Używany był on do pomiarów widma światła podawanego na wejście siatki TFBG, która została przyłączona do drugiego wyjścia splittera. Do wyjścia siatki TFBG przyłączono drugi analizator widma Yokogawa AQ6730D. Rejestrował on widmo światła propagującego przez siatkę TFBG.

Prezentowane stanowisko pomiarowe było umieszczone na stole optycznym Thorlabs Nexus, o wymiarach blatu 120×150 cm, którego zadaniem było eliminowanie drgań oraz dostarczenie otworów montażowych do zamocowania elementów układu.

W toku prowadzonych prac badawczych stanowisko było wyposażane w dwie różne siatki TFBG. Jedną o kącie pochylenia płaszczyzn dyfrakcyjnych $\Theta = 7^\circ$, drugą o $\Theta = 5^\circ$.

5.2. Pomiar kąta obrotu polaryzacji światła

Pomiary wykonywano na stanowisku laboratoryjnym przedstawionym w rozdziale 5.1. Przed przystąpieniem do pomiarów wszystkie urządzenia w układzie pozostawiono włączone przez godzinę w celu ustabilizowania ich warunków pracy. Ustabilizowano również temperaturę w komorze klimatycznej. Ponadto wypożyczonemu kolimator zamocowany na trójosiowym stoliku tak, aby uzyskać maksymalną wartość mocy światła na wyjściu kolimatora. W tym celu do wyjścia kolimatora przyłączono miernik mocy optycznej. Następnie przystąpiono do ustawienia pozycji polaryzatora. Zmieniało kąt obrotu polaryzatora tak, by uzyskać maksymalną wartość wskazania na mierniku mocy optycznej. Uzyskanie maksimum mocy oznaczało, że polaryzacja ustawiona na polaryzatorze jest zgodna z polaryzacją światła docierającego do polaryzatora. Tym samym zapewniono maksymalną moc światła na potrzeby pomiaru. Sekwencyjnie modyfikowano położenie stolika, kolejno w trzech wymiarach, tak by uzyskać jak najwyższe wskazanie przyłączonego miernika. Operacje pozycjonowania powtarzano wielokrotnie, aż do momentu, gdy uzyskanie wyższej wartości transmitowanej mocy optycznej stało się niemożliwe. Wówczas odłączono miernik mocy optycznej i przywrócono układ do postaci opisanej w rozdziale 5.1.

Kolejnym etapem przygotowań do wykonania pomiaru było ustawienie początkowego kąta obrotu płaszczyzny polaryzacji światła. W związku z tym, że laboratorium nie dysponowało urządzeniami umożliwiającymi określenie pozycji siatki TFBG, określono kąt obrotu płaszczyzny polaryzacji światła w stosunku do siatki w sposób pośredni. Rozpoczęto od wykonania „homingu” półfalówki, czyli ustawienia jej kąta obrotu na wartość 0° . Następnie modyfikując kąt obrotu półfalówki obserwowano zmiany wartości wybranej pary modów typu S i P. W momencie, gdy minima modów osiągnęły takie same wartości, kąt obrotu płaszczyzny polaryzacji względem normalnej do osi symetrii siatki

był równy 45° . Zanotowano kąt wskazywany przez sterownik półfalówki. Od wskazanego kąta odjęto wartość $22,5^\circ$ (ze względu na fakt, że obrót półfalówki o 1° powoduje modyfikację kąta obrotu płaszczyzny polaryzacji światła o 2°). Uzyskany wynik (α_0) przyjęto jako obrót o 0° , czyli ustawienie płaszczyzny polaryzacji światła tak, by pokrywała się z normalną do osi symetrii siatki TFBG.

W celu zminimalizowania błędu ustawienia kąta obrotu płaszczyzny polaryzacji światła przez półfalówki wykonano jej ponowny „homing”, a następnie obrócono ją o kąt α_0 . Wykonano pierwszy pomiar widm. Następnie zmieniano kąt obrotu półfalówki o pół stopnia i wykonywano kolejny pomiar. Czynność tę powtarzano aż do momentu wykonania wszystkich pomiarów w serii, czyli obrotu płaszczyzny polaryzacji światła o 180° .

Podczas wykonywania pomiarów dołożono starań, aby jednocześnie rejestrować widma na analizatorach OSA1 i OSA2. Ze względu na to, że urządzenia te nie zapewniają możliwości automatycznego i jednoczesnego wykonania pomiarów, konieczne było inicjowanie pomiarów manualnie. Wykonywano je poprzez jednoczesne wciśnięcie przycisków inicjujących pomiar na obu rejestratorach. Podejście takie nie zapewnia idealnej synchronizacji i nie daje możliwości oszacowania różnicy czasu uruchomienia obu pomiarów. Niemniej jednak z wysokim prawdopodobieństwem różnica czasów uruchomienia pomiarów w żadnym z przypadków nie przekroczyła 1 sekundy.

W celu wyeliminowania wpływu elementów układu kontroli kąta obrotu płaszczyzny polaryzacji światła oraz samego źródła światła widma uzyskane z analizatora OSA2 były dzielone przez odpowiednie widma uzyskane z analizatora OSA1. Uzyskane wyniki były uznawane za ostateczny wynik pomiaru i poddawane dalszej analizie numerycznej w celu wyliczenia zmierzonego kąta obrotu płaszczyzny polaryzacji światła.

5.3. Identyfikacja zakresu długości fal do dalszej analizy

Zakres długości fal propagujących przez siatkę TFBG jest dosyć szeroki. Jednak z punktu widzenia prowadzonych badań interesujący jest tylko ten zakres, który ulega modyfikacji w funkcji zmiany kąta obrotu płaszczyzny polaryzacji światła. Identyfikacji tego zakresu dokonano poprzez przeanalizowanie zmian pomiędzy widmami uzyskanymi dla 0° , 45° i 90° obrotu. Widma te przedstawiono na rysunku 5.2. Zaprezentowane widma są przedstawione w takiej postaci, w jakiej będą podlegały analizie w dalszej części badań. Zostały

obliczone poprzez podzielenie widm uzyskanych z OSA2 przez widma zmierzone w OSA1 dla każdego z pomiarów niezależnie. Różnice pomiędzy widmami uwidaczniają się po obliczeniu różnicy pomiędzy nimi:

$$r_i^{12} = w_i^1 - w_i^2, \quad (5.1)$$

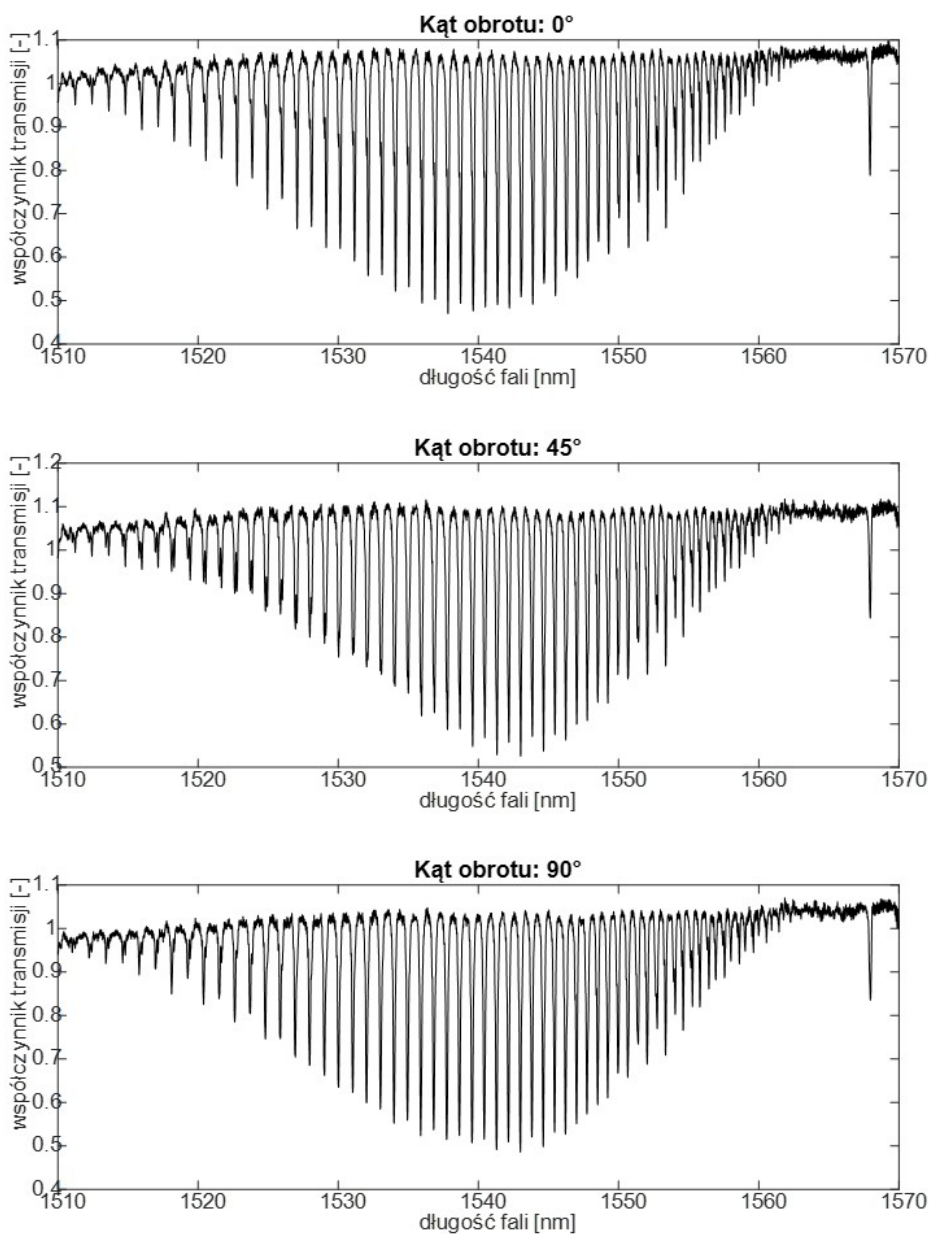
gdzie w_i^1 jest i -tą zmierzoną wartością widma 1, w_i^2 jest i -tą zmierzoną wartością widma 2, przy czym zmierzone widmo światła dla kąta obrotu wynoszącego k stopni W^k składa się z N próbek:

$$W^k = w_1^k, w_2^k, \dots, w_N^k, \quad (5.2)$$

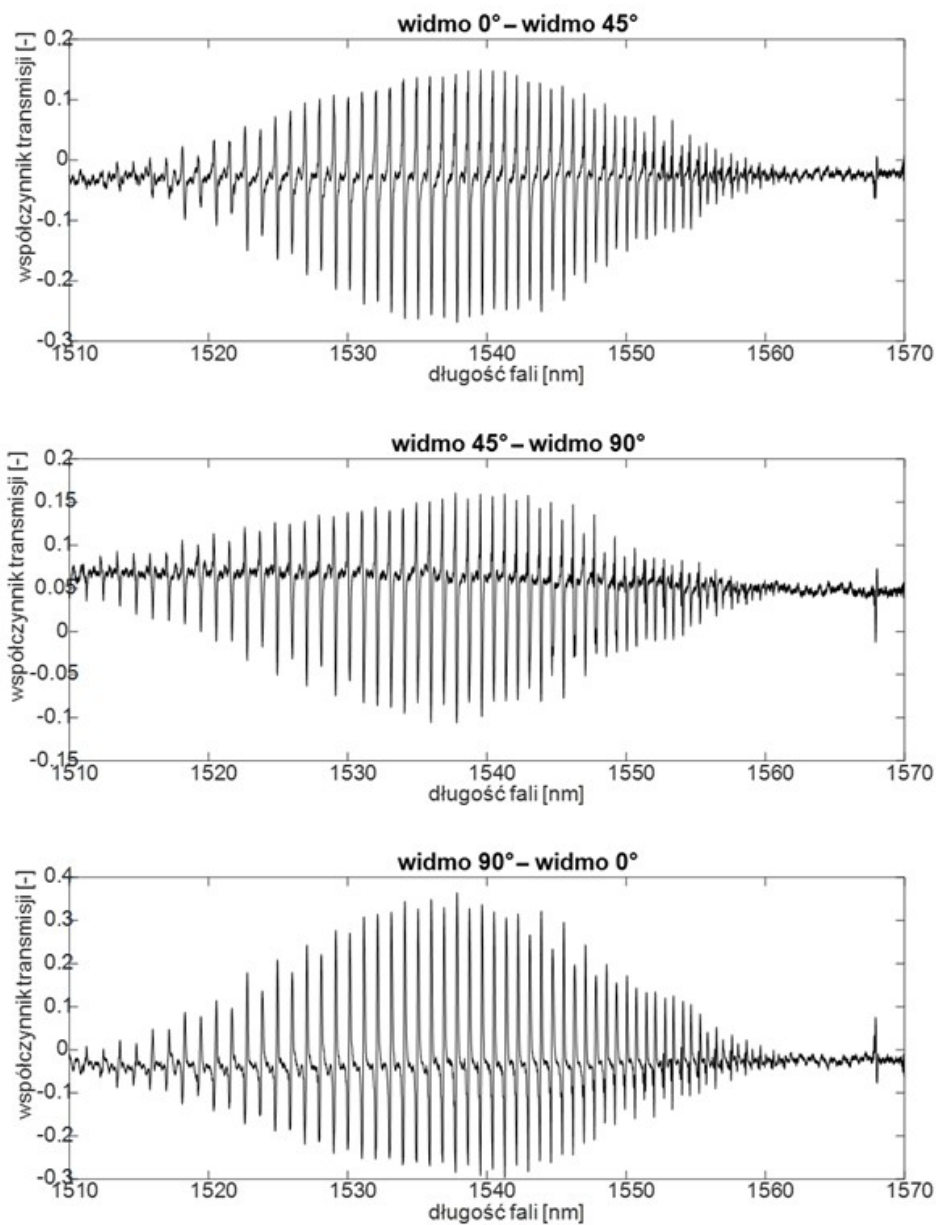
Dlatego też obliczono różnice wartości wszystkich widm, odejmując je od siebie parami, tak jak to oznaczono i zaprezentowano na rysunku 5.3.

Analiza uzyskanych wyników wyraźnie pokazuje, że największe różnice wartości pomiędzy analizowanymi widmami występują dla długości fal zawierających się w przedziale około 1530–1545 nm. Oznacza to, że zmiany widma światła, spowodowane zmianą kąta obrotu płaszczyzny polaryzacji światła, osiągają w tym zakresie długości fal największą amplitudę. Należy więc użyć wartości z tego przedziału do dalszej analizy. Znacząca wartość różnic wywołanych zmianą kąta obrotu pozwala spodziewać się dużej odległości sygnału od szumu w analizowanym przedziale. W przypadku siatek TFBG o innych parametrach największe różnice wartości pomiędzy sąsiednimi minimami i maksimami mogą występować w innym zakresie długości fal. Należy więc zidentyfikować ten zakres, wykonując niniejsze badanie.

Finalnie na dobór przedziału wpłynęła cecha stosowanej transformaty falkowej. Uzyskanie dobrej rozdzielczości oraz możliwość wykonania dekompozycji falkowej na wielu poziomach wymaga odpowiedniej liczby próbek. Wybrano więc przedział zawierający 4096 próbek. Obejmuje on fale z zakresu długości 1529,7–1546,1 nm. Jest to zakres symetryczny względem długości fali, dla której wystąpiło maksimum różnicy.

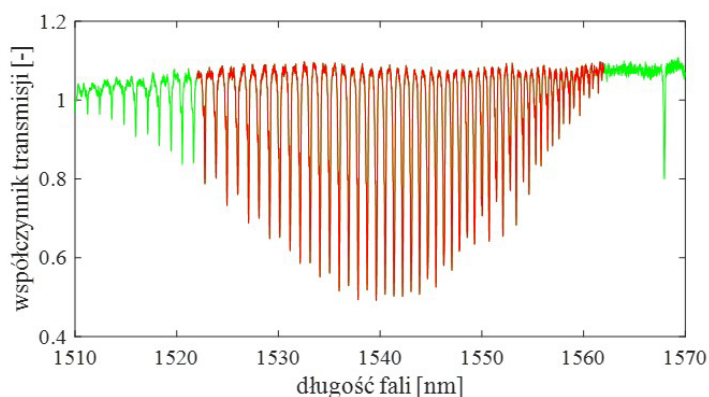


Rys. 5.2. Widma siatki TFBG o kącie pochylenia struktur dyfrakcyjnych $\theta = 5^\circ$ uzyskane dla obrotów płaszczyzny polaryzacji światła o 0° , 45° i 90°



Rys. 5.3. Różnice wartości widm uzyskanych z pomiarów siatką TFBG o kącie pochylenia struktur dyfrakcyjnych $\theta = 5^\circ$ dla obrotów płaszczyzny polaryzacji światła o 0° , 45° i 90°

Dodatkowa analiza przeprowadzona poprzez wykorzystanie różnych zakresów długości fali wykazała, że optymalny zakres długości fal do wykonania pomiaru obejmuje mody płaszczowe zaczynające się około $\frac{1}{4}$ długości zakresu modów płaszczowych aż do jego końca. Obszar ten został oznaczony na rysunku 5.4 kolorem czerwonym.



Rys 5.4. Optymalny zakres długości fal do obliczenia kąta obrotu płaszczyzny polaryzacji światła

6. Opis metody wyznaczania i pomiaru pośredniego kąta obrotu płaszczyzny polaryzacji światła wykorzystującej światłowodowe pochyłone struktury dyfrakcyjne TFBG

W niniejszym rozdziale przedstawiono zagadnienia związane z transformatą falkową i jej matematycznymi podstawami. Wykazano możliwość użycia przekształcenia falkowego w procesie pomiaru kąta obrotu płaszczyzny polaryzacji światła oraz zaproponowano metodę pomiarową wykorzystującą to przekształcenie.

6.1. Transformata falkowa

Transformata falkowa jest jednym z rodzajów przekształceń sygnału. W wyniku przekształcenia otrzymujemy jego nową reprezentację, nazywaną transformatą sygnału [67]. Falki są szeroko stosowane w dziedzinie przetwarzania sygnałów. Szczególnie przydatne są w analizie stanów przejściowych oraz przebiegów charakteryzujących się dużą zmiennością. Cechy te posiada rozkład widmowy światła propagującego przez skośną siatkę Bragga. Jeśli pojedyncze widmo lub jego fragment potraktujemy jako sygnał, to możemy przetworzyć je za pomocą transformaty falkowej.

Ciągłe przekształcenie falkowe zostało zaproponowane przez Marleta-Grossmana [67]. Dla sygnałów jednowymiarowych reprezentowanych jako funkcja $x(t)$ ma ono postać:

$$w(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi^*\left(\frac{t-b}{a}\right) dt, \quad (6.1)$$

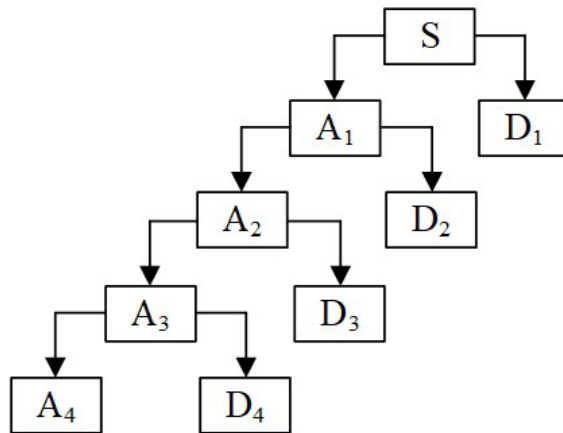
gdzie: $\psi(t)$ jest falką podstawową, $*$ oznacza sprzężenie funkcji, a jest parametrem skali falki bazowej ($a > 0$), natomiast b jest jej przesunięciem, t oznacza czas.

Dyskretna transformata falkowa wyznaczana jest zgodnie z wzorem:

$$a_{m,n} = \sum x(t) \psi_{m,n}(t), \quad (6.2)$$

gdzie: m, n są liczbami całkowitymi.

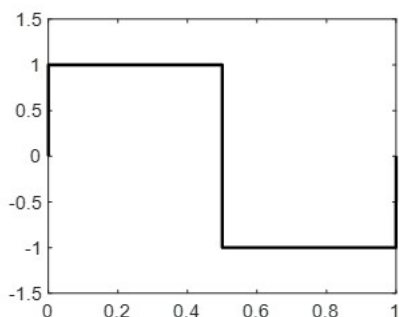
W procesie dyskretnej transformacji falkowej sygnał analizowany jest za pomocą falki podstawowej, którą przesuwamy wzdłuż analizowanego sygnału i określa się jej korelację z odpowiadającym jej fragmentem sygnału, otrzymując w wyniku współczynnik transformaty. Po przeanalizowaniu całego sygnału otrzymuje się jego reprezentację w postaci szeregu współczynników. Szereg ten składa się z dwóch części: aproksymacji i detali. Detale zawierają składowe wysokoczęstotliwościowe sygnału, natomiast aproksymacja zawiera przybliżenie sygnału będące jego reprezentacją niskoczęstotliwościową. Aproksymację można ponownie poddać przekształceniu falkowemu, otrzymując wyniki na kolejnym poziomie dekompozycji. Przekształcenie falkowe jest iteracyjną wielorozdzielczą analizą sygnału [67] [68]. Analizę tę można zobrazować za pomocą drzewa dekompozycji falkowej pokazanego na rysunku 6.1.



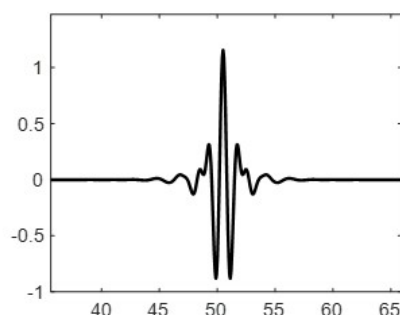
Rys. 6.1. Drzewo dekompozycji falkowej sygnału [67]

Sygnał zdekomponowany za pomocą transformaty falkowej przedstawiany jest jako aproksymacja poziomu n oraz detale poziomów $1..n$. Aproksymacja przedstawia niskoczęstotliwościowy przebieg sygnału, zaś kolejne poziomy detali reprezentują zmiany o coraz większej częstotliwości, przy czym zmiany o największej częstotliwości zawiera poziom 1, zaś zmiany o najmniejszej częstotliwości poziom n .

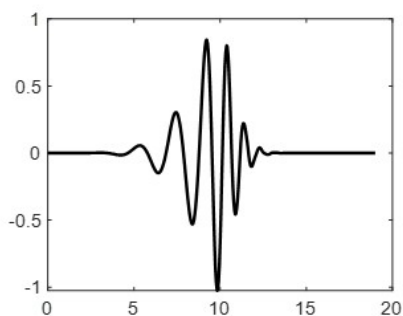
W trakcie prac oceniono przydatność różnych falek w przedmiotowych badaniach. Analizowano falki z rodzin: Haar, Daubechies, Symlets, Coiflets, Biorthogonal, Reverse Biorthogonal, Meyera, dyskretną aproksymację falki Meyera oraz falki Fejera–Korovkina. Każda z rodzin falek charakteryzuje się innym kształtem falki bazowej [69]. Przykładowe falki podstawowe przedstawiono na rysunkach 6.2–6.5.



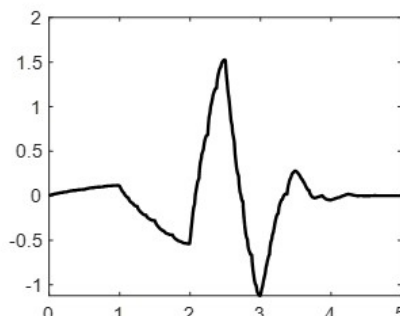
Rys. 6.2. Falka Haara



Rys. 6.3. Falka Meyera

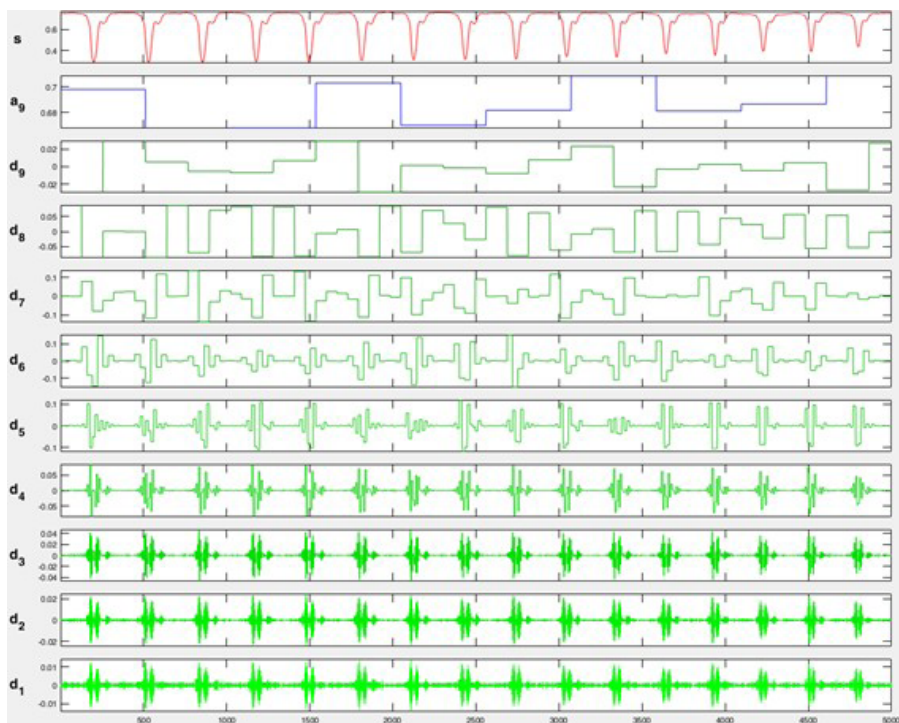


Rys. 6.4. Falka Daubechiesia 10



Rys. 6.5. Falka Fejera–Korovkina 6

W niniejszej pracy dane pomiarowe przetwarzane były za pomocą transformaty falkowej. Analizie poddawano uzyskane współczynniki. Wizualizację dekompozycji przykładowego widma zaprezentowano na rysunku 6.6. Do jej wykonania użyto falki Haara, a analizę prowadzono do dziewiątego poziomu dekompozycji łącznie.



Rys. 6.6. Dekompozycja falkowa widma światła propagującego przez TFBG

W monografii zbadano wybrane falki pod kątem ich przydatności do określania kąta obrotu płaszczyzny polaryzacji światła. W tabeli 6.1 przedstawiono falki zbadane w toku prac oraz ich oznaczenia używane w dalszej części pracy.

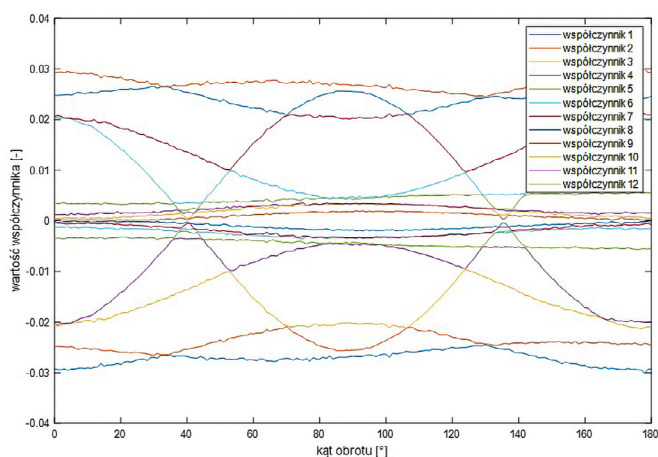
Tabela 6.1. Zbadane falki

Rodzina falek	Oznaczenie	Rząd falki
falki Daubechiesia	db	1–45
falki biortogonalne	bior	1.1, 1.3, 1.5, 2.2, 2.4, 2.6, 2.8, 3.1, 3.3, 3.5, 3.7, 3.9, 4.4, 5.5, 6.8
liniowo-fazowe ortogonalne falki Hana	han	2.3, 3.3, 4.5, 5.5
falka ortogonalna Vaidyanathana	vaid	-
falka ortogonalna Morrisa o minimalnej szerokości pasma	mb	4.2, 8.2, 8.4, 10.3, 12.3, 14.3, 16.3, 18.3, 24.3, 32.3
najlepiej zlokalizowane falki Daubechiesia	bl	7, 9, 10
falki Fejera–Korovkina	fk	4, 6, 8, 14, 18, 22
falki Coiflets	coif	1–5
dyskretna falka Meyera	dmey	-

6.2. Zależności pomiędzy współczynnikami transformaty

Celem niniejszego badania było określenie wpływu zmiany kąta obrotu płaszczyzny polaryzacji światła na wartości współczynników transformaty falkowej.

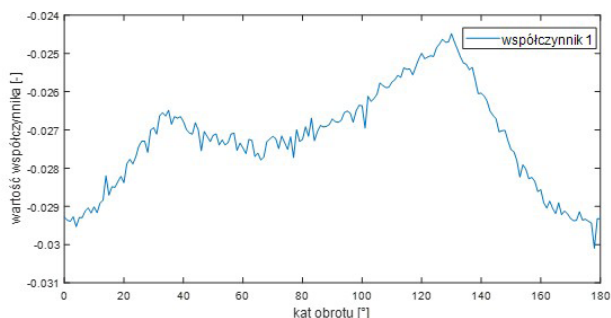
Wykonano pomiary widm dla kątów obrotu w zakresie 0–180° z rozdzielczością jednego stopnia obrotu. Każde z tych widm przekształcono za pomocą dyskretnej transformaty falkowej DWT. Następnie uzyskane wyniki zestawiono w taki sposób, by uzyskać funkcje zmiany wartości wybranych współczynników DWT w funkcji kąta obrotu płaszczyzny polaryzacji światła. Zestaw takich funkcji uzyskanych dla współczynników detali dziewiątego poziomu dekompozycji falką Haara pokazano na rysunku 6.7.



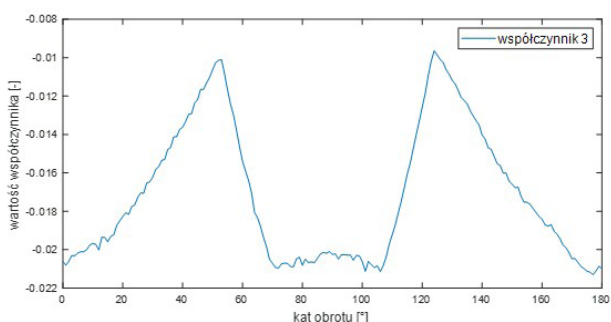
Rys. 6.7. Zmiana wartości współczynników DWT w funkcji zmiany kąta obrotu płaszczyzny polaryzacji światła dla 9 poziomu falki Haara

Analiza danych przedstawionych na rysunku 6.7 wykazała, że współczynniki transformaty falkowej zmieniają swoją wartość w funkcji zmiany kąta obrotu płaszczyzny polaryzacji światła. Ciekawym zjawiskiem widocznym na rysunku 6.7 jest to, że możemy zaobserwować krzywe zbliżone kształtem do przebiegu funkcji sinus. Jednak krzywe te złożone są z fragmentów funkcji różnych współczynników DWT. Obserwacja ta pozwoliła na stwierdzenie, że zidentyfikowane zjawisko możemy zinterpretować jako przekazywanie energii jednego współczynnika innemu. Zidentyfikowane zjawisko przekazywania energii pomiędzy współczynnikami transformaty falkowej potwierdza szczegółowa analiza przebiegu poszczególnych współczynników, wykazująca zjawisko dotychczas niezaobserwowane. Mianowicie, spodziewana jest cykliczność zmian poszczególnych współczynników transformaty w funkcji zmiany

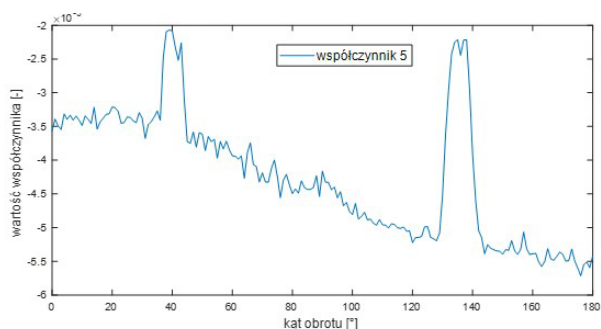
kąta obrotu lub przynajmniej powrót współczynnika do wartości początkowej po wykonaniu obrotu o 180° . Powyższa zależność sprawdza się w przypadku części współczynników. Jednak nie dotyczy to wszystkich z nich. Na rysunkach 6.8–6.11 pokazano funkcje zmiany wybranych współczynników DWT w funkcji zmiany kąta obrotu płaszczyzny polaryzacji światła.



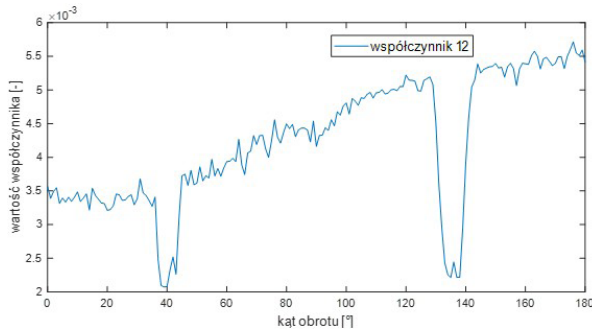
Rys. 6.8. Funkcja zmiany wartości współczynnika numer 1 detali dziewiątego poziomu dekompozycji falką Haara



Rys. 6.9. Funkcja zmiany wartości współczynnika numer 3 detali dziewiątego poziomu dekompozycji falką Haara

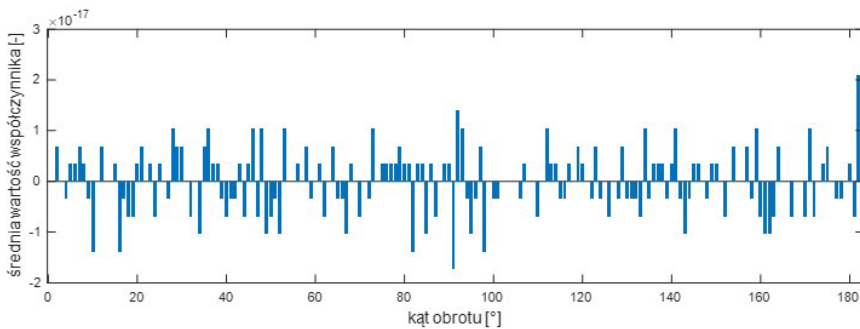


Rys. 6.10. Funkcja zmiany wartości współczynnika numer 5 detali dziewiątego poziomu dekompozycji falką Haara



Rys. 6.11. Funkcja zmiany wartości współczynnika numer 12 detali dziewiątego poziomu dekompozycji falką Haara

Kształt funkcji zmian wartości niektórych ze współczynników stanowi niemałe zaskoczenie. Jednak analiza zmian wartości wszystkich współczynników wybranego poziomu transformaty wykazała, że podczas gdy jedne ze współczynników zwiększają swoją wartość, inne ją zmniejszają. Obliczenie wartości średniej wszystkich współczynników dla poszczególnych kątów obrotu wykazało, że średnia wartość wszystkich współczynników wybranego poziomu transformaty falkowej dla falki Haara jest stała. Energia przekazywana jest pomiędzy poszczególnymi współczynnikami transformaty Haara podczas zmiany kąta obrotu płaszczyzny polaryzacji światła propagującego przez TFBG. Średnią wartość poszczególnych współczynników DWT dla detali dziewiątego poziomu dekompozycji falką Haara przedstawiono na rysunku 6.12.



Rys. 6.12. Średnia wartość współczynników DWT w funkcji zmiany kąta obrotu płaszczyzny polaryzacji światła

Należy zauważyć, że prezentowane na rysunku 6.12 wartości sum wszystkich współczynników transformaty Haara są rzędu 10^{-17} . Wartości uśrednionych współczynników DWT są rzędu 10^{-3} . Możemy więc przyjąć, że różnice wartości prezentowanych sum są nieistotne i uznać, że są równe zero. Z tego

powodu nie jest możliwe użycie falki Haara do prowadzenia obliczeń kąta obrotu płaszczyzny polaryzacji światła.

6.3. Analiza przydatności wybranych falek i ich współczynników w ocenie kąta obrotu płaszczyzny polaryzacji światła

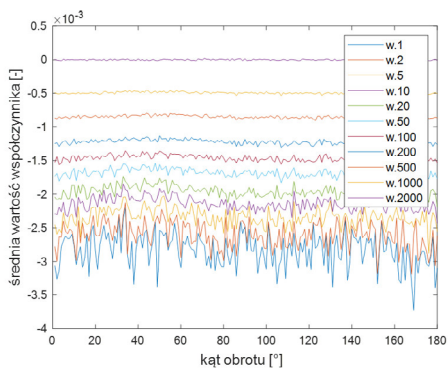
W wyniku analizy falkowej uzyskujemy zestaw współczynników. Aby możliwe było określenie kąta obrotu płaszczyzny polaryzacji światła na podstawie współczynników transformaty muszą one wykazywać zmienność w funkcji zmiany kąta obrotu płaszczyzny polaryzacji światła. Ponadto zmienność ta nie może być losowa. Dodatkowym czynnikiem, jaki należy wziąć pod uwagę, jest poziom zakłóceń przenoszonych przez dany współczynnik transformaty. W toku badań zidentyfikowano, że nie tylko pojedynczy współczynnik może stanowić podstawę do określania kąta obrotu. Interesujące wyniki uzyskuje się poprzez analizę sumy wartości wszystkich współczynników wybranego poziomu dekompozycji transformaty ($X_{sum}(\psi, n, \alpha_k)$). Wartość ta obliczana jest według wzoru 6.3:

$$X_{sum}(\psi, n, \alpha_k) = \sum_{j=1}^M x_{\psi n_j \alpha_k}, \quad (6.3)$$

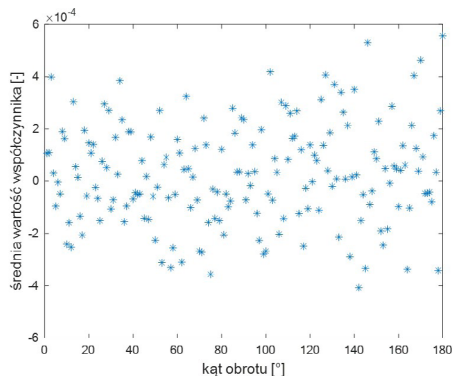
gdzie: ψ – falka użyta w procesie dekompozycji, n – poziom dekompozycji, n_j – j -ty współczynnik transformaty na n -tym poziomie dekompozycji, α_k – k -ty kąt obrotu płaszczyzny polaryzacji światła, $x_{\psi n_j \alpha_k}$ – wartość j -tego współczynnika na n -tym poziomie dekompozycji falkowej wykonanej za pomocą falki ψ dla k -tego kąta obrotu, M – liczba wszystkich współczynników transformaty na analizowanym poziomie dekompozycji.

Na podstawie obliczonych wartości $X_{sum}(\psi, n, \alpha_k)$ tworzone są funkcje $F(\psi, n) = X_{sum}(\psi, n, \alpha_0), \dots, X_{sum}(\psi, n, \alpha_k), \dots, X_{sum}(\psi, n, \alpha_K)$ zmiany wartości sumy $X_{sum}(\psi, n, \alpha_k)$ w funkcji kąta obrotu α , gdzie $\alpha_k = 180 / (K - 1)^\circ$ oznacza kąt obrotu, K jest liczbą pomiarów przeprowadzonych podczas wykonywania obrotu w zakresie $0-180^\circ$. W badaniach prezentowanych w niniejszym podrozdziale wykonywano pomiary z rozdzielczością jednego stopnia.

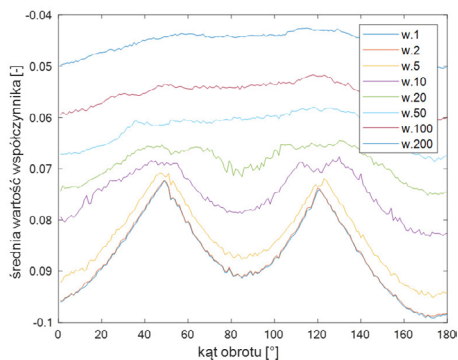
Zbadane przebiegi zmienności wybranych współczynników transformaty falkowej oraz sumy wartości wszystkich współczynników danego poziomu transformaty dla wybranych falek przedstawiono na rysunkach 6.13–6.40.



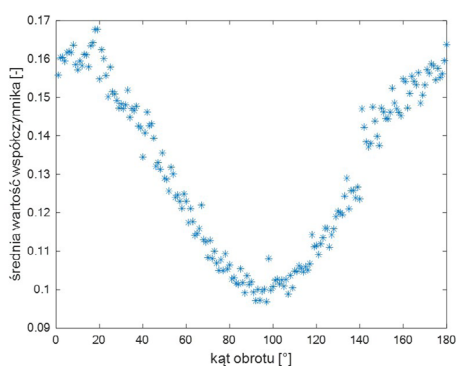
Rys. 6.13. Zmienność wybranych współczynników transformaty w funkcji kąta obrotu dla falki db40 na pierwszym poziomie dekompozycji



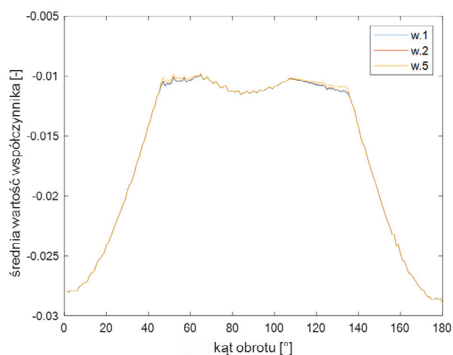
Rys. 6.14. Wartość funkcji $F(\psi, n)$ dla falki db40 na pierwszym poziomie dekompozycji



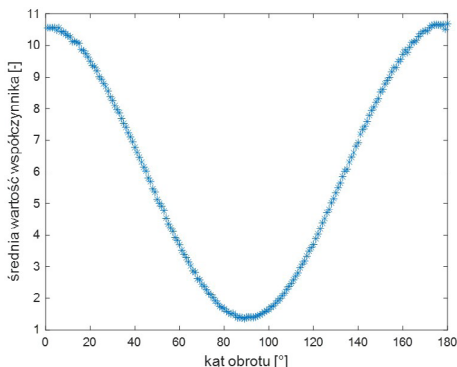
Rys. 6.15. Zmienność wybranych współczynników transformaty w funkcji kąta obrotu dla falki db40 na piątym poziomie dekompozycji



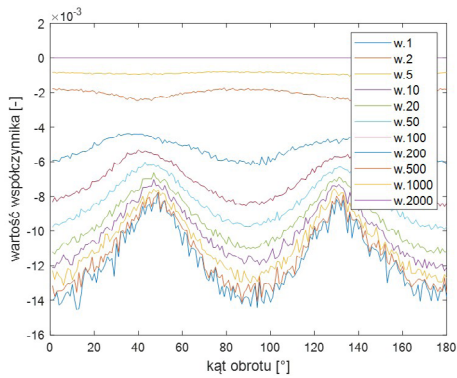
Rys. 6.16. Wartość funkcji $F(\psi, n)$ dla falki db40 na piątym poziomie dekompozycji



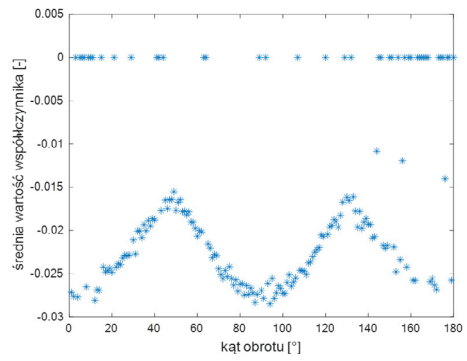
Rys. 6.17. Zmienność wybranych współczynników transformaty w funkcji kąta obrotu dla falki db40 na dziesiątym poziomie dekompozycji



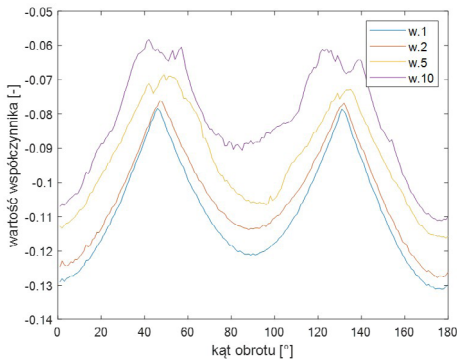
Rys. 6.18. Wartość funkcji $F(\psi, n)$ dla falki db40 na dziesiątym poziomie dekompozycji



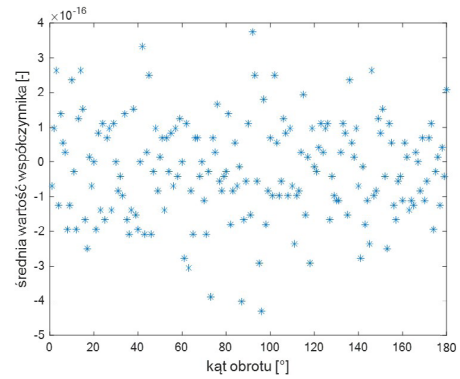
Rys. 6.19. Zmienność wybranych współczynników transformaty w funkcji kąta obrotu dla falki bior1.1 na pierwszym poziomie dekompozycji



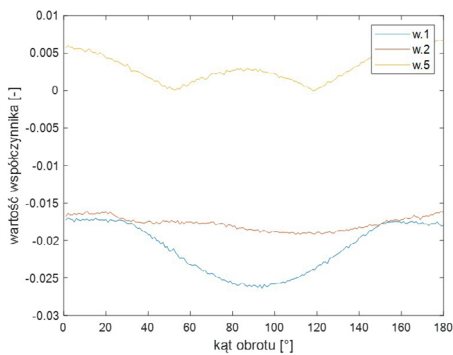
Rys. 6.20. Wartość funkcji $F(\psi, n)$ dla falki bior1.1 na pierwszym poziomie dekompozycji



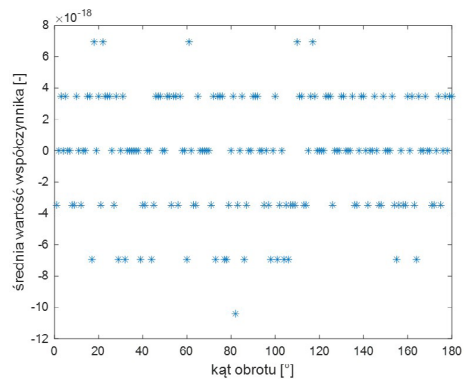
Rys. 6.21. Zmienność wybranych współczynników transformaty w funkcji kąta obrotu dla falki bior1.1 na piątym poziomie dekompozycji



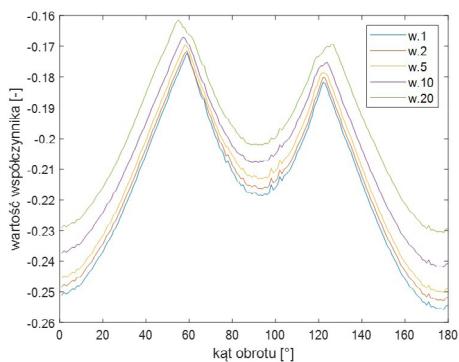
Rys. 6.22. Wartość funkcji $F(\psi, n)$ dla falki bior1.1 na piątym poziomie dekompozycji



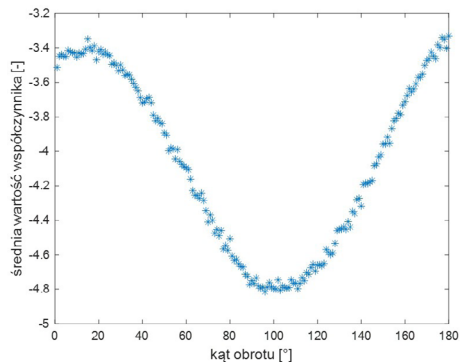
Rys. 6.23. Zmienność wybranych współczynników transformaty w funkcji kąta obrotu dla falki bior1.1 na dziesiątym poziomie dekompozycji



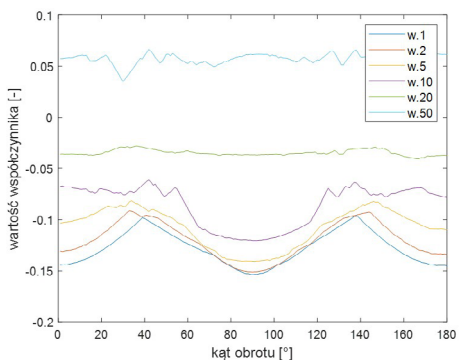
Rys. 6.24. Wartość funkcji $F(\psi, n)$ dla falki bior1.1 na dziesiątym poziomie dekompozycji



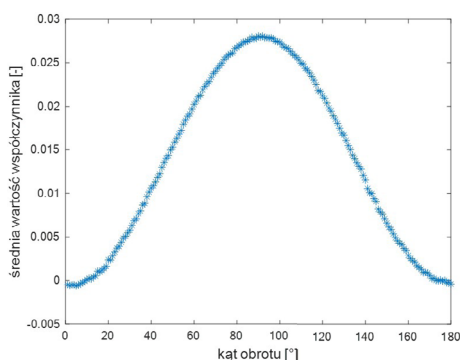
Rys. 6.25. Zmienność wybranych współczynników transformaty w funkcji kąta obrotu dla falki bior2.2 na ósmym poziomie dekompozycji



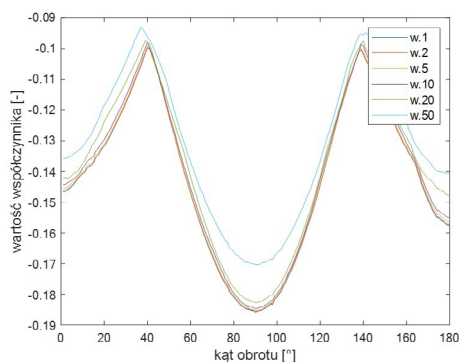
Rys. 6.26. Wartość funkcji $F(\psi, n)$ dla falki bior2.2 na ósmym poziomie dekompozycji



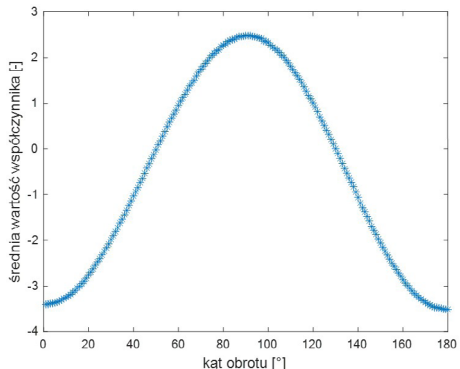
Rys. 6.27. Zmienność wybranych współczynników transformaty w funkcji kąta obrotu dla falki bior1.5 na siódmym poziomie dekompozycji



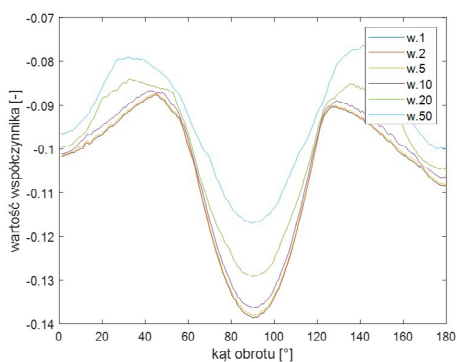
Rys. 6.28. Wartość funkcji $F(\psi, n)$ dla falki bior1.5 na siódmym poziomie dekompozycji



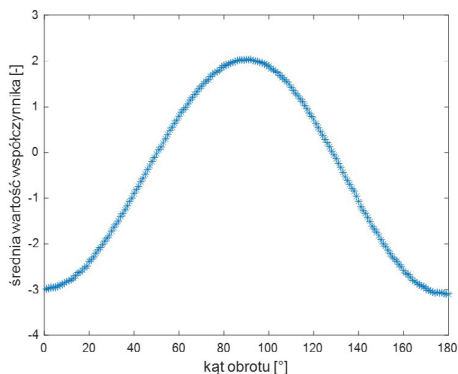
Rys. 6.29. Zmienność wybranych współczynników transformaty w funkcji kąta obrotu dla falki han4.5 na siódmym poziomie dekompozycji



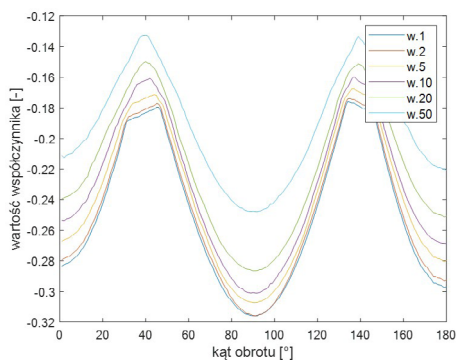
Rys. 6.30. Wartość funkcji $F(\psi, n)$ dla falki han4.5 na siódmym poziomie dekompozycji



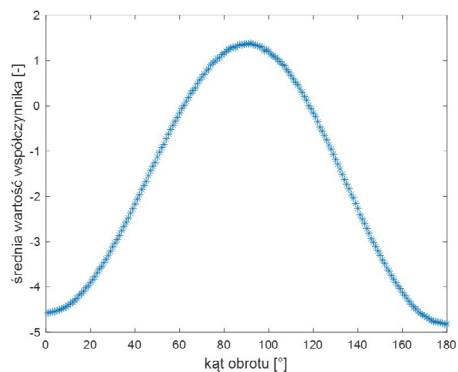
Rys. 6.31. Zmienność wybranych współczynników transformaty w funkcji kąta obrotu dla falki vaid na siódmym poziomie dekompozycji



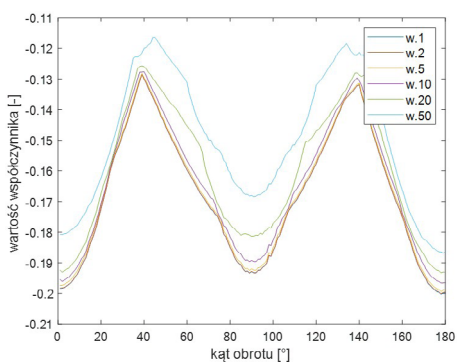
Rys. 6.32. Wartość funkcji $F(\psi, n)$ dla falki vaid na siódmym poziomie dekompozycji



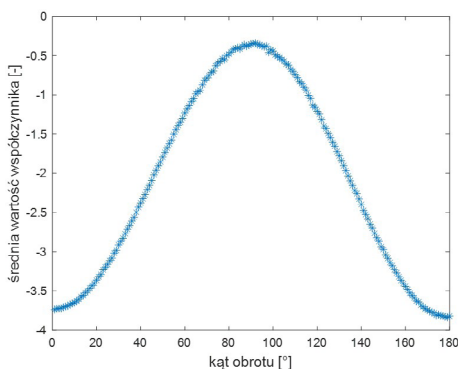
Rys. 6.33. Zmienność wybranych współczynników transformaty w funkcji kąta obrotu dla falki mb4.2 na siódmym poziomie dekompozycji



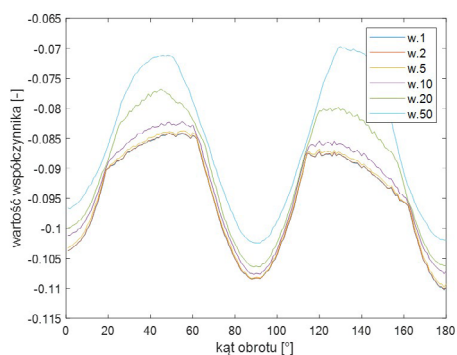
Rys. 6.34. Wartość funkcji $F(\psi, n)$ dla falki mb4.2 na siódmym poziomie dekompozycji



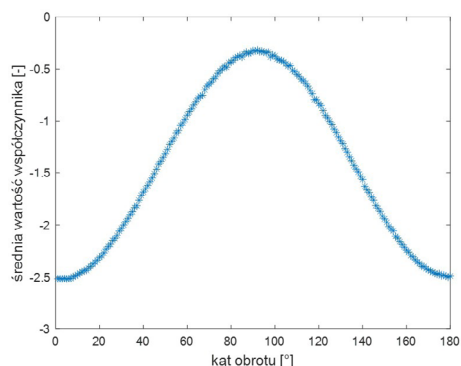
Rys. 6.35. Zmienność wybranych współczynników transformaty w funkcji kąta obrotu dla falki bl7 na siódmym poziomie dekompozycji



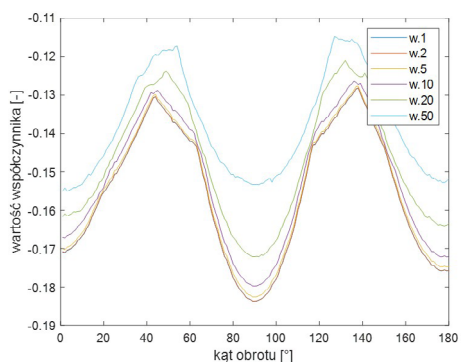
Rys. 6.36. Wartość funkcji $F(\psi, n)$ dla falki bl7 na siódmym poziomie dekompozycji



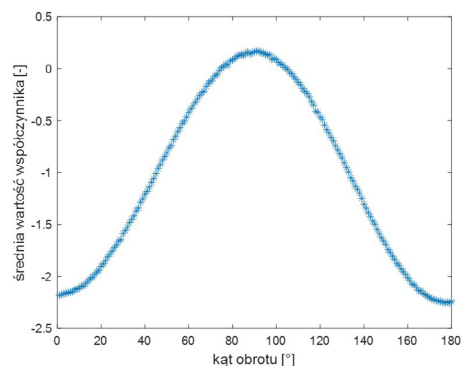
Rys. 6.37. Zmienność wybranych współczynników transformaty w funkcji kąta obrotu dla falki fk22 na siódmym poziomie dekompozycji



Rys. 6.38. Wartość funkcji $F(\psi, n)$ dla falki fk22 na siódmym poziomie dekompozycji

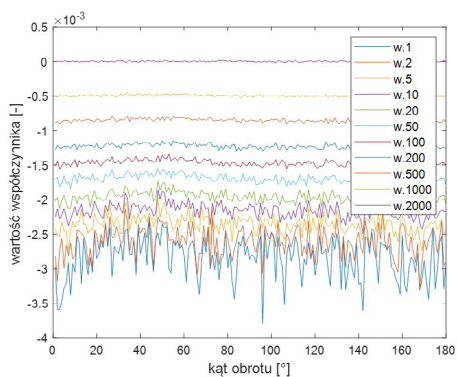


Rys. 6.39. Zmienność wybranych współczynników transformaty w funkcji kąta obrotu dla falki coif4 na siódmym poziomie dekompozycji

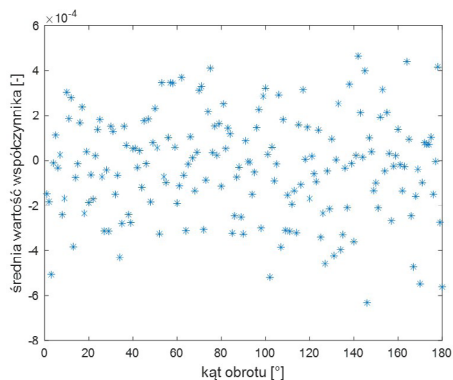


Rys. 6.40. Wartość funkcji $F(\psi, n)$ dla falki coif4 na siódmym poziomie dekompozycji

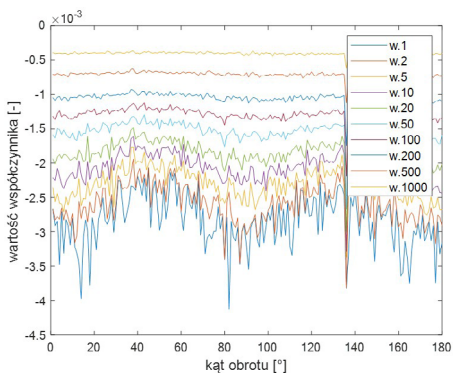
Na rysunkach 6.41–6.60 przedstawiono wpływ poziomu transformaty falkowej, realizowanej z użyciem dyskretnej aproksymacji falki Meyera, na zmiany wartości wybranych współczynników transformaty oraz na zmianę sumy wartości wszystkich współczynników analizowanego poziomu transformaty w funkcji kąta obrotu płaszczyzny polaryzacji światła.



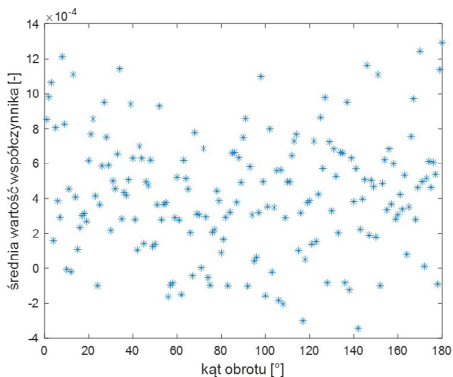
Rys. 6.41. Zmienność wybranych współczynników transformaty w funkcji kąta obrotu dla falki dmei na pierwszym poziomie dekompozycji



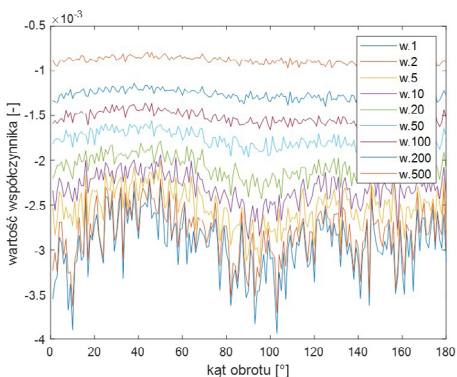
Rys. 6.42. Wartość funkcji $F(\psi, n)$ dla falki dmei na pierwszym poziomie dekompozycji



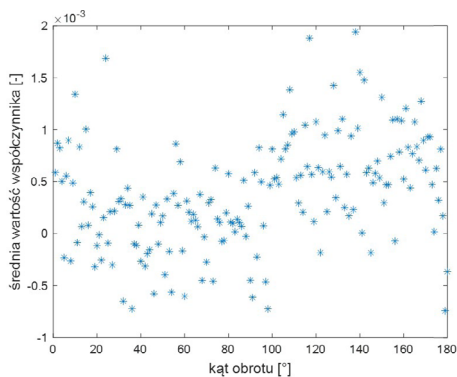
Rys. 6.43. Zmienność wybranych współczynników transformaty w funkcji kąta obrotu dla falki dmei na drugim poziomie dekompozycji



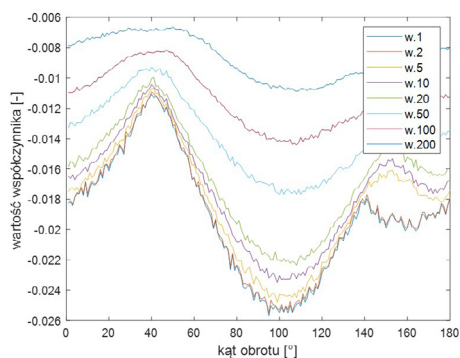
Rys. 6.44. Wartość funkcji $F(\psi, n)$ dla falki dmei na drugim poziomie dekompozycji



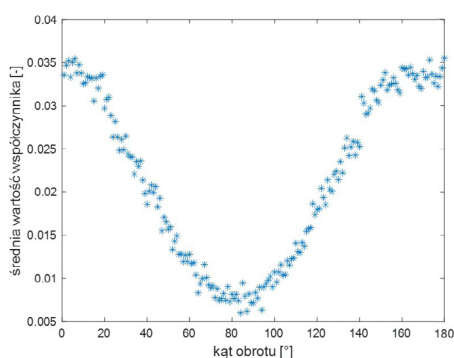
Rys. 6.45. Zmienność wybranych współczynników transformaty w funkcji kąta obrotu dla falki dmei na trzecim poziomie dekompozycji



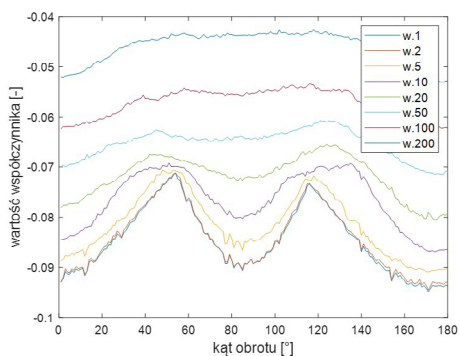
Rys. 6.46. Wartość funkcji $F(\psi, n)$ dla falki dmei na trzecim poziomie dekompozycji



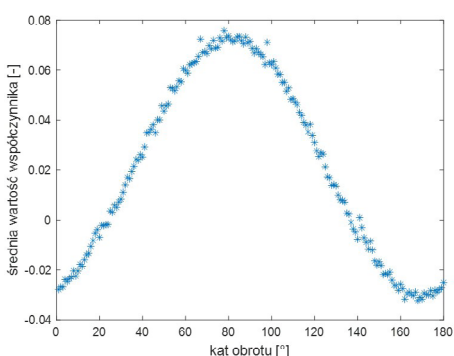
Rys. 6.47. Zmienność wybranych współczynników transformaty w funkcji kąta obrotu dla falki dmey na czwartym poziomie dekompozycji



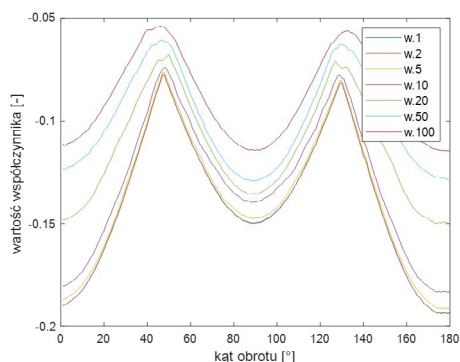
Rys. 6.48. Wartość funkcji $F(\psi, n)$ dla falki dmey na czwartym poziomie dekompozycji



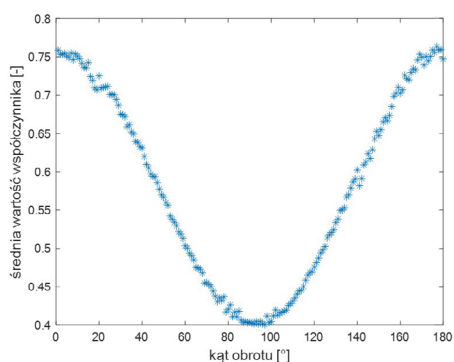
Rys. 6.49. Zmienność wybranych współczynników transformaty w funkcji kąta obrotu dla falki dmey na piątym poziomie dekompozycji



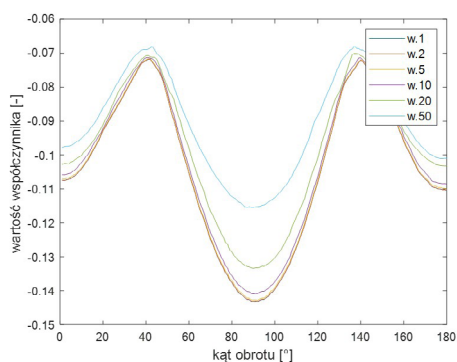
Rys. 6.50. Wartość funkcji $F(\psi, n)$ dla falki dmey na piątym poziomie dekompozycji



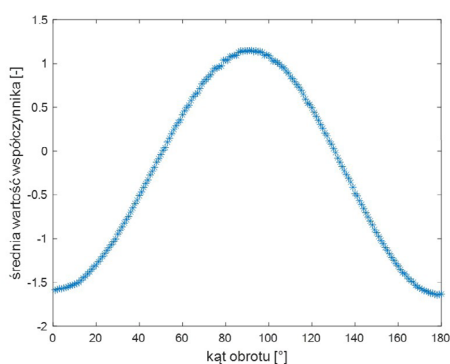
Rys. 6.51. Zmienność wybranych współczynników transformaty w funkcji kąta obrotu dla falki dmey na szóstym poziomie dekompozycji



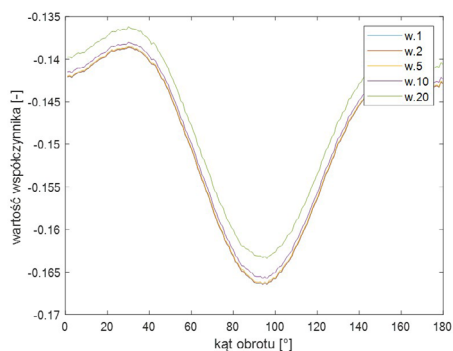
Rys. 6.52. Wartość funkcji $F(\psi, n)$ dla falki dmey na szóstym poziomie dekompozycji



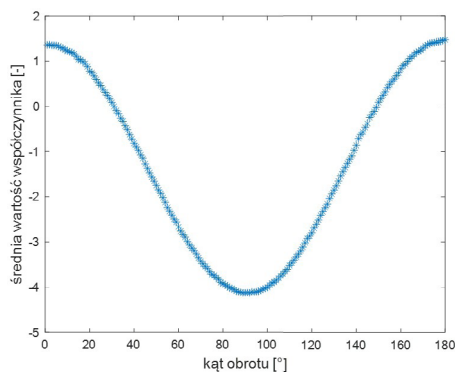
Rys. 6.53. Zmienność wybranych współczynników transformaty w funkcji kąta obrotu dla falki dmey na siódmym poziomie dekompozycji



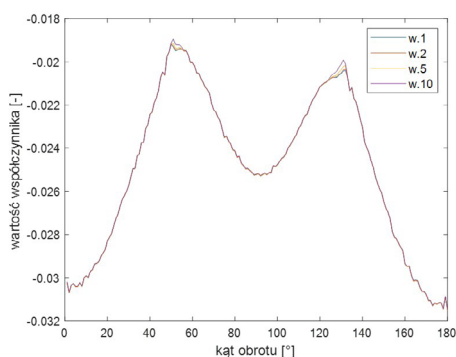
Rys. 6.54. Wartość funkcji $F(\psi, n)$ dla falki dmey na siódmym poziomie dekompozycji



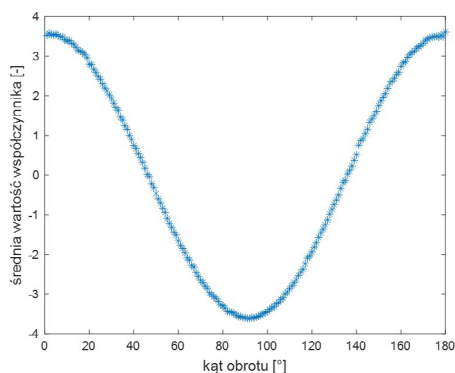
Rys. 6.55. Zmienność wybranych współczynników transformaty w funkcji kąta obrotu dla falki dmey na ósmym poziomie dekompozycji



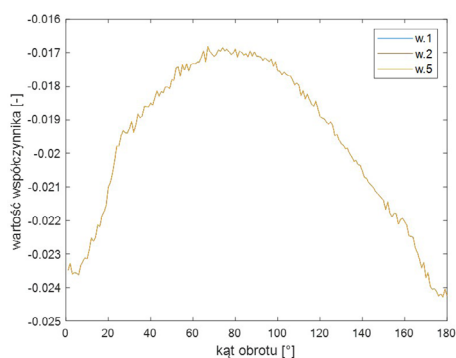
Rys. 6.56. Wartość funkcji $F(\psi, n)$ dla falki dmey na ósmym poziomie dekompozycji



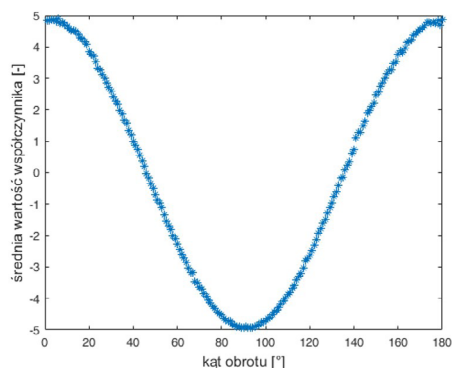
Rys. 6.57. Zmienność wybranych współczynników transformaty w funkcji kąta obrotu dla falki dmey na dziewiątym poziomie dekompozycji



Rys. 6.58. Wartość funkcji $F(\psi, n)$ dla falki dmey na dziewiątym poziomie dekompozycji



Rys. 6.59. Zmienność wybranych współczynników transformaty w funkcji kąta obrotu dla falki dmei na dziesiątym poziomie dekompozycji



Rys. 6.60. Wartość funkcji $F(\psi, n)$ dla falki dmei na dziesiątym poziomie dekompozycji

Przedstawione w niniejszym podrozdziale badanie pozwoliło określić, że zmiana wartości współczynników transformaty falkowej w funkcji kąta obrotu płaszczyzny polaryzacji światła zależy zarówno od użytej falki, jak i od poziomu transformaty. Można również stwierdzić, że dla niskich poziomów transformaty (1–3), wyniki uzyskane dla wszystkich falek nie nadają się do analizy ze względu na wysoki poziom zniekształceń. Z tego samego powodu suma wartości wszystkich współczynników transformaty na poziomach (1–3) nie daje możliwości określenia badanego kąta obrotu. Kolejne poziomy transformaty falkowej charakteryzują się mniejszym poziomem zniekształceń. Przeprowadzone badania pozwalają również stwierdzić, że poszczególne współczynniki zmieniają swoją wartość w funkcji obrotu płaszczyzny polaryzacji światła w różny sposób. Trudno jest ustalić regułę, która by pozwoliła na jednoznaczne opisanie charakteru zmian wszystkich współczynników. Jako wspólne cechy badanych zmian wartości dla większości współczynników możemy wyróżnić:

- występowanie minimów lub maksimów lokalnych dla kątów obrotu zbliżonych do 45° , 90° i 135° ,
- każda z uzyskanych funkcji zmian wartości współczynnika transformaty w funkcji kąta obrotu płaszczyzny polaryzacji światła składa się z fragmentów o różnym przebiegu i różnym stopniu zaszumienia.

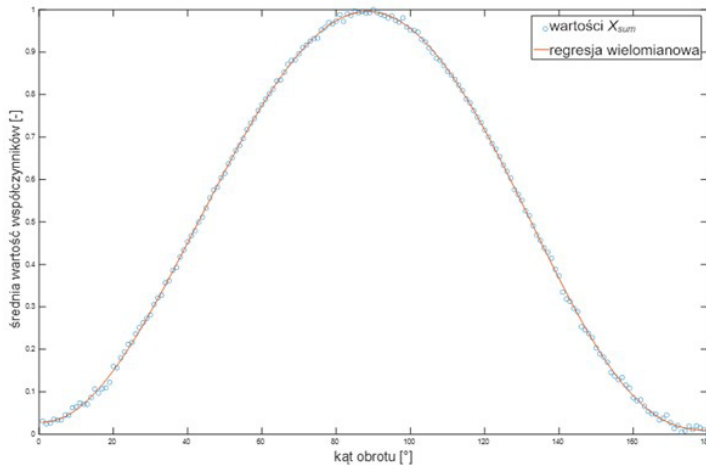
Z tego względu nie jest możliwe arbitralne wskazanie współczynników, które mogłyby stanowić podstawę do określenia kąta obrotu płaszczyzny polaryzacji światła. Konieczne jest opracowanie algorytmu oceniającego przydatność poszczególnych współczynników.

Przeprowadzono badanie polegające na określeniu wartości zakłóceń dla funkcji $F(\psi, n)$. Funkcje te tworzone są dla analizowanych poziomów dekompozycji transformaty falkowej wykonywanej przy użyciu wybranych falek. Ich wartości obliczane są według wzoru 6.3. Za wartość zakłóceń przyjęto różnicę pomiędzy zmierzonymi wartościami analizowanych współczynników, a ich aproksymacją obliczoną przy pomocy funkcji regresji wielomianem 7 stopnia, przedstawioną w postaci błędu średniokwadratowego MSE liczonego według wzoru 6.4.

$$MSE = \frac{1}{k} \sum_{k=1}^P (X_{sum}(\psi, n, \alpha_k) - R_{sum}(\psi, n, \alpha_k))^2, \quad (6.4)$$

gdzie: P – liczba punktów pomiarowych, $X_{sum}(\psi, n, \alpha_k)$ – wartość obliczona według wzoru 6.3 dla k -tego pomiaru, α_k – kąt obrotu płaszczyzny polaryzacji światła, dla którego wykonany został pomiar, $R_{sum}(\psi, n, \alpha_k)$ – wartość aproksymacji wartości $X_{sum}(\psi, n, \alpha_k)$ obliczona za pomocą regresji funkcji $F(\psi, n)$ wielomianem stopnia 7. jest wyrażane jako kwadrat stopnia obrotu płaszczyzny polaryzacji światła [°].

W celu uzyskania porównywalnych wyników wartości wszystkich współczynników poddano skalowaniu, tak aby współczynniki każdej z badanych funkcji $F(\psi, n)$ zawierały się w zakresie [0,1]. Uzyskane wyniki przedstawiono w tabeli 6.2. Na rysunku 6.61 przedstawiono przykład aproksymacji dla 6 poziomu transformaty wykonanej przy użyciu falki fk22.



Rys. 6.61. Wartości funkcji $F(\psi, n)$ obliczone dla szóstego poziomu dekompozycji falką fk22 oraz aproksymacja tej funkcji wykonana przy użyciu regresji wielomianem stopnia 7

Uzyskane wyniki pokazują, że dla funkcji $F(\psi, n)$, przeskalowanej tak, by jej wartości zawierały się w przedziale $[0,1]$, możliwe jest uzyskanie MSE mniejszego niż $1 \cdot 10^{-5}$ [°²]. Taki poziom wartości MSE świadczy o niskim poziomie zniekształceń badanej funkcji i jednoznacznie potwierdza możliwość jej użycia do określenia kąta obrotu płaszczyzny polaryzacji światła. Uzyskanie wartości MSE mniejszego niż 10^{-5} [°²] jest możliwe tylko dla wybranych falek. Podczas prowadzonych badań zaobserwowano, że tak niska wartość MSE występuje na poziomach 7–9. Poza tymi poziomami wartości MSE dla badanych falek zawsze przyjmują wartości wyższe.

Tabela 6.2 Zmiany wartości MSE [°²] dla funkcji

Falka Poziom	dmev	bior2.2	db40	bior1.1	han4.5	vaid	mb4.2
1	0,039325	0,026814	0,037251	0,007758	0,031048	0,036569	0,02804
2	0,038394	0,027164	0,033207	0,00801	0,016151	0,024612	0,039992
3	0,025898	0,019917	0,024048	0,00935	0,015729	0,032802	0,015113
4	0,001222	0,019468	0,000965	0,007032	0,016128	0,003261	0,010551
5	0,000263	0,000168	0,002091	0,00556	0,000129	0,000332	0,000179
6	0,000178	6,95E-05	2,10E-05	0,010069	3,85E-05	8,38E-06	0,005288
7	7,73E-06	1,48E-05	6,61E-06	0,000526	1,89E-06	4,31E-06	2,65E-06
8	5,13E-06	0,000306	3,40E-06	0,003274	7,91E-05	0,000508	5,44E-05
9	9,87E-06	0,000149	8,46E-06	0,001329	0,00011	1,60E-05	0,000164
10	1,78E-05	0,000171	1,22E-05	0,002164	0,00014	9,32E-05	0,00026
11	3,21E-05	0,000295	1,60E-05	0,026059	0,000461	0,000212	0,002649
Falka Poziom	bl7	fk22	coif4	db1	db10	db45	haar
1	0,039296	0,039276	0,039064	0,007758	0,036351	0,036017	0,041606
2	0,025494	0,030672	0,035367	0,00801	0,027335	0,022999	0,034727
3	0,021712	0,016988	0,019702	0,00935	0,034646	0,00837	0,028041
4	0,01648	0,000241	0,00112	0,007032	0,004537	0,000334	0,034637
5	2,96E-05	0,000133	0,013368	0,00556	3,91E-05	1,10E-05	0,030608
6	2,19E-05	3,53E-05	5,77E-05	0,010069	4,08E-05	0,000215	0,031225
7	7,48E-06	1,19E-05	7,34E-06	0,000526	7,71E-06	1,36E-05	0,026529
8	8,42E-06	3,34E-05	1,21E-05	0,003274	2,17E-05	2,49E-06	0,016299
9	0,000678	4,21E-05	7,14E-05	0,001329	8,81E-05	1,15E-05	0,026752
10	0,000587	0,00021	0,000236	0,002164	0,000135	1,52E-05	0,004115
11	0,000581	0,000402	0,000473	0,026059	0,000249	2,16E-05	0,026059

Dla części z falek osiągnięcie wartości MSE mniejszej niż 10^{-5} [°²] jest niemożliwe, ze względu na znaczący poziom zniekształceń badanych funkcji lub też ze względu na brak możliwości aproksymacji tejże funkcji za pomocą regresji wielomianowej. Przykładem takiej funkcji może być funkcja zmiany sumy wartości współczynników w funkcji kąta obrotu dla wybranego poziomu transformaty obliczonej z wykorzystaniem falki Haara, dla której funkcja ta przyjmuje wartości zero lub bliskie zero w całym zakresie 0–180° kąta obrotu (rys. 6.12). Przedstawiona analiza pozwala na stwierdzenie, że poziomy zniekształceń możliwe do uzyskania za pomocą różnych falek mogą się znacząco różnić. Co za tym idzie nie wszystkie falki pozwalają na wiarygodne określenie kąta obrotu płaszczyzny polaryzacji światła. Analizowane wartości MSE przyjmują wartości najmniejsze dla poziomów 7–9, jednak dla poziomów wyższych wartość MSE wzrasta.

W celu oceny przydatności poszczególnych falek do obliczania kąta obrotu płaszczyzny polaryzacji światła zbadano wszystkie falki przedstawione w tabeli 6.1. Dla każdej z nich przeprowadzono dekompozycję do poziomu 11. włącznie. W niektórych przypadkach nastąpiło przekroczenie maksymalnego poziomu dekompozycji wynikającego z rozdzielczości sygnału, lecz nie należy tego traktować jako błąd. Zastosowano bowiem implementację dekompozycji falkowej dostarczaną przez pakiet Matlab, która pozwala na analizę efektów brzegowych dekompozycji falkowej. W tabeli 6.3 przedstawiono falki oraz ich poziomy dekompozycji. Te, dla których uzyskano poziom zaszumienia wyrażony jako MSE mniejszy niż $1 \cdot 10^{-5}$ [°²], oznaczono kolorem czerwonym. Te, dla których uzyskano poziom zaszumienia wyrażony jako MSE mniejszy niż $1 \cdot 10^{-4}$ [°²], oznaczono kolorem niebieskim. Poziomy dekompozycji, dla których uzyskano wyższy poziom zaszumienia, oznaczono kolorem białym. Z punktu widzenia pomiaru kąta obrotu polaryzacji światła najbardziej przydatne są falki, które pozwalają na uzyskanie niskiej wartości MSE na wielu poziomach dekompozycji.

Tabela 6.3. Poziom zasumienia funkcji budowanych na podstawie wybranych falek

Falka	Poziom dekompozycji							Falka	Poziom dekompozycji						
	4	5	6	7	8	9	10		4	5	6	7	8	9	10
dmey								db6							
bior1.1								db7							
bior1.3								db8							
bior1.5								db9							
bior2.2								db10							
bior2.4								db11							
bior2.6								db12							
bior2.8								db13							
bior3.1								db14							
bior3.3								db15							
bior3.5								db16							
bior3.7								db17							
bior3.9								db18							
bior4.4								db19							
bior5.5								db20							
bior6.8								db21							
han2.3								db22							
han3.3								db23							
han4.5								db24							
han5.5								db25							
vaid								db26							
mb4.2								db27							
mb8.2								db28							
mb8.4								db29							
mb10.3								db30							
mb12.3								db31							
mb14.3								db32							
mb16.3								db33							
mb18.3								db34							
mb24.3								db35							
mb32.3								db36							
bl7								db37							
bl9								db38							
bl10								db39							
fk4								db40							
fk6								db41							
fk8								db42							
fk14								db43							
fk18								db44							
fk22								db45							
db1								coif1							
db2								coif2							
db3								coif3							
db4								coif4							
db5								coif5							

6.4. Metoda automatycznego wyboru falek i poziomów dekompozycji

Na podstawie badań przedstawionych w podrozdziale 6.3 opracowana została metoda automatycznego wyboru falek i poziomów dekompozycji, które będą używane w procesie określania kąta obrotu płaszczyzny polaryzacji światła. Ze względu na odmienną strukturę wewnętrzną TFBBG wyniki uzyskane dla poszczególnych siatek mogą się różnić. Dlatego też istotne jest opracowanie metody, która umożliwi automatyzację doboru falek oraz poziomów dekompozycji, które pozwalają na uzyskanie najlepszych wyników pomiarów dla różnych siatek TFBBG. Każda siatka TFBBG przed użyciem musi zostać poddana kalibracji. Kalibracja wytworzonego układu pomiarowego polega na wykonaniu za jego pomocą pomiarów kąta obrotu płaszczyzny polaryzacji światła w zakresie $\alpha \in [0^\circ, 180^\circ]$, optymalnie z rozdzielczością nie większą niż 2° , zgodnie z algorytmem zaprezentowanym na rysunku 6.62.

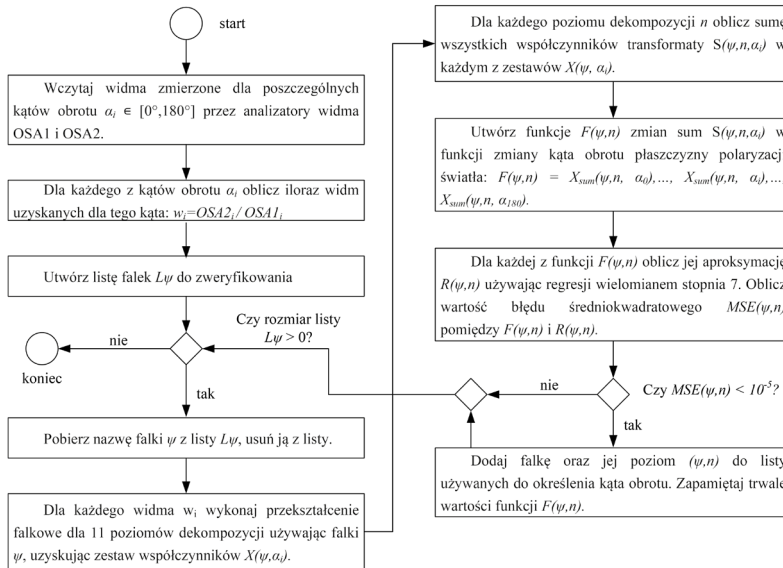
Kąt obrotu podczas wykonywania pomiarów w procesie kalibracji musi być znany. Uzyskane w wyniku pomiarów widma przetwarzane są transformatą falkową z użyciem różnych falek ψ na różnych poziomach dekompozycji n . Dla każdego z kątów obrotu α_k obliczane są sumy $X_{sum}(\psi, n, \alpha_k)$ wartości współczynników dla każdej z falek i każdego z poziomów dekompozycji niezależnie. Na ich podstawie tworzone są funkcje $F(\psi, n) = X_{sum}(\psi, n, \alpha_0), \dots, X_{sum}(\psi, n, \alpha_k), \dots, X_{sum}(\psi, n, \alpha_K)$ zmiany wartości sumy $X_{sum}(\psi, n, \alpha_k)$ w funkcji kąta obrotu α . Każda z funkcji $F(\psi, n)$ jest następnie aproksymowana za pomocą regresji wielomianowej $R(\psi, n)$ wielomianem stopnia siódmego. Kolejno obliczany jest poziom zakłóceń, jakie zawiera funkcja $F(\psi, n)$, poprzez obliczenie wartości błędu średnio kwadratowego pomiędzy wartościami funkcji $F(\psi, n)$ i jej aproksymacją $R(\psi, n)$ w punktach odpowiadających kątom obrotu, dla których zostały wykonane pomiary w procesie kalibracji. Przyjęto, że funkcje $F(\psi, n)$, dla których uzyskano wartości $MSE < 10^{-5}$, charakteryzują się niewielkim poziomem zakłóceń i mogą być użyte do określenia kąta obrotu płaszczyzny polaryzacji światła. Wynikiem kalibracji układu jest lista falek oraz poziomów dekompozycji, które będą używane do określania kąta obrotu. Dla każdej z tych falek i poziomów dekompozycji zapamiętywane są trwale wartości funkcji $F(\psi, n)$, zawierających zbiór wartości $X_{sum}(\psi, n, \alpha_k)$ odpowiadających kątom obrotu α_k , dla których wykonane zostały pomiary w procesie kalibracji.

W niniejszym rozdziale przyjęto założenie, że podczas kalibracji optymalne jest wykonywanie pomiarów z rozdzielczością nie mniejszą niż 2 stopnie obrotu. Aby je zweryfikować, postawiono pytanie badawcze o to, jaki jest

wpływ rozdzielczości kalibracji na dokładność pomiaru. Powtórzono wielokrotnie proces kalibracji, wykonując pomiary z różną rozdzielczością – od 1° do 8° . Następnie obliczono, o ile różni się wartość MSE (formuła 6.4) uzyskana dla pomiarów z badaną rozdzielczością od wartości MSE uzyskanej dla pomiarów wykonywanych co 1° obrotu. Wartość tę obliczono według wzoru:

$$MSE_{diff} = \frac{MSE_x}{MSE_1} \cdot 100\%, \quad (6.5)$$

gdzie: MSE_x – oznacza wartość MSE uzyskaną dla pomiarów co x stopni, MSE_1 – oznacza wartość MSE uzyskaną dla pomiarów wykonywanych co 1 stopień. Określono również, jaki wpływ ma rozdzielczość wykonywanych pomiarów (mierzona w stopniach podczas wykonywania obrotu) na zestaw funkcji $F(\psi, n)$ wybieranych w procesie kalibracji.



Rys. 6.62. Schemat blokowy algorytmu automatycznego wyboru falek oraz ich poziomów dekompozycji

Zbadano, ile w każdym z analizowanych przypadków zostało wybranych tych samych funkcji, co w przypadku wykonywania pomiarów co 1° obrotu (L_{ident}). Określono również, ile z funkcji użytych w procesie kalibracji wykonywanym z rozdzielczością 1° nie zostało wybranych podczas kalibracji z badaną rozdzielczością pomiarów ($L_{niewybr}$). Zidentyfikowano również liczbę funkcji

wybranych podczas kalibracji z badaną rozdzielczością pomiarów, które nie znajdowały się w zestawie funkcji wskazanych podczas kalibracji wykonywanej z rozdzielczością pomiarów równą 1° obrotu ($L_{dodatki}$). Uzyskane wyniki przedstawiono w tabeli 6.4.

Tabela 6.4. Wpływ rozdzielczości wykonywania pomiarów podczas kalibracji na zestaw wybieranych funkcji $F(\psi, n)$

Rozdzielczość pomiarów (x)	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°
L_{ident}	14	13	13	14	14	12	14
$L_{niewybr}$	0	1	1	0	0	2	0
$L_{dodatki}$	0	2	0	5	5	2	5
	14,7%	28,6%	32,9%	35,4%	43,3%	37,9%	49,6%

Jak widać podczas kalibracji wykonywanej z rozdzielczością 2° , wybrano ten sam zestaw funkcji $F(\psi, n)$, który został wyznaczony podczas kalibracji wykonywanej z rozdzielczością pomiarów co 1° . W każdym innym przypadku zestaw wybranych funkcji $F(\psi, n)$ różnił się. Jednak znaczące różnice można zaobserwować dopiero w przypadku kalibracji wykonywanej z rozdzielczością pięciu i więcej stopni. W zestawach funkcji $F(\psi, n)$ wybranych w tych przypadkach znajduje się znacząca liczba dodatkowych funkcji, które podczas kalibracji z większą rozdzielczością były uznawane za zbyt zaszumione. Wskazuje to, że kalibracja wykonywana z rozdzielczością 5° lub mniejszą może skutkować wyborem znaczącej liczby zaszumionych funkcji $F(\psi, n)$. Weryfikacja wartości MSE_{diff} pokazuje, że przyjmuje ona znaczące wartości już przy rozdzielczości wynoszącej 3° . Miara ta wskazuje, w jakim stopniu różni się ocena MSE dla tej samej funkcji $F(\psi, n)$ w procesach kalibracji wykonywanych z różną rozdzielczością. Dlatego też, ze względu na znaczącą wartość MSE_{diff} , nie należy stosować kalibracji z rozdzielczością większą niż 2° .

6.5. Kalibrowanie układu pomiarowego

Uzyskanie powtarzalności w procesie wytwarzania siatek Bragga jest trudne. Użycie metody maski fazowej ułatwia to zadanie, zapewniając wysoką powtarzalność parametrów spektralnych wytwarzanych siatek [70]. Niemniej jednak uzyskane siatki nie są identyczne. Ponadto siatka TFBG jest tylko jednym z elementów układu pomiarowego. Również inne elementy oraz ich łączenia wpływają na charakterystykę układu. Z tego względu niemożliwe jest uzyskanie

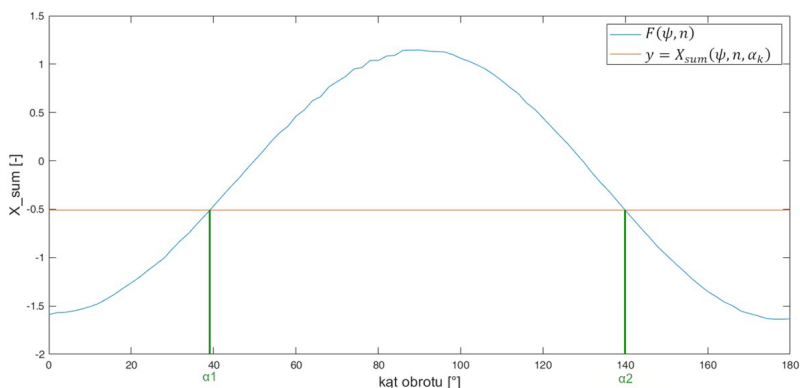
identycznych układów pomiarowych w procesie produkcyjnym. Dlatego też każdy układ przed użyciem musi zostać skalibrowany.

Kalibracja układu polega na wykonaniu serii pomiarów w zakresie $0-180^\circ$ kąta obrotu płaszczyzny polaryzacji światła. Pomiary powinny zostać wykonane z rozdzielczością nie większą niż 2° obrotu. W przypadku zastosowania większych rozdzielczości dokładność układu pomiarowego może być mniejsza. Dodatkowymi ograniczeniami procesu kalibracji jest konieczność wykonania pomiarów dla kątów obrotu wynoszących 0° , 90° i 180° . Dla tych kątów obrotu występują maksima i minima większości funkcji używanych do określania mierzonego kąta obrotu.

Widma uzyskane z każdego z pomiarów przetwarzane są za pomocą przekształcenia falkowego. Dla każdej z falek wybranych do przetwarzania wyników wykonywane jest niezależne przekształcenie. W wyniku uzyskujemy zbiór współczynników transformat.

Następnie tworzony jest zbiór funkcji $F(\psi, n)$. Każda z funkcji składa się z sum wszystkich współczynników n -tego poziomu transformaty uzyskanych dla każdego z kątów obrotu, dla których wykonywano pomiary w procesie kalibracji. Dla tak uzyskanych funkcji oceniany jest poziom zaszumienia, zgodnie z algorytmem przedstawionym na rysunku 6.62. Funkcje $F(\psi, n)$, dla których oceniony poziom zniekształceń będzie niższy od dopuszczalnego, są trwale zapisywane w układzie pomiarowym. Zapisywane są wartości funkcji obliczone dla kątów obrotu użytych w procesie kalibracji, nazwa falki oraz poziom jej dekompozycji. Zbiór funkcji $F(\psi, n)$ wybranych podczas kalibracji oznaczany będzie symbolem FV_{kal} . Zbiór wybranych falek i poziomów dekompozycji oznaczany będzie symbolem FD_{kal} .

W procesie kalibracji dla każdego zmierzonego kąta obrotu α_k odczytywane są wartości kąta obrotu poprzez wyznaczenie punktów przecięcia funkcji $F(\psi, n)$ z prostą $y = X_{sum}(\psi, n, \alpha_k)$. Graficzna reprezentacja tego działania dla $X_{sum}(\psi, n, \alpha_k) = -0,5$ została przedstawiona na rysunku 6.63. Zazwyczaj w wyniku otrzymywane są dwie wartości kąta obrotu: jedna z pierwszej połowy zakresu pomiaru – $\alpha \in [0^\circ, 90^\circ)$, druga z drugiej połowy zakresu – $\alpha \in (90^\circ, 180^\circ]$. Jednak, ze względu na brak symetrii funkcji $F(\psi, n)$ możliwe jest otrzymanie innej liczby wartości. Dla kątów $\alpha \in [172^\circ, 180^\circ]$ często otrzymywana jest tylko jedna wartość. Odczytane wartości kątów umieszczane są w dwóch zbiorach: K_{I0} zawierającym odczytane kąty $\alpha \in [0^\circ, 90^\circ)$ oraz K_{II0} zawierającym $\alpha \in (90^\circ, 180^\circ]$. Dla każdego zmierzonego kąta obrotu zliczane są elementy zbioru K_{I0} , których liczba oznaczana jest dalej symbolem $N_I(\alpha)$ oraz elementy zbioru K_{II0} , których liczba oznaczana jest dalej symbolem $N_{II}(\alpha)$.



Rys. 6.63. Wyznaczenie punktów przecięcia funkcji $F(\psi, n)$ z prostą $y = X_{sum}(\psi, n, \alpha_k)$

Do tej pory w procesie kalibracji funkcje $F(\psi, n)$ były traktowane jako funkcje dyskretne. Wszystkie potrzebne wartości funkcji były wyznaczane z danych pomiarowych. Wyznaczanie punktów przecięcia funkcji $F(\psi, n)$ z prostą $y = X_{sum}(\psi, n, \alpha_k)$ wymaga zastosowania ciągłej postaci funkcji $F(\psi, n)$. Ciągła postać funkcji uzyskiwana jest poprzez połączenie kolejnych punktów funkcji dyskretnej odcinkami prostej, których równanie określane jest wzorem:

$$F(\alpha, X_{sum}) = \frac{X_{sum2} - X_{sum1}}{\alpha_2 - \alpha_1} \cdot (\alpha - \alpha_1) + X_{sum1}, \quad (6.6)$$

gdzie: α_1, X_{sum1} to współrzędne pierwszego z łączonych punktów, α_2, X_{sum2} to współrzędne drugiego z łączonych punktów.

6.6. Metoda wyznaczania kąta obrotu na podstawie danych z analizatora widma

Za pomocą skalibrowanego układu wykonywany jest pomiar widma światła. Widmo to jest poddawane przekształceniu falkowemu za pomocą każdej z falek i każdego z poziomów dekompozycji ze zbioru FD_{kal} . Uzyskiwane są zestawy współczynników transformaty falkowej, z których obliczane są wartości średnie $X_{sum}(\psi, n, \alpha_k)$. Następnie wyznaczane są punkty przecięcia funkcji $F(\psi, n)$, uzyskanych podczas kalibracji, z prostymi $y = X_{sum}(\psi, n, \alpha_k)$. Odczytywane są kąty obrotu α_k odpowiadające tym punktom przecięcia. W ten sposób tworzony

jest zbiór wartości α_k , który stanowi podstawę do dalszej analizy. Zbiór ten oznaczono symbolem K .

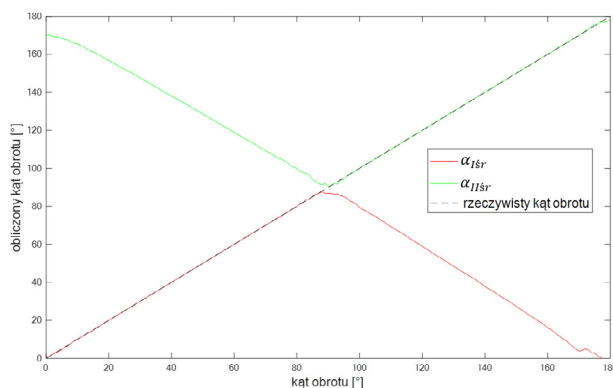
Wartości ze zbioru K dzielone są na dwa zbiory: K_I zawierający $\alpha_k \in [0^\circ, 90^\circ]$ oraz K_{II} zawierający $\alpha_k \in (90^\circ, 180^\circ]$. Dla zbiorów obliczane są:

- liczebności zbiorów: $N1$ oznacza liczbę wartości w zbiorze K_I , $N2$ oznacza liczbę wartości w zbiorze K_{II} ,
- wartości średnie: $\alpha_{I\acute{s}r} = \frac{\sum_{i=1}^{N1} \alpha_k}{N1}$ oraz $\alpha_{II\acute{s}r} = \frac{\sum_{i=1}^{N2} \alpha_k}{N2}$, gdzie $N1$

oznacza liczbę wartości w zbiorze K_I , $N2$ oznacza liczbę wartości w zbiorze K_{II} , α_k – wartości kątów znajdujące się w zbiorach,

- odchylenia standardowe: $\sigma_I = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N1} |\alpha_k - \alpha_{I\acute{s}r}|^2}{N1}}$ oraz $\sigma_{II} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N2} |\alpha_k - \alpha_{II\acute{s}r}|^2}{N2}}$

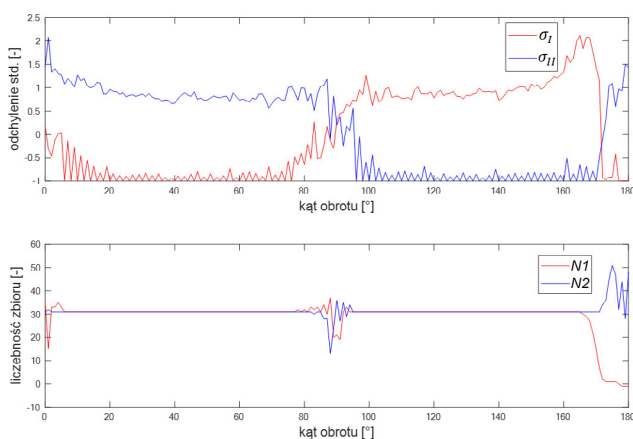
Ze względu na kształt funkcji $F(\psi, n)$ dla większości pomiarów uzyskiwane są dwie wartości kąta obrotu. Zazwyczaj są one rozmieszczone prawie symetrycznie względem kąta obrotu wynoszącego 90° . Na rysunku 6.64 przedstawiono wykres prezentujący wartości: $\alpha_{I\acute{s}r}$ oraz $\alpha_{II\acute{s}r}$ uzyskane dla pomiarów wykonanych z rozdzielczością 1° obrotu. Wartości ze zbioru K_I są bliskie prawidłowemu odczytowi w zakresie $0-90^\circ$. Dla kątów obrotu z zakresu $90-180^\circ$ prawidłowy odczyt można uzyskać, odczytując wartość ze zbioru K_{II} . Problem stanowi niejednoznaczność odczytu – należy wybrać jedną z dwóch odczytanych wartości.



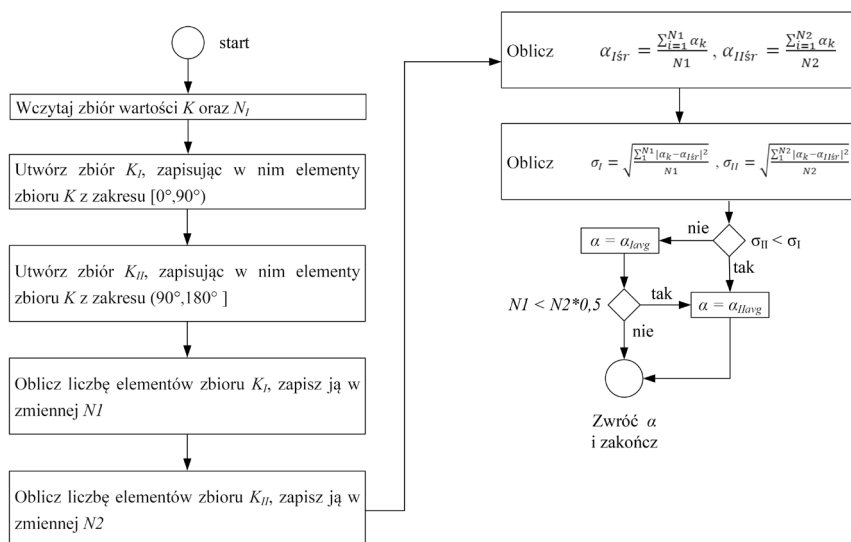
Rys. 6.64. Wartości $\alpha_{I\acute{s}r}$ oraz $\alpha_{II\acute{s}r}$ uzyskane dla pomiarów wykonanych z rozdzielczością 1° obrotu

Wartości $\alpha_{I\dot{s}r}$ oraz $\alpha_{II\dot{s}r}$ są wartościami średnimi liczonymi ze zbiorów wartości K_I oraz K_{II} . Aby możliwe było ustalenie, która z wartości wskazuje zmierzony kąt obrotu, konieczna jest analiza danych ze zbiorów K_I oraz K_{II} . Polega ona na obliczeniu odchyłeń standardowych oraz liczebności każdego ze zbiorów niezależnie. Badania wykazały, że odchylenie standardowe zbioru, którego wartość średnia wskazuje poprawny kąt obrotu, jest mniejsze – tak jak to pokazano na rysunku 6.65. Na tej podstawie nie można jednak poprawnie zidentyfikować odczytów dla kątów α większych równych 172 stopni. W tym przypadku konieczna jest analiza liczebności zbiorów K_I oraz K_{II} . Wyraźnie zauważalne jest zmniejszenie liczebności zbioru K_I dla kątów obrotu powyżej 172°. W przedstawionym rozwiązaniu problemem pozostaje ocena kąta obrotu w zakresie 86–94°. Wartości $\alpha_{I\dot{s}r}$ oraz $\alpha_{II\dot{s}r}$ są obarczone błędem dla $\alpha \in [86^\circ, 94^\circ]$. Rozpoznanie tego zakresu kątów obrotu jest możliwe na podstawie analizy wartości $\alpha_{I\dot{s}r}$ oraz $\alpha_{II\dot{s}r}$. Ich przebiegi w tym zakresie posiadają minimum ($\alpha_{I\dot{s}r}$) oraz maksimum ($\alpha_{II\dot{s}r}$) lokalne. Ponadto różnica wartości pomiędzy nimi jest najmniejsza w całym zakresie pomiarowym.

Ocena na podstawie wskazanych parametrów jest jednak kłopotliwa i bywa zawodna. Ze względu na wymienione problemy zrezygnowano z rozpoznawania tego zakresu wartości. Aby proponowana metoda dawała również w tym zakresie wyniki zbliżone do rzeczywistych, wartość odczytanego kąta obrotu przed wykonaniem obliczeń ustawiana jest na 90°. Następnie jest modyfikowana zgodnie z algorytmem przedstawionym na rysunku 6.66, wyznaczającym, która z wartości – $\alpha_{I\dot{s}r}$ czy $\alpha_{II\dot{s}r}$ – wskazuje właściwy kąt obrotu. W przypadku pomiaru wykonywanego w zakresie $\alpha \in [86^\circ, 94^\circ]$ algorytm nie zmienia początkowo przyjętej wartości $\alpha = 90^\circ$.

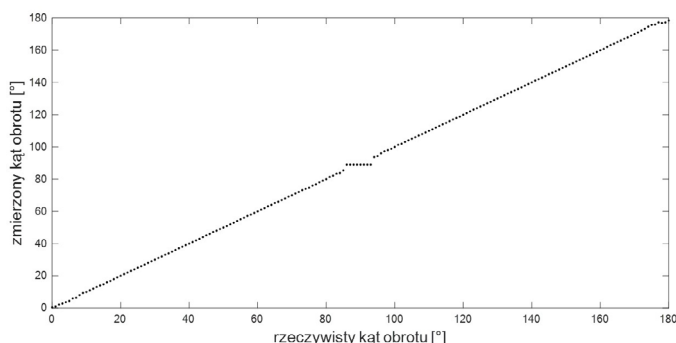


Rys. 6.65. Wartości odchylenia standardowego i liczebności zbiorów K_I oraz K_{II}



Rys. 6.66. Schemat algorytmu obliczającego kąt obrotu

Wyniki działania zaproponowanej metody w zakresie 0–180°, obliczone na podstawie pomiarów wykonywanych za pomocą siatki TFBG o kącie pochylenia 7° z rozdzielczością 1° obrotu, przedstawiono na rysunku 6.67.



Rys. 6.67. Wyniki pomiarów kąta obrotu dla siatki o pochyleniu struktury równym 7°

Obserwuje się zakłócenia w działaniu metody w zakresie 82–98° spowodowane brakiem możliwości precyzyjnego obliczenia wyniku w tym zakresie. Z tego powodu wyniki mieszczące się w omawianym zakresie zastępuje się wartością 90° i ponownie dokonuje się ich obliczania za pomocą metody przedstawionej w rozdziale 6.8. W pozostałych zakresach metoda działa poprawnie i nie wymaga dalszych obliczeń.

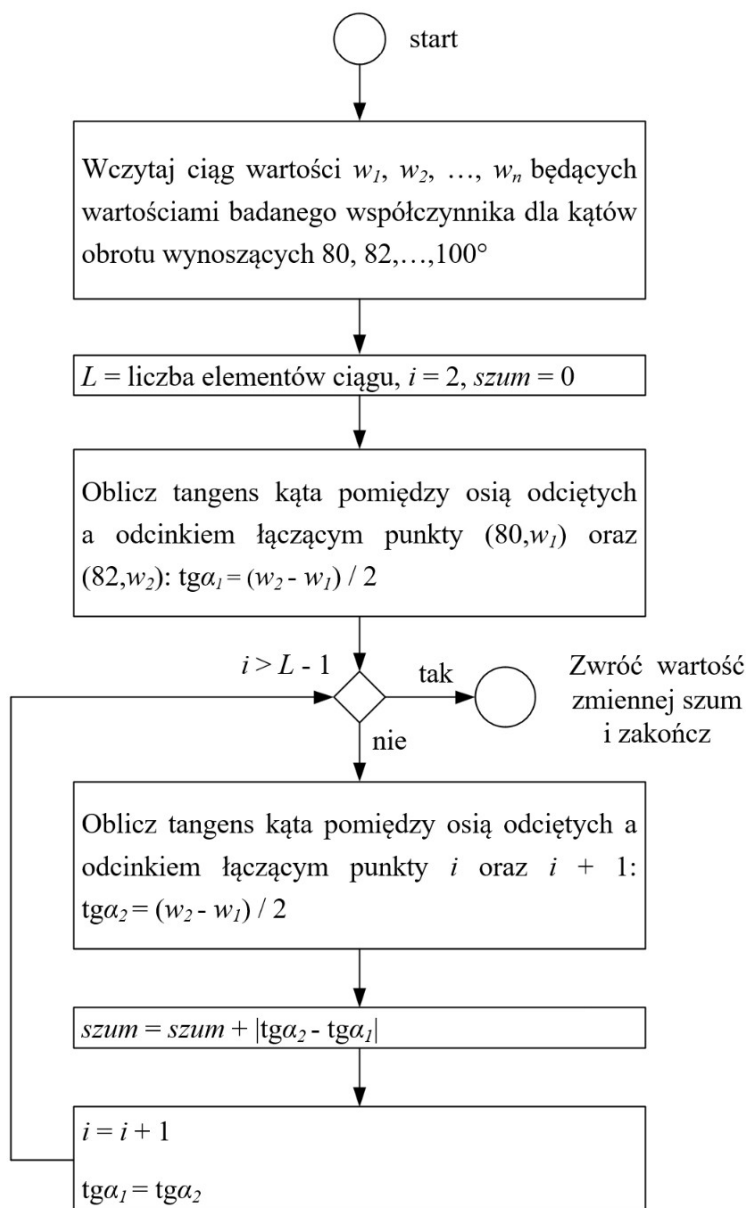
6.7. Dodatkowa kalibracja na potrzeby pomiaru w zakresie 82–98 stopni

Problemem przedstawionej metody jest brak możliwości wykonania pomiaru w zakresie $\alpha \in [86^\circ, 94^\circ]$. Przedstawiony algorytm pozwala jedynie na uzyskanie informacji, że mierzony kąt obrotu jest zbliżony do 90° , co zostało przedstawione na rysunku 6.17 oraz co przedyskutowano w rozdziale 6.6. Dlatego też opracowany został dodatkowy algorytm weryfikujący wyniki pomiaru w zakresie $\alpha \in [86^\circ, 94^\circ]$. Algorytm ten wykorzystywany jest, gdy wynik zwrócony przez algorytm przedstawiony w rozdziale 6.6 zawiera się w przedziale $\alpha \in [86^\circ, 94^\circ]$ stopni.

Pomiar w zakresie $\alpha \in [86^\circ, 94^\circ]$ wykonywany jest na podstawie analizy wartości pojedynczych współczynników transformaty falkowej. Aby taki pomiar był możliwy, mn należy zidentyfikować współczynniki, które w zakresie $\alpha \in [80^\circ, 100^\circ]$ wykazują się znaczną zmiennością wartości i niskim poziomem szumu. Aby było to możliwe, konieczne jest rozbudowanie procesu kalibracji, przedstawionego w rozdziale 6.5, o identyfikację takich współczynników oraz zapamiętanie ich wartości dla kątów obrotu, dla których wykonano pomiary w procesie kalibracji. Pomimo że pomiar będzie wykonywany w zakresie $\alpha \in [86^\circ, 94^\circ]$ to współczynniki poddawane są analizie w zakresie $\alpha \in [80^\circ, 100^\circ]$. Jest to celowe działanie pozwalające na uniknięcie błędów na granicach przedziału pomiarowego.

Dla każdego ze współczynników DWT, obliczonych z widm uzyskanych w procesie kalibracji, tworzone są przebiegi zmienności $W(\alpha)$ w funkcji kąta obrotu płaszczyzny polaryzacji światła. Następnie każdy z przebiegów jest normalizowany, aby maksymalna wartość w nim występująca była równa jeden, a minimalna zero. Przebiegi znormalizowane oznaczono jako $W(\alpha)_{\text{norm}}$. Następnie badane jest zaszumienie oraz nachylenie przebiegów $W(\alpha)_{\text{norm}}$ w zakresie kątów obrotu $\alpha \in [80^\circ, 100^\circ]$. W tym celu wyznaczany jest model regresji liniowej wartości przebiegu $W(\alpha)_{\text{norm}}$ w zakresie kątów obrotu $\alpha \in [80^\circ, 100^\circ]$. Przyjmuje on postać $y = ax + b$. Współczynnik a jest przyjmowany jako nachylenie badanego przebiegu. Do dalszej analizy brane są przebiegi, których współczynnik a przyjmuje wartości większe od 0,018.

Ze względu na specyfikę wykorzystania najbardziej przydatne są przebiegi monotoniczne jak najbardziej zbliżone do prostoliniowych. Ze względu na to opracowano algorytm oceny zaszumienia bazujący na badaniu zmian kąta nachylenia N odcinków łączących poszczególne punkty badanego przebiegu. Obliczenie prowadzone jest według algorytmu zaprezentowanego na rysunku 6.68.

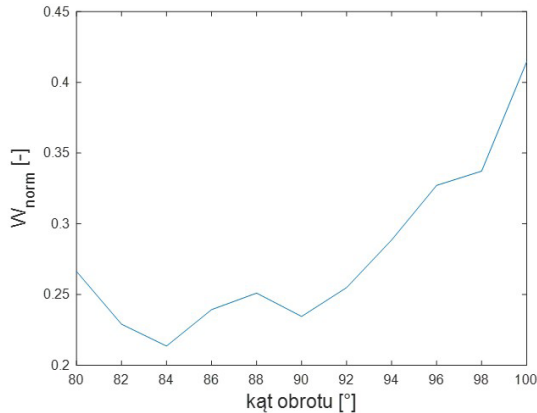
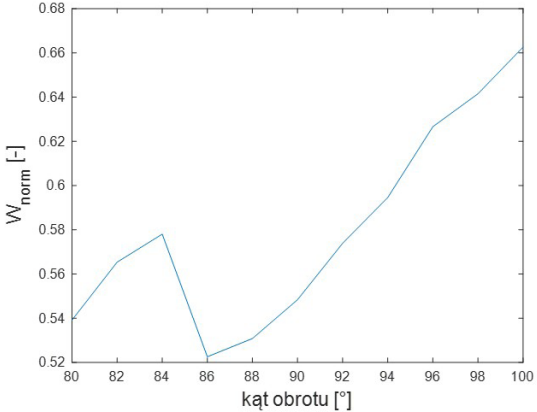
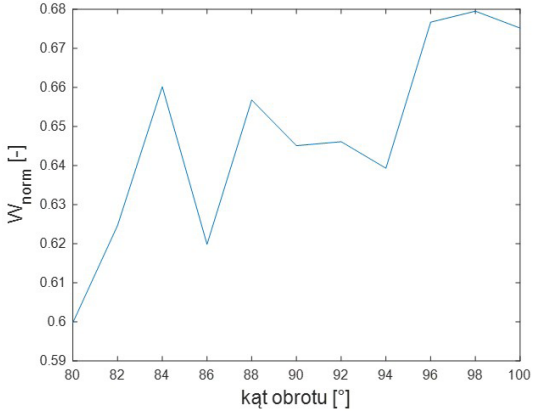


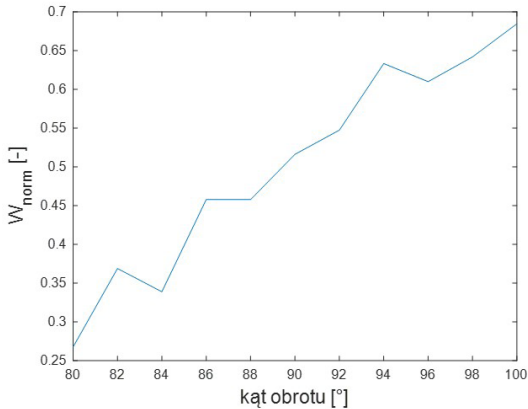
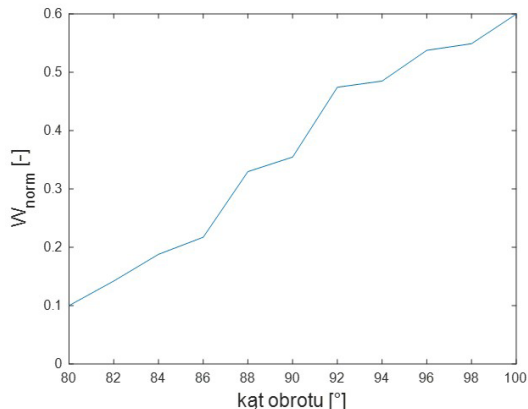
Rys. 6.68. Schemat blokowy algorytmu oceniania zaszumienia ciągu wartości

W przedstawiony sposób oceniane są przebiegi wszystkich współczynników DWT. Te, które spełniają warunki: $a > 0,018$ i $szum < 0,03$ są zapamiętywane. Spośród zapamiętanych przebiegów wybieranych jest 40 o najmniejszej wartości oceny $szum$. Są one zapamiętywane trwale w procesie kalibracji w zbiorze W_{kal} .

W tabeli 6.5 przedstawiono wybrane przebiegi wraz z ich ocenami.

Tabela 6.5. Miary zaszumienia i nachylenia wybranych przebiegów

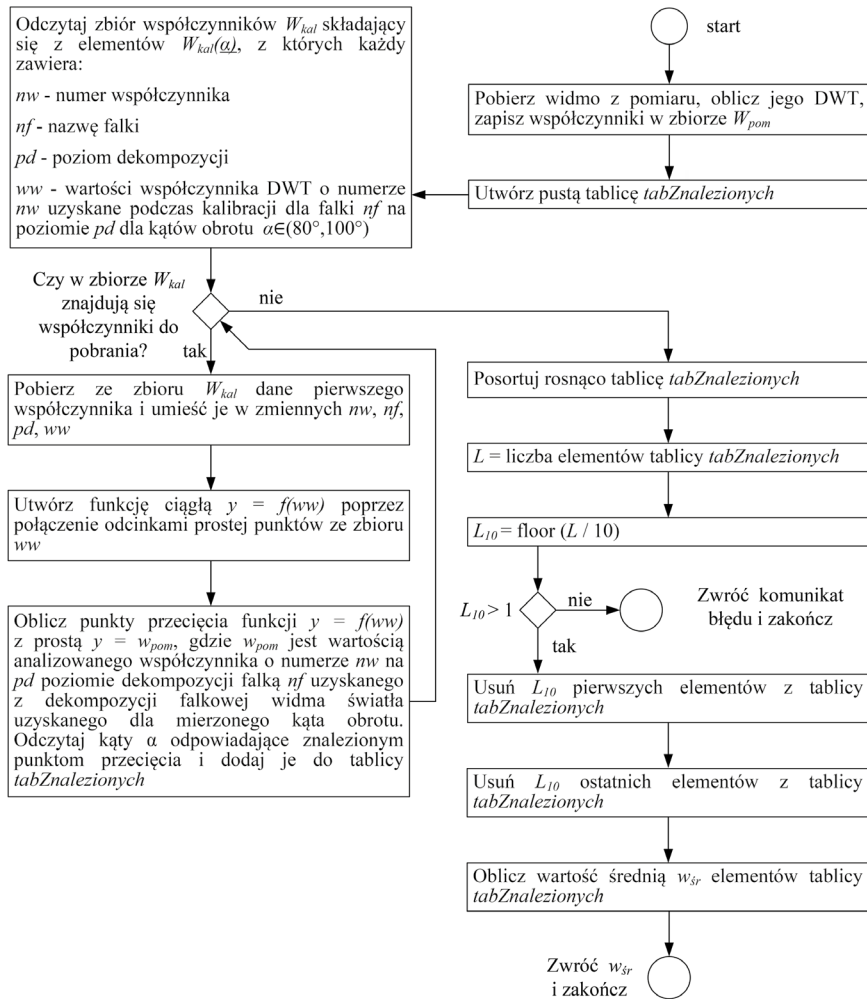
Przebieg współczynnika	szum[-]	N[-]
	0,0573	0,007
	0,025	0,006
	0,146	0,003

Przebieg współczynnika	szum[-]	N[-]
	0,0293	0,02
	0,0043	0,027

6.8. Pomiar w zakresie 82–98 stopni obrotu

W przypadku gdy metoda przedstawiona w rozdziale 6.6 zwróci wartość z zakresu $\alpha \in [82^\circ, 98^\circ]$, oznacza to, że wynik obarczony jest błędem ze względu na brak możliwości precyzyjnego obliczenia kąta obrotu w tym zakresie (rys. 6.64). Następuje wówczas ponowne przeliczenie wyniku za pomocą dodatkowej metody przeznaczonej do pomiaru w zakresie $\alpha \in [80^\circ, 100^\circ]$, której schemat blokowy pokazano na rysunku 6.69. Zakres tej metody musi być większy niż podany ($\alpha \in [82^\circ, 98^\circ]$), gdyż przeliczenie każdej z wartości może skutkować wynikiem tak mniejszym, jak i większym. Dlatego metoda musi zapewniać odpowiednio duży przedział działania zarówno w zakresie wartości mniejszych, jak i większych, tak aby możliwe było poprawne przeprowadzenie obliczeń. Wielkość tego przedziału ustalono w drodze eksperymentu i wynosi ona $\pm 2^\circ$.

Stąd, w przypadku jeśli metoda ma poprawnie przeliczyć kąt obrotu, który wstępnie został oceniony na kąt z zakresu $\alpha \in [82^\circ, 98^\circ]$, musi ona zapewniać poprawne działanie w zakresie $\alpha \in [80^\circ, 100^\circ]$.



Rys. 6.69. Schemat blokowy algorytmu pomiaru kąta obrotu w zakresie $\alpha \in [80^\circ, 100^\circ]$

W metodzie obliczania kąta obrotu z zakresu widmo światła uzyskane w drodze pomiaru jest przetwarzane za pomocą DWT. Spośród uzyskanych współczynników DWT wybiera się te, które zostały zapisane w zbiorze W_{kal} . Odczytuje się wartość w każdego z tych współczynników, a następnie odczytuje się kąty obrotu odpowiadające przecięciu prostej $y = w$ z funkcją powstałą poprzez połączenie odcinkami prostymi kolejnych wartości analizowanego

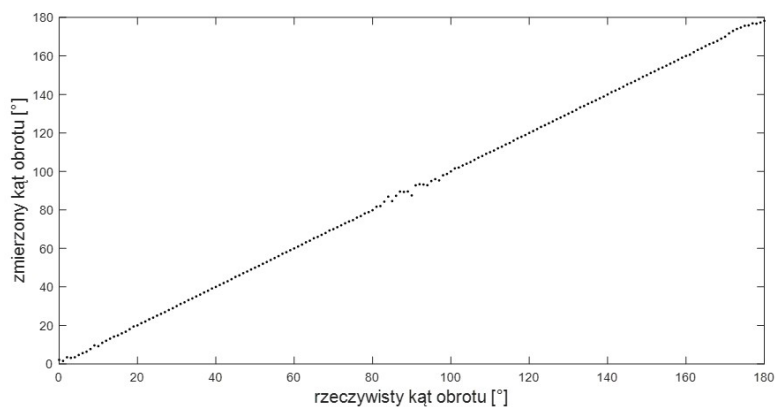
współczynnika zapamiętanymi w zbiorze W_{kal} . Ze zbioru odczytanych kątów obrotu usuwa się 10% największych i 10% najmniejszych wartości. Ma to na celu pozbycie się wartości odstających, które mogłyby znacząco zafałszować wynik pomiaru. Procent usuwanych wartości został określony w wyniku przeprowadzonych badań eksperymentalnych. Z pozostałych oblicza się średnią, która stanowi wynik pomiaru. Istnieje również możliwość, iż algorytm nie będzie w stanie poprawnie obliczyć kąta obrotu ze względu na zbyt małą liczbę współczynników w zbiorze W_{kal} . Zwraca wówczas komunikat błędu. W takim wypadku pozostawiana jest dotychczasowa wartość pomiaru.

Problem zbyt małej liczby współczynników w zbiorze W_{kal} może teoretycznie wystąpić w przypadku dobrania niewłaściwych falek do analizy danych pomiarowych. Przykładem może być zbadana wcześniej falka Haara, której współczynniki charakteryzują się płaskim przebiegiem dla kątów obrotu z zakresu $\alpha \in [80^\circ, 100^\circ]$. W trakcie badań nie napotkano wzmiankowanego problemu, jednak używane były jedynie te falki, dla których uzyskiwano najniższy poziom zaszumienia funkcji $F(\psi, n)$ (tab. 6.3).

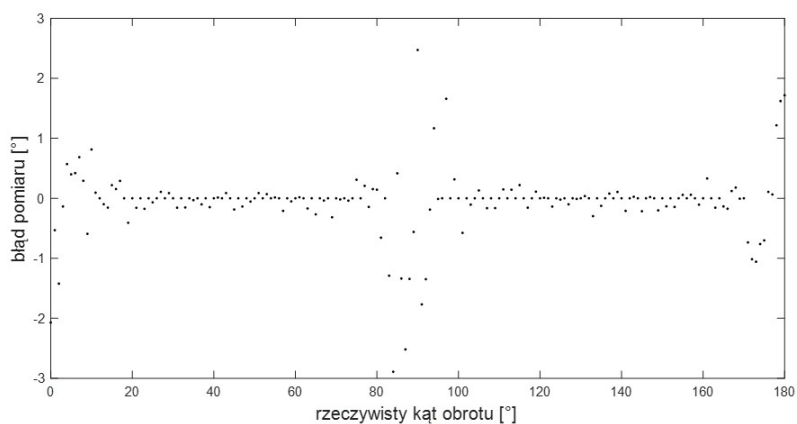
6.9. Dyskusja wyników

W celu weryfikacji opracowanej metody wykonano pomiary za pomocą siatek o kątach Θ pochylenia struktury TFBG wynoszących 5° oraz 7° . Przed przeprowadzeniem pomiarów układy poddano kalibracji, wykonując pomiary dla kątów $\alpha = 0^\circ, 2^\circ, 4^\circ, \dots, 180^\circ$. W procesie kalibracji użyto falek oznaczonych symbolami: void, bl7, coif5, dmey. Pomiary wykonywano z rozdzielczością 1 stopnia w zakresie 0 – 180 stopni obrotu. Wyniki pomiarów uzyskane dla siatki o $\Theta = 7^\circ$ przedstawiono na rysunku 6.70, a błędy pomiarowe dla poszczególnych kątów obrotu pokazano na rysunku 6.71. Wyniki pomiarów uzyskane dla siatki o $\Theta = 5^\circ$ uwidoczniono na rysunku 6.72, a błędy pomiarowe dla poszczególnych kątów obrotu zaprezentowano na rysunku 6.73.

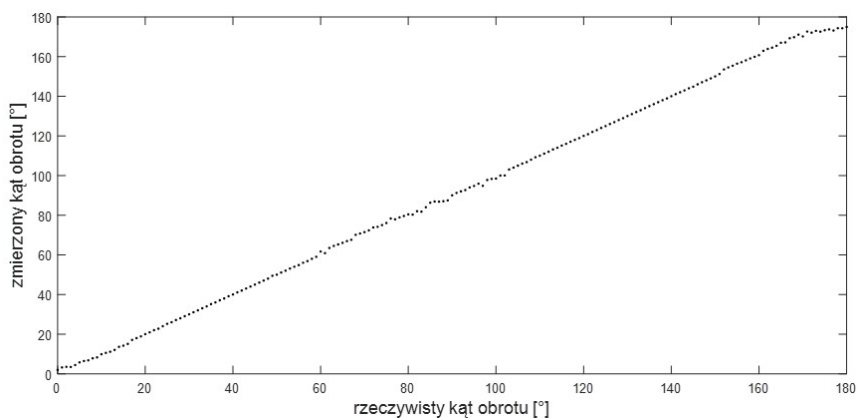
Analiza wyników uzyskanych dla siatek o $\Theta = 5^\circ$ i $\Theta = 7^\circ$ pokazuje, że zaproponowana metoda działa poprawnie dla kątów obrotu płaszczyzny polaryzacji światła $\alpha \in [0^\circ, 180^\circ]$. Dokładniejsze wyniki uzyskiwane są dla siatki o $\Theta = 7^\circ$. W przypadku siatki o $\Theta = 5^\circ$, w porównaniu z wynikami uzyskanymi dla siatki o $\Theta = 7^\circ$, zauważalne są większe wartości błędów, zwłaszcza dla kątów obrotu: $\alpha \in [150^\circ, 180^\circ]$ i $\alpha \in [0^\circ, 18^\circ]$ oraz $\alpha \in [60^\circ, 100^\circ]$. Ponadto przedziały zakresów kątów, dla których występuje wyższy poziom błędów, są znacznie szersze dla siatki o $\Theta = 5^\circ$.



Rys. 6.70. Wyniki pomiarów uzyskane dla siatki o $\Theta = 7^\circ$ i falek void, bl7, coif5, dmev

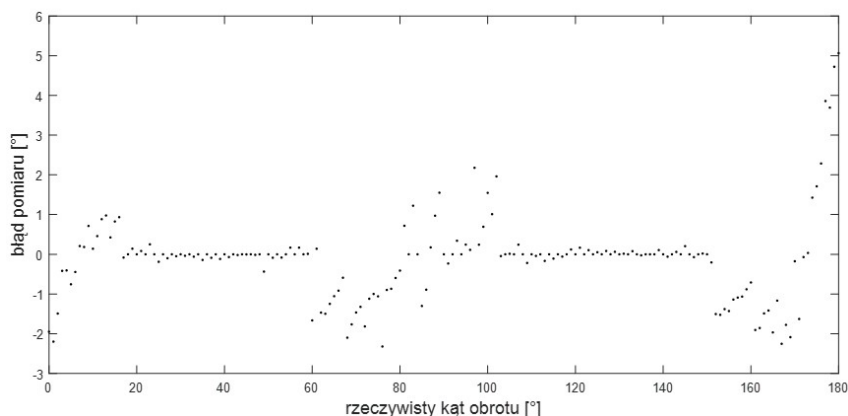


Rys. 6.71. Błędy pomiarów dla siatki o $\Theta = 7^\circ$ i falek void, bl7, coif5, dmev

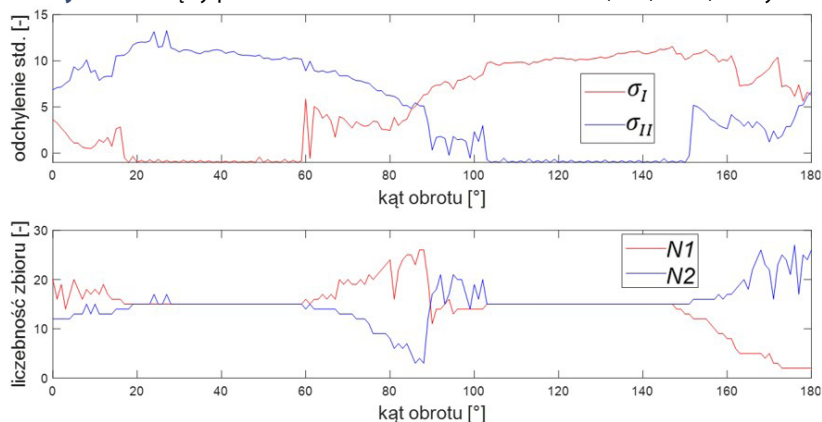


Rys. 6.72. Wyniki pomiarów uzyskane dla siatki o $\Theta = 5^\circ$ i falek void, bl7, coif5, dmev

W przypadku siatki o $\Theta = 5^\circ$ problemem jest mniejsza odległość sygnału od szumu. Funkcje X_{sum} uzyskane dla siatki o $\Theta = 5^\circ$ charakteryzują się większą wartością MSE. Liczba funkcji X_{sum} dla siatki o $\Theta = 5^\circ$, przydatnych w prowadzonych obliczeniach, w porównaniu z siatką o $\Theta = 7^\circ$ jest zdecydowanie mniejsza. Znaczący wpływ zaszumienia obserwowany jest dla kątów obrotu o zwiększonym poziomie błędów $\alpha \in [150^\circ, 180^\circ]$ i $\alpha \in [0^\circ, 18^\circ]$ oraz $\alpha \in [60^\circ, 100^\circ]$. Zwiększenie zaszumienia pomiarów możliwe jest do zaobserwowania pośrednio poprzez analizę wartości odchylenia standardowego w zbiorach K_I oraz K_{II} .



Rys. 6.73. Błędy pomiarów dla siatki o $\Theta = 5^\circ$ i falek vaid, bl7, coif5, dmev



Rys. 6.74. Wartości odchylenia standardowego i liczebności zbiorów K_I oraz K_{II} dla siatki o pochyleniu $\Theta = 5^\circ$

Na rysunku 6.74 przedstawiono wartości σ_I i σ_{II} uzyskane dla jednej z serii pomiarowych wykonanych za pomocą siatki o pochyleniu $\Theta = 5^\circ$. Znaczące zwiększenie odchylenia standardowego wskazuje, że uzyskano zbiór odczytów

kąta obrotu o większym zróżnicowaniu. Proponowana metoda wykorzystuje uśrednienie odczytów. W przypadku obliczania wartości średniej z grupy wartości obarczonych znacznym błędem również wynik będzie obciążony błędem.

Możliwe jest zastosowanie siatek o innych kątach nachylenia płaszczyzn dyfrakcyjnych. Metoda została zaprojektowana w taki sposób, aby możliwe było automatyczne skalibrowanie układu wyposażonego w dowolną siatkę TFBG. Należy jednak pamiętać, że dla siatek o mniejszych kątach błąd pomiaru będzie wzrastał. Badania przeprowadzone dla siatki o kącie nachylenia struktur wynoszącym $\Theta = 3^\circ$ nie dały zadowalających wyników. Wskazane jest stosowanie siatek o znaczących kątach nachylenia struktur. Użycie siatki TFBG o mniejszym kącie nachylenia struktur może być częściowo zrekompensowane zwiększeniem liczby falek użytych do obliczenia kąta obrotu płaszczyzny polaryzacji światła. Wiąże się to jednak ze zwiększeniem złożoności obliczeniowej metody. W przypadku badanych siatek o kątach nachylenia struktur wynoszących $\Theta = 5^\circ$ i $\Theta = 7^\circ$ lepsze wyniki uzyskiwane były dla siatki $\Theta = 7^\circ$ pomimo użycia mniejszej liczby falek do przeprowadzenia obliczeń.

Porównanie rezultatów uzyskanych dla badanych siatek wykazuje, że siatka o kącie pochylenia struktur wynoszącym 7° pozwala na uzyskanie większej dokładności pomiaru, a otrzymane wyniki są zadowalające. Nie badano więc siatek o większych kątach pochylenia struktur.

Brak precyzji pozycjonowania kąta pochylenia płaszczyzn dyfrakcyjnych nie stanowi żadnego problemu, ponieważ układ pomiarowy przed użyciem jest kalibrowany. Pozwala to na dostosowanie metody do jego charakterystyki, w tym do kąta nachylenia struktur.

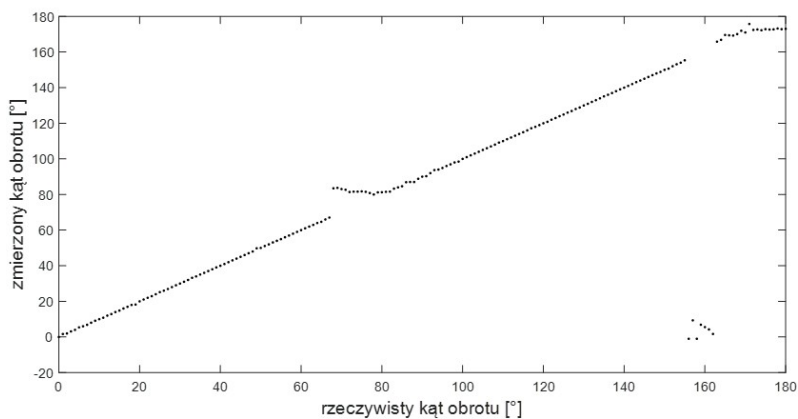
7. Analiza wpływu zmian parametrów proponowanej metody na uzyskane wyniki

Podczas projektowania metody przyjęto wiele założeń dotyczących optymalnych wartości różnych jej parametrów. W niniejszym rozdziale przedstawiono weryfikację wpływu zmian wybranych parametrów na uzyskiwane wyniki.

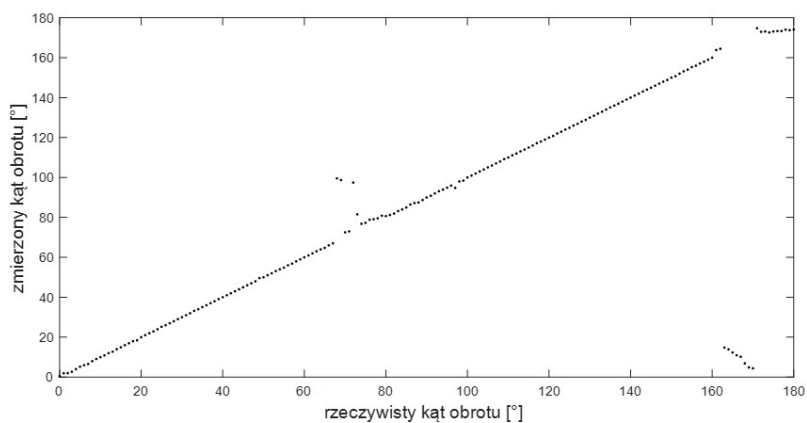
7.1. Analiza wpływu zastosowanej falki na dokładność pomiaru

Jednym z kluczowych aspektów jest dobór falek, które zostaną użyte do obliczenia mierzonego kąta obrotu płaszczyzny polaryzacji światła. Wydaje się, że im większa liczba falek, tym dokładniejszy wynik powinien być możliwy do uzyskania. Wymaga to jednak zweryfikowania. Należy również pamiętać, że większa liczba falek to również większa liczba obliczeń, a co za tym idzie większa czasochłonność i złożoność obliczeniowa pomiaru. W niniejszym badaniu przyjęto akceptowalny poziom błędu $MSE = 5 \cdot 10^{-5} [^{\circ}]$ oraz regresję wielomianem stopnia siódmego.

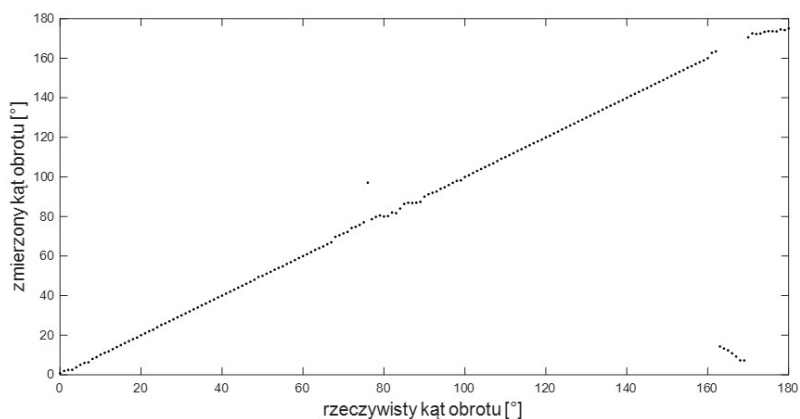
Badanie rozpoczęto od analizy doboru falek dla siatki o $\Theta = 5^{\circ}$. Przeanalizowano możliwość użycia różnej liczby falek do wykonania obliczeń. Zaczęto od zastosowania pojedynczej falki. W kolejnych badaniach liczba falek była zwiększana. Uzyskane wyniki wraz z wyszczególnieniem użytych falek przedstawiono na rysunkach 7.1–7.10.



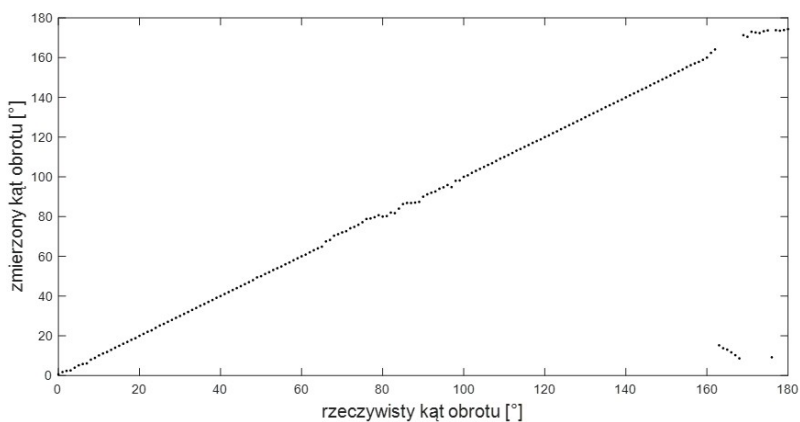
Rys. 7.1. Wyniki pomiarów uzyskane dla siatki o $\Theta = 5^\circ$ i falki dmey



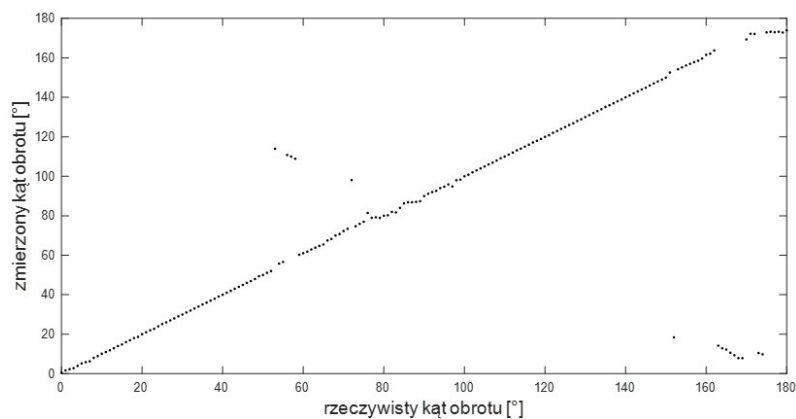
Rys. 7.2. Wyniki pomiarów uzyskane dla siatki o $\Theta = 5^\circ$ i falek dmey i vaid



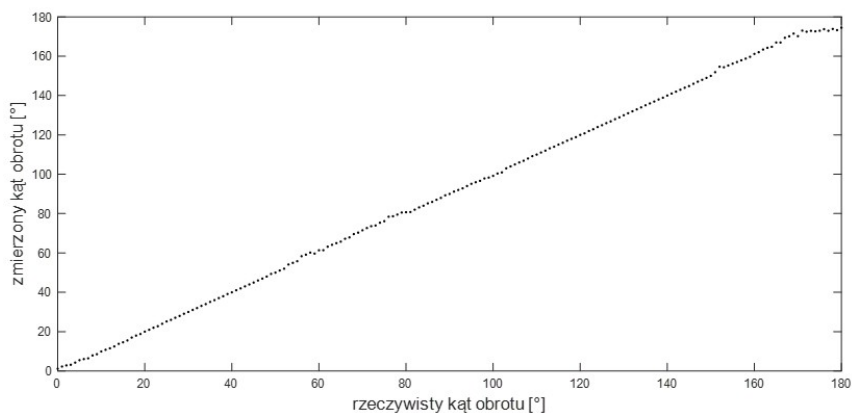
Rys. 7.3. Wyniki pomiarów uzyskane dla siatki o $\Theta = 5^\circ$ i falek dmey, vaid i coif5



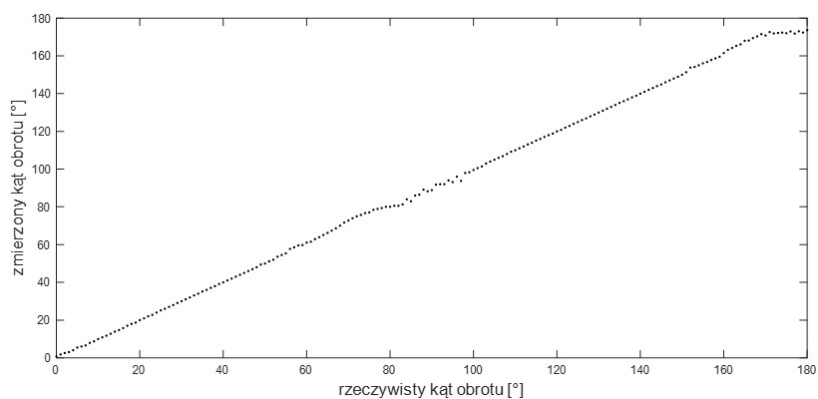
Rys. 7.4. Wyniki pomiarów uzyskane dla siatki o $\Theta = 5^\circ$ i falek dmey, void, coif5 i han4.5



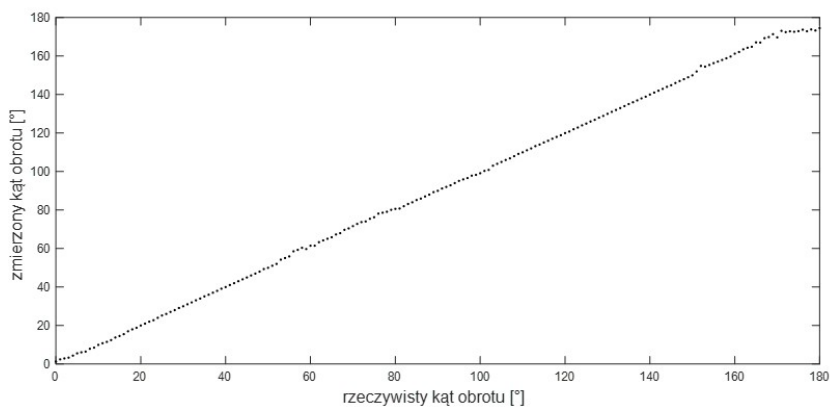
Rys. 7.5. Wyniki pomiarów uzyskane dla siatki o $\Theta = 5^\circ$ i falek dmey, void, coif5, han4.5 oraz bior1.5



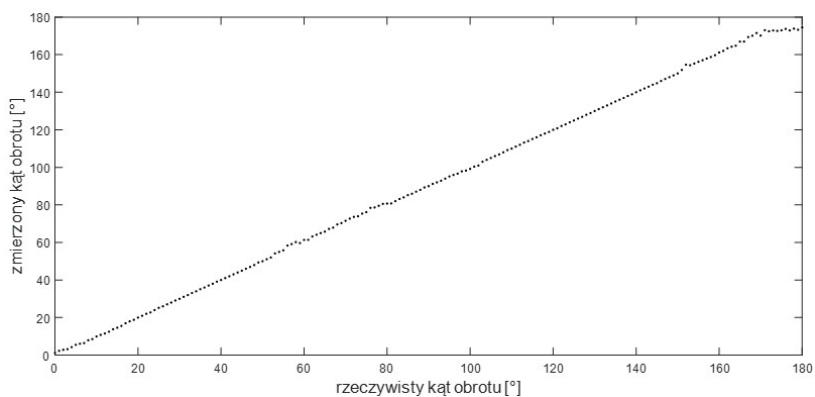
Rys. 7.6. Wyniki pomiarów uzyskane dla siatki o $\Theta = 5^\circ$ i falek dmey, void, coif5, han4.5, bior1.5 oraz mb4.2



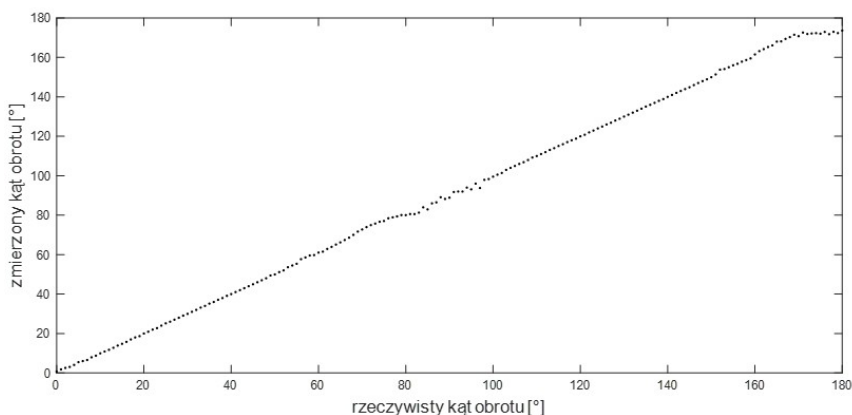
Rys. 7.7. Wyniki pomiarów uzyskane dla siatki o $\Theta = 5^\circ$ i falek dmey, vaid, coif5, han4.5, bior1.5, mb4.2 oraz bl7



Rys. 7.8. Wyniki pomiarów uzyskane dla siatki o $\Theta = 5^\circ$ i falek dmey, vaid, coif5, han4.5, bior1.5, mb4.2, bl7 oraz db20



Rys. 7.9. Wyniki pomiarów uzyskane dla siatki o $\Theta = 5^\circ$ i falek dmey, vaid, coif5, han4.5, bior1.5, mb4.2, bl7, db20 oraz fk22

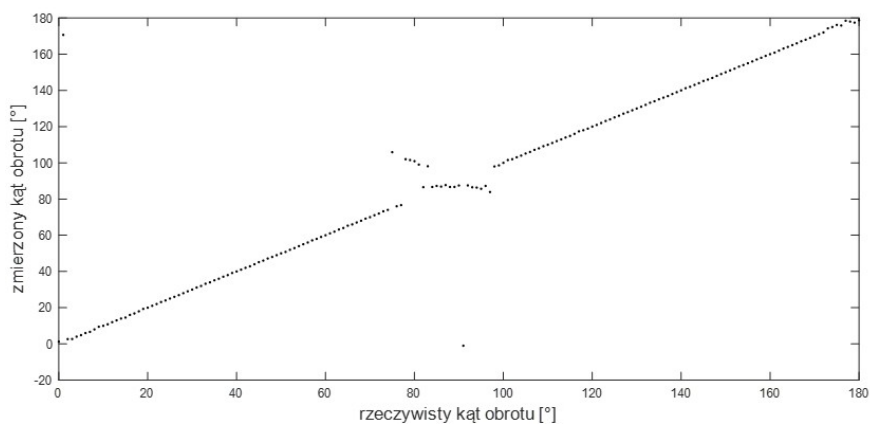


Rys. 7.10. Wyniki pomiarów uzyskane dla siatki o $\Theta = 5^\circ$ i falek dmey, void, coif5, han4.5, bior1.5, mb4.2, bl7, db20, fk22, coif4, db43, db44, db24, db34, db40, db41 i db42

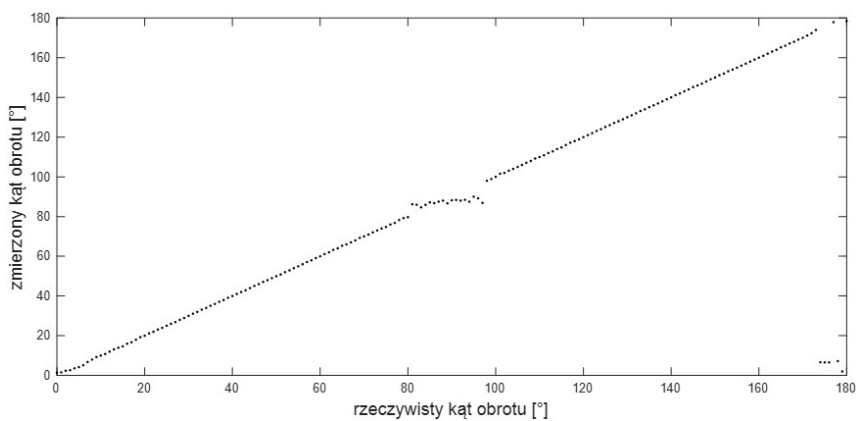
Analiza wyników zaprezentowanych na rysunkach 7.1–7.10 wykazała, że dopiero po zastosowaniu co najmniej sześciu różnych falek przestają się pojawiać błędy wyników pomiarów większe niż 6° . Dla mniejszej liczby zastosowanych falek błędy pomiaru przekraczały wartość 150° , osiągając najwyższe wartości w górnej i środkowej części zakresu pomiarowego. Wskazuje to na fakt, że zwiększenie liczby użytych falek zmniejsza błędy pomiaru. Należy jednak zdawać sobie sprawę, że liczba falek, przy której nie wystąpią błędy większe niż 6° , będzie również zależała od zestawu wykorzystanych falek (rys. 6.24).

Analogiczną analizę przeprowadzono dla pomiarów wykonywanych siatką o $\Theta = 7^\circ$. Wyniki pomiarów przedstawiono na rysunkach 7.11–7.16. W tym przypadku błędy pomiaru większe niż 4° przestały się pojawiać przy zastosowaniu trzech falek. Pozwala to na stwierdzenie, że stosowanie TFBG o $\Theta = 7^\circ$ jest korzystniejsze od stosowania TFBG o $\Theta = 5^\circ$, gdyż redukuje złożoność obliczeniową metody.

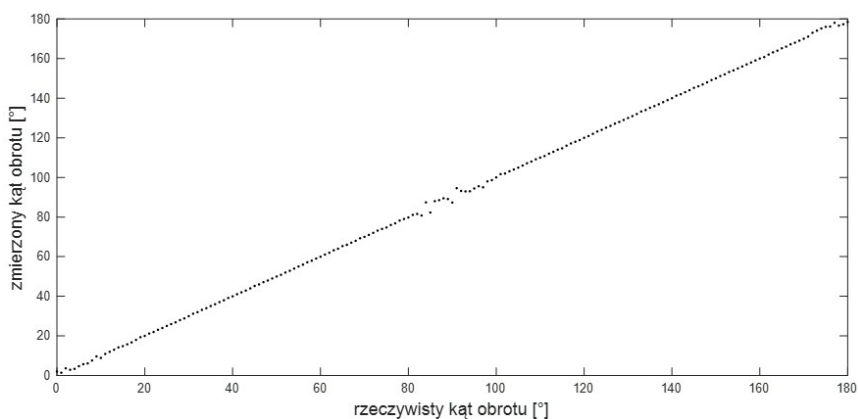
W celu zbadania dokładności pomiaru zaproponowanej metody obliczono błędy dla pomiarów wykonywanych siatkami TFBG o $\Theta = 5^\circ$ i siatkami o $\Theta = 7^\circ$. Błędy pomiarowe uzyskane dla badanych siatek oraz różnych zestawów użytych falek uwidoczniono na rysunkach 7.17–7.25. Ich analiza wykazuje, że błędy pomiarowe siatki o $\Theta = 5^\circ$ są większe w porównaniu z siatką $\Theta = 7^\circ$, nawet pomimo zastosowania większej liczby falek do przetwarzania wyniku pomiaru. W przypadku siatki o $\Theta = 7^\circ$ stosowanie większej liczby falek niż 3 nie powoduje spadku poziomu błędów pomiarowych.



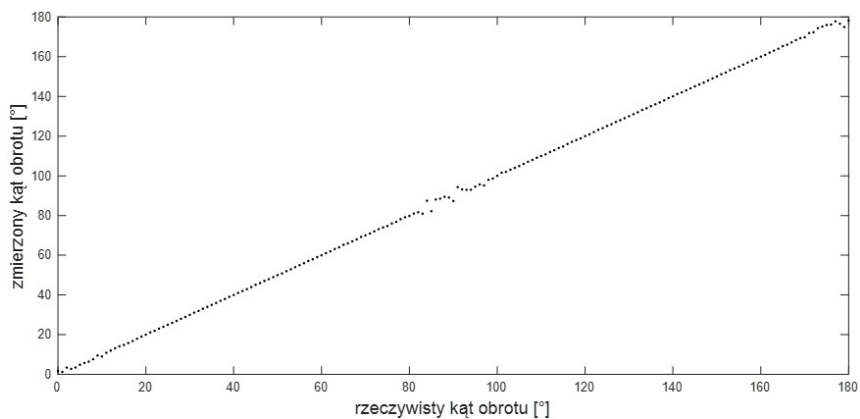
Rys. 7.11. Wyniki pomiarów uzyskane dla siatki o $\Theta = 7^\circ$ i falki dmey



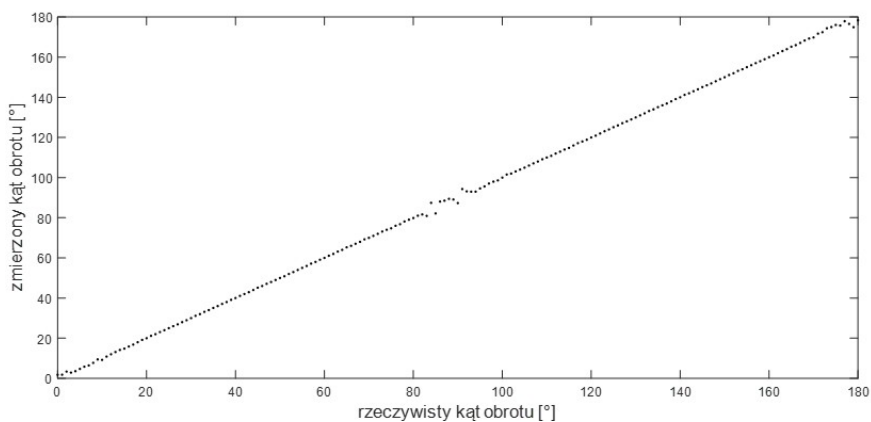
Rys. 7.12. Wyniki pomiarów uzyskane dla siatki o $\Theta = 7^\circ$ i falek dmey i vaid



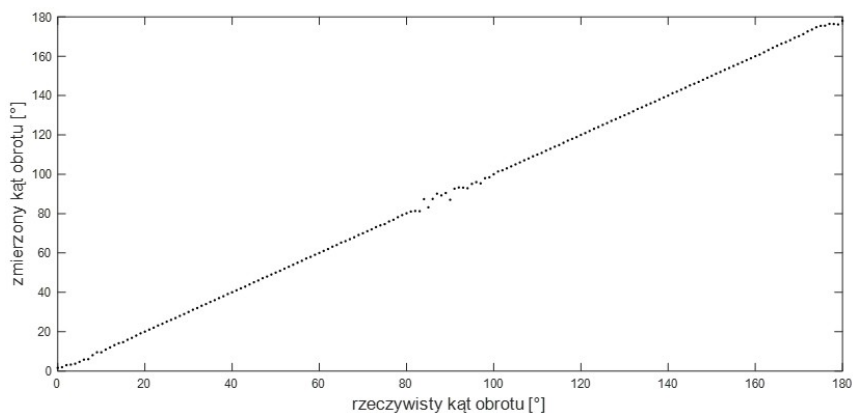
Rys. 7.13. Wyniki pomiarów uzyskane dla siatki o $\Theta = 7^\circ$ i falek dmey, vaid i coif5



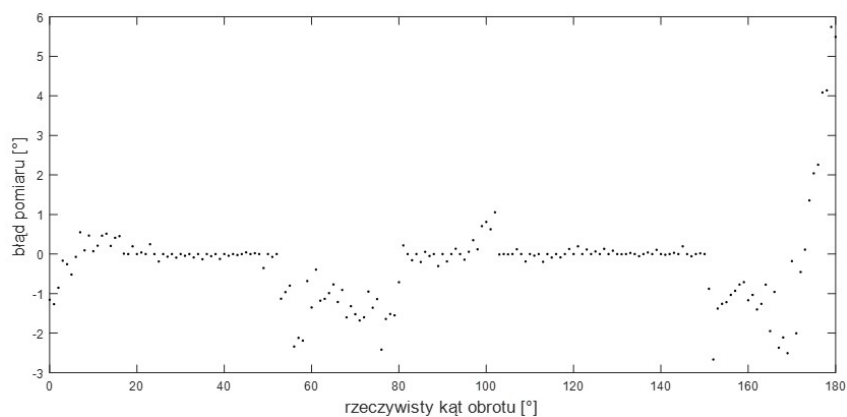
Rys. 7.14. Wyniki pomiarów uzyskane dla siatki o $\Theta = 7^\circ$ i falek dmey, vaid, coif5 i han4.5



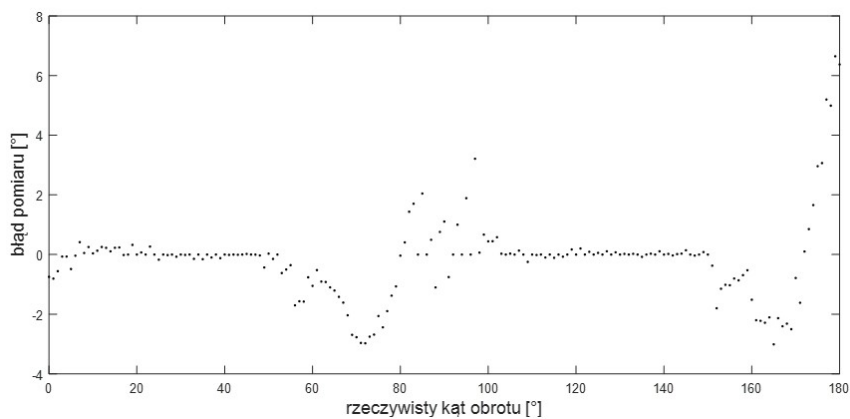
Rys. 7.15. Wyniki pomiarów uzyskane dla siatki o $\Theta = 7^\circ$ i falek dmey, vaid, coif5, han4.5 oraz bior1.5



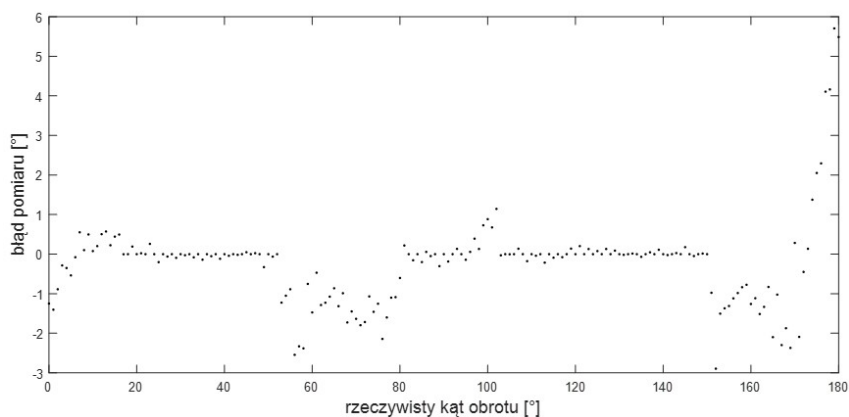
Rys. 7.16. Wyniki pomiarów uzyskane dla siatki o $\Theta = 7^\circ$ i falek dmey, vaid, coif5, han4.5, bior1.5, mb4.2, bl7, db20, fk22, coif4, db43, db44, db24, db34, db40, db41 i db42



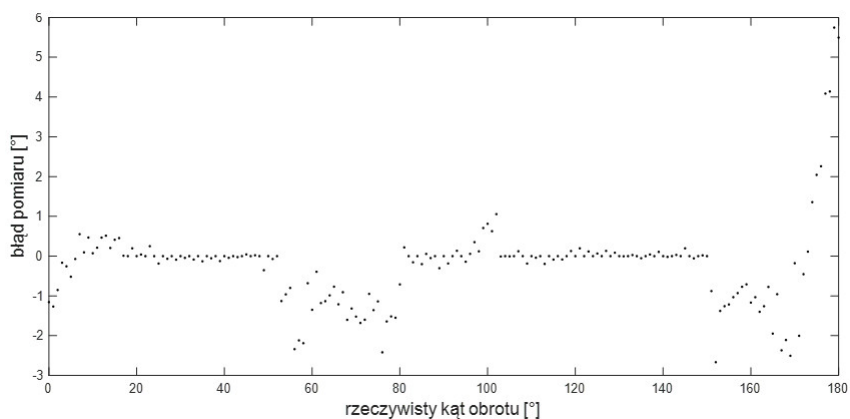
Rys. 7.17. Błędy pomiarów dla siatki o $\Theta = 5^\circ$ i falek dmey, vaid, coif5, han4.5, bior1.5 oraz mb4.2



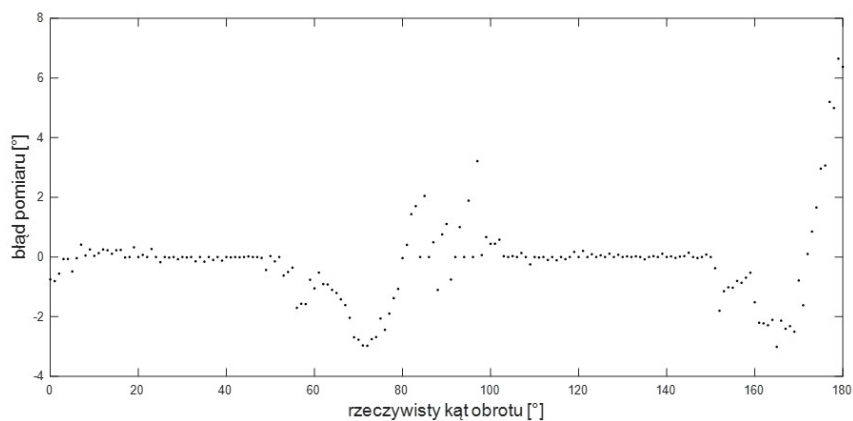
Rys. 7.18. Błędy pomiarów dla siatki o $\Theta = 5^\circ$ i falek dmey, vaid, coif5, han4.5, bior1.5, mb4.2 oraz bl7



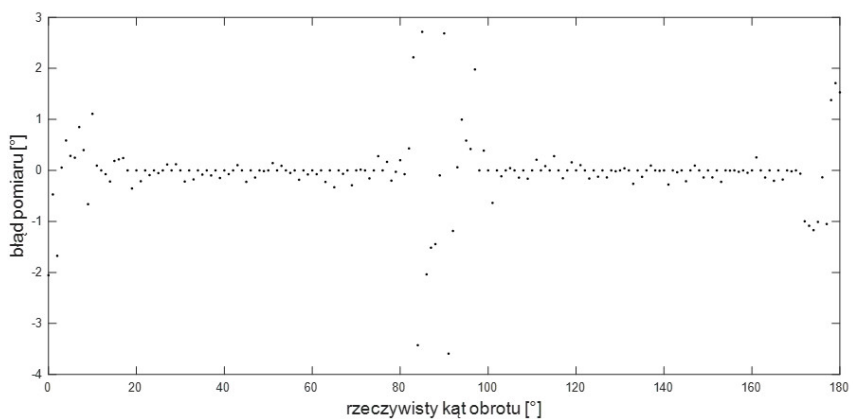
Rys. 7.19. Błędy pomiarów dla siatki o $\Theta = 5^\circ$ i falek dmey, vaid, coif5, han4.5, bior1.5, mb4.2, bl7 oraz db20



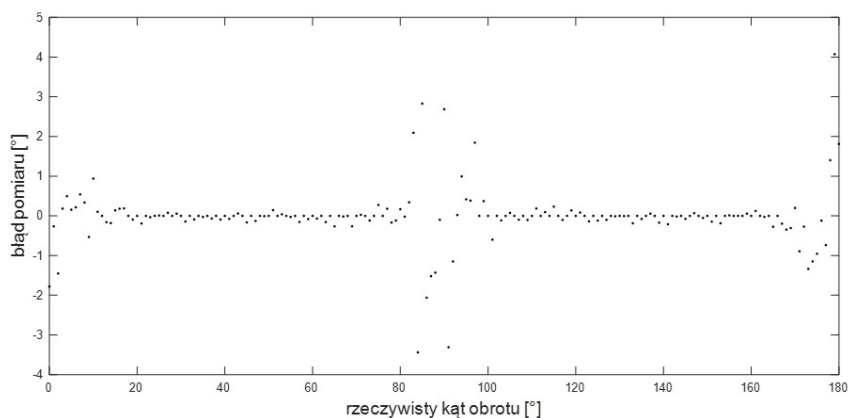
Rys. 7.20. Błędy pomiarów dla siatki o $\Theta = 5^\circ$ i falek dmey, vaid, coif5, han4.5, bior1.5, mb4.2, bl7, db20 oraz fk22



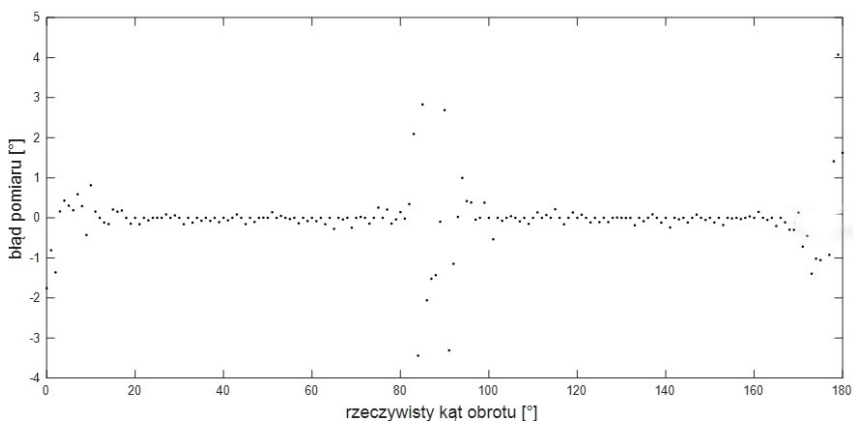
Rys. 7.21. Błędy pomiarów dla siatki o $\Theta = 5^\circ$ i falek dmey, vaid, coif5, han4.5, bior1.5, mb4.2, bl7, db20, fk22, coif4, db43, db44, db24, db34, db40, db41 i db42



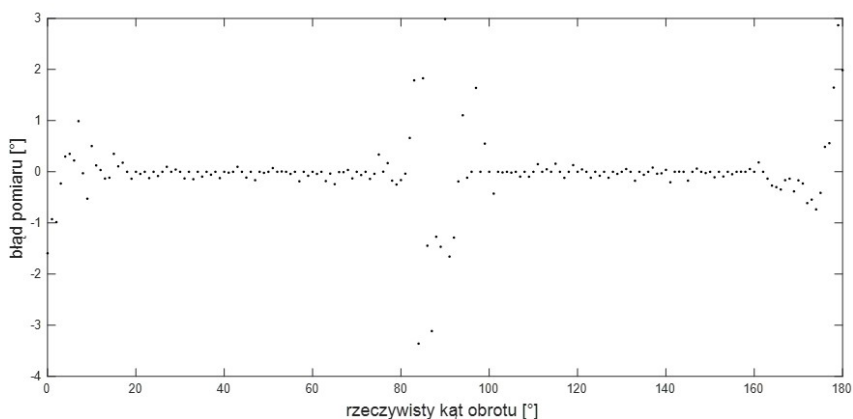
Rys. 7.22. Błędy pomiarów dla siatki o $\Theta = 7^\circ$ i falek dmey, vaid i coif5



Rys. 7.23. Błędy pomiarów dla siatki o $\Theta = 7^\circ$ i falek dmey, void, coif5 i han4.5



Rys. 7.24. Błędy pomiarów dla siatki o $\Theta = 7^\circ$ i falek dmey, void, coif5, han4.5 oraz bior1.5



Rys. 7.25. Błędy pomiarów dla siatki o $\Theta = 7^\circ$ i falek dmey, void, coif5, han4.5, bior1.5, mb4.2, bl7, db20, fk22, coif4, db43, db44, db24, db34, db40, db41 i db42

7.2. Analiza wpływu akceptowanego poziomu zakłóceń na błąd pomiaru

W rozdziale 6.3 omówiono zakłócenia (zaszumienia) występujące w funkcjach $F(\psi, n)$. Zaszumienie przedstawiono w postaci miary MSE . Stwierdzono, że dla funkcji $F(\psi, n)$, przeskalowanej tak, by jej wartości zawierały się w przedziale $[0,1]$, możliwe jest uzyskanie MSE mniejszego niż $1 \cdot 10^{-5}$ [°²]. Im niższy poziom zaszumienia funkcji, tym bardziej wiarygodne wyniki można za jej pomocą uzyskać. W rozdziale 6.4 przyjęto, że funkcje $F(\psi, n)$, dla których uzyskano wartości $MSE < 10^{-5}$ [°²], mogą być użyte do określenia kąta obrotu płaszczyzny polaryzacji światła, ze względu na niski poziom zaszumienia. Jak wykazano (tabela 6.5) wartość MSE mniejsza niż $1 \cdot 10^{-5}$ [°²] jest możliwa do uzyskania dla niewielkiej liczby najmniej zaszumionych funkcji $F(\psi, n)$. Pozwala to postawić pytanie badawcze, co się stanie w przypadku, gdy użyte zostaną funkcje bardziej zaszumione. Z jednej strony do określania wyniku zostaną użyte dane o większym zaszumieniu. Z drugiej strony otrzymamy więcej wartości, które zostaną uśrednione, co może wpłynąć na poprawę precyzji pomiaru. Ze względu na przedstawione wątpliwości przeprowadzono badanie wpływu akceptowanego poziomu zaszumienia funkcji $F(\psi, n)$ na precyzję pomiarów. Ponieważ siatka o $\Theta = 7^\circ$ pozwala na uzyskanie lepszych wyników pomiaru przy niższej złożoności obliczeniowej, użyto jej do przeprowadzenia niniejszego badania. Wyniki obliczane były z użyciem zestawu falek zawierającego falki: dmey, vaid, coif5, han4.5 oraz bior1.5. W procesie obliczania wartości błędu MSE zastosowano aproksymację wielomianem stopnia 7.

Błąd pomiaru MSE_{pom} przedstawiono jako wartość błędu średniokwadratowego z serii pomiarów wykonywanych dla $\alpha \in [0^\circ, 180^\circ]$ z rozdzielczością wynoszącą 1 stopień. Wyliczono go według zależności:

$$MSE_{pom} = \frac{\sum_{i=1}^N (\alpha - \alpha_w)^2}{N}, \quad (7.1)$$

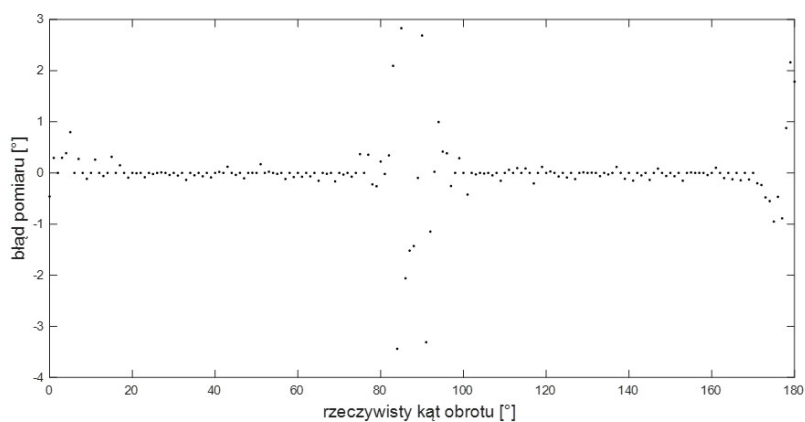
gdzie: N jest liczbą pomiarów, α oznacza rzeczywisty kąt obrotu płaszczyzny polaryzacji światła, α_w oznacza zmierzony kąt obrotu.

Badanie przeprowadzono, powtarzając obliczenie zmierzonych kątów obrotu płaszczyzny polaryzacji światła dla pomiarów wykonanych dla kątów $\alpha \in [0^\circ, 180^\circ]$. W każdej z serii obliczeń zaakceptowano użycie funkcji $F(\psi, n)$ o różnym stopniu zaszumienia MSE . Błędy pomiarów przedstawiono w tabeli 7.1.

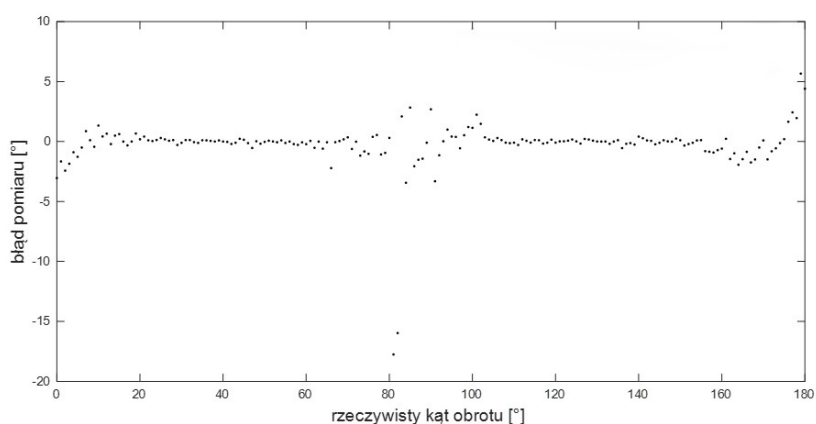
Na rysunkach 7.26–7.28 przedstawiono wykresy prezentujące błędy pomiarowe dla wybranych serii obliczeń.

Tabela 7.1. Wpływ akceptowalnego poziomu zakłóceń na precyzję pomiarów

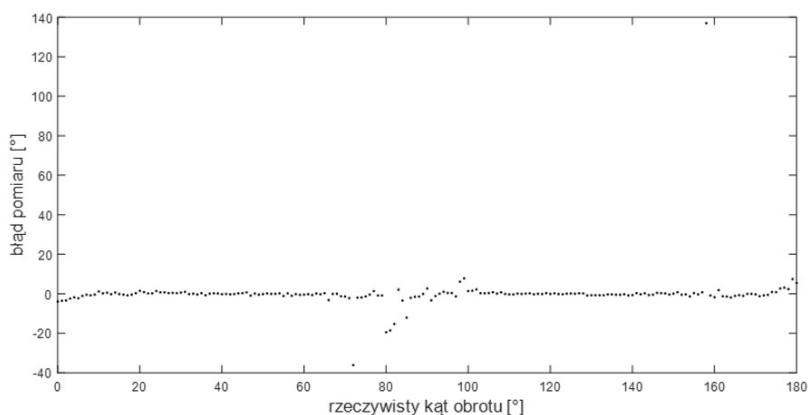
Akceptowany poziom zakłóceń (MSE)	MSE_{pom}
$1 \cdot 10^{-5}$	0,37
$5 \cdot 10^{-5}$	0,49
$1 \cdot 10^{-4}$	3,16
$5 \cdot 10^{-4}$	4,21
$1 \cdot 10^{-3}$	4,21
$5 \cdot 10^{-3}$	119,17



Rys. 7.26. Błędy pomiarów dla $MSE = 1 \cdot 10^{-5}$

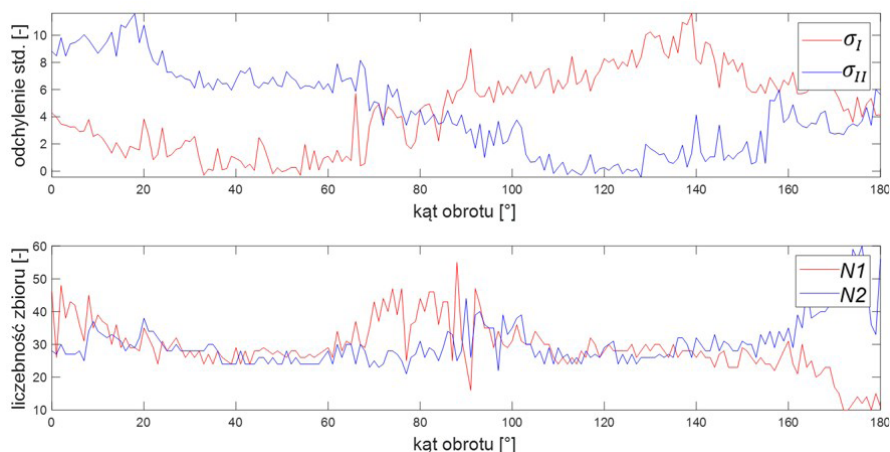


Rys. 7.27. Błędy pomiarów dla $MSE = 5 \cdot 10^{-4}$



Rys. 7.28. Błędy pomiarów dla $MSE = 5 \cdot 10^{-3}$

Uzyskane wyniki wykazały, że akceptowalny poziom błędu MSE nie powinien być większy niż $5 \cdot 10^{-5}$ [°]. W przypadku używania bardziej zaszumionych funkcji $F(\psi, n)$ zaczynają się pojawiać znaczące błędy wyniku pomiaru. Dotyczą one przede wszystkim pomiarów wykonywanych dla kątów obrotu zbliżonych do 90° . Znaczące zwiększenie akceptowanej wartości MSE utrudnia rozpoznanie zbioru (K_I czy K_{II}), który ma zostać użyty do obliczenia wyniku. Na rysunku 7.29 przedstawiono wykresy liczebności oraz odchylenia standardowego zbiorów K_I i K_{II} dla badania wykonanego przy $MSE = 5 \cdot 10^{-3}$ [°]. Widać na nim, że błędne rozpoznanie kąta obrotu o 158° zostało spowodowane zbyt dużą wartością odchylenia standardowego dla tego kąta obrotu w zbiorze K_{II} .



Rys. 7.29. Liczebności oraz odchylenie standardowe zbiorów K_I i K_{II} dla $MSE = 5 \cdot 10^{-3}$ [°]

7.3. Analiza wpływu stopnia regresji zastosowanego wielomianu na dokładność pomiaru

Zaszumienie funkcji $F(\psi, n)$ oceniane jest poprzez obliczenie różnic pomiędzy badaną funkcją a jej aproksymacją wykonaną wielomianem. W prezentowanych w niniejszej monografii badaniach używano wielomianu stopnia siódmego do aproksymowania funkcji.

W tym rozdziale podjęto się oceny, czy zmiana rzędu wielomianu ma wpływ na działanie opracowanej metody. Badanie to jest istotne ze względu na fakt, że aproksymacja wielomianem niższego stopnia jest mniej złożona obliczeniowo i mogłaby pozwolić na szybsze wykonywanie kalibracji układu pomiarowego. Aproksymacja wielomianem stopnia wyższego pozwala dokładniej odwzorować przebieg funkcji. Odbywa się to jednak kosztem większej złożoności obliczeniowej. Zbyt wysoki stopień wielomianu również nie będzie korzystny, gdyż spowoduje aproksymację szumu funkcją $R(\psi, n)$. W efekcie niskie wartości MSE będą uzyskiwane również dla funkcji zaszumionych. Obniży to więc skuteczność metody oceny zaszumienia funkcji $F(\psi, n)$.

Podczas wykonywania badania uwzględniono uzyskane wcześniej wyniki. Badania prowadzono, używając zestawu falek: dmey, vaid, coif5, han4.5 oraz bior1.5. Wartość MSE ustawiono na $5 \cdot 10^{-5}$ [°²].

Błąd pomiaru MSE_{pom} wyliczono według równania 7.1. Stanowi on średnią wartość błędu średniokwadratowego z serii pomiarów wykonywanych dla $\alpha \in [0^\circ, 180^\circ]$ z rozdzielczością 1 stopnia obrotu. Wyniki badania przedstawiono w tabeli 7.2.

Tabela 7.2. Wpływ poziomu regresji na precyzję pomiarów

Stopień regresji	MSE_{pom}
5	Algorytm nie działa
6	0,29
7	0,49
8	0,32
9	0,32
10	0,32
12	0,32

Przeprowadzone badanie wykazało, że stopień używanego wielomianu nie ma istotnego wpływu na precyzję pomiaru. Nie można jednak stosować wielomianów stopnia niższego niż szósty, bowiem nie są w stanie odpowiednio

precyzyjnie odwzorować funkcji $F(\psi, n)$, a co za tym idzie nie jest możliwe ocenienie wartości jej zaszumienia za pomocą zastosowanej metody.

7.4. Analiza efektywności obliczeniowej

Podczas doboru falek można nie tylko uwzględnić dokładność, ale również faworyzować falki wymagające mniej kosztownych obliczeń w celu zoptymalizowania czasowego działania metody.

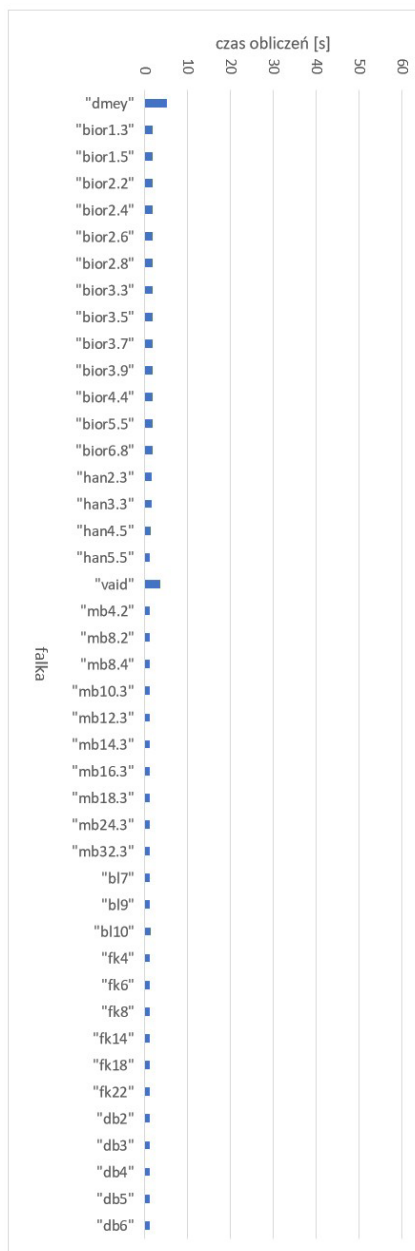
Przeprowadzono badanie polegające na zmierzeniu czasu obliczenia transformaty falkowej z jednej serii pomiarów (181 widm dla kątów obrotu w zakresie $0-180^\circ$). Z każdego widma pobrano 4096 próbek, z których następnie obliczono transformatę falkową za pomocą wybranej falki na 9 poziomach dekompozycji. Dla każdej z falek powtórzono obliczenia dziesięciokrotnie, a wynik uśredniono. W badaniu wykorzystano implementację dostępną w oprogramowaniu Matlab w wersji 2023b. Obliczenia wykonane zostały na komputerze PC z procesorem Intel i5-1345U. Wykres czasów obliczeń dla badanych falek przedstawiono na rysunkach 1 i 2. Z prezentowanego zestawienia usunięto falki, które nie pozwoliły na uzyskanie $MSE < 10^{-5}$ [°2].

Przedstawione na rysunkach 7.30 i 7.31 zestawienie pokazuje wysoką czasochłonność obliczeń prowadzonych z użyciem falek Daubechiesa wysokiego rzędu. Następnie podjęto próbę ocenienia efektywności poszczególnych falek w zastosowaniu pomiaru kąta obrotu płaszczyzny polaryzacji światła. Aby falka była przydatna w obliczeniach i zapewniała wysoką precyzję pomiaru, musi pozwalać na osiągnięcie dokładności MSE niemniejszej niż 10^{-5} [°2] na wybranych poziomach dekompozycji. Ze względu na to, że każdy z poziomów dekompozycji, na którym osiągnięto $MSE < 10^{-5}$ [°2], daje wartość użyteczną w obliczeniach, przyjęto, że z punktu widzenia efektywności zasadnym będzie podzielenie liczby poziomów dekompozycji użytecznych w obliczeniu kąta obrotu przez czas obliczeń uzyskany dla każdej z falek. Na tej podstawie obliczono użyteczność poszczególnych falek zdefiniowaną wzorem 7.2:

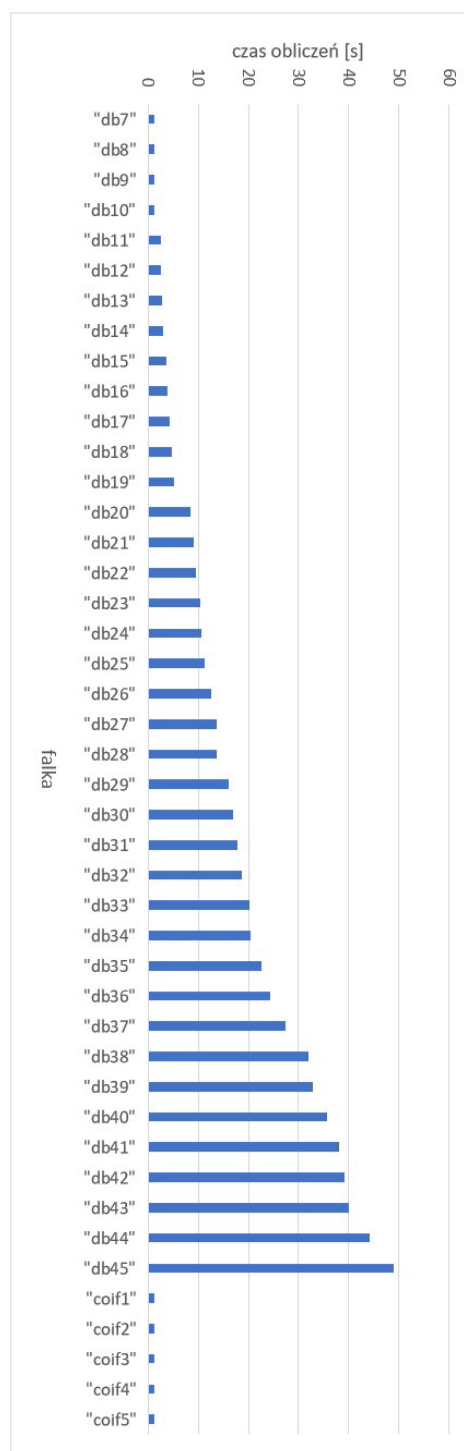
$$E = \frac{DL}{t}, \quad (7.2)$$

gdzie: DL jest liczbą poziomów dekompozycji ocenianej falki o $MSE < 10^{-5}$ [°2], t jest czasem obliczeń.

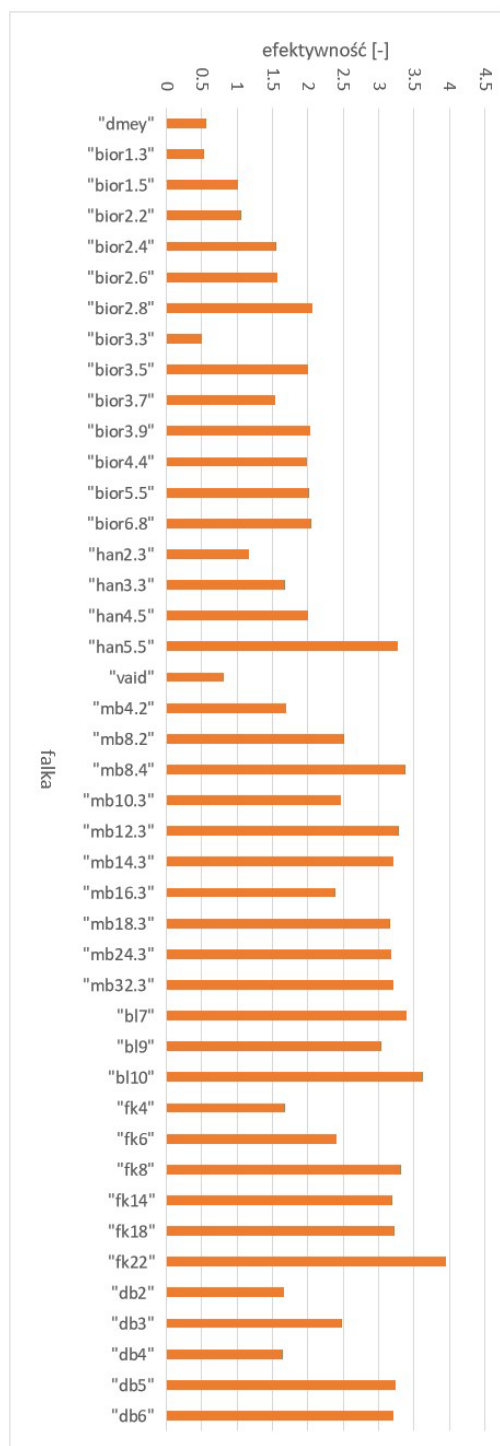
Na rysunkach 7.32 oraz 7.33 przedstawiono wykres efektywności poszczególnych falek. Najwyższą efektywność uzyskano dla falek, które charakteryzują się niskim czasem obliczeń oraz pozwalają na uzyskanie niskiej wartości *MSE* na wielu poziomach dekompozycji.



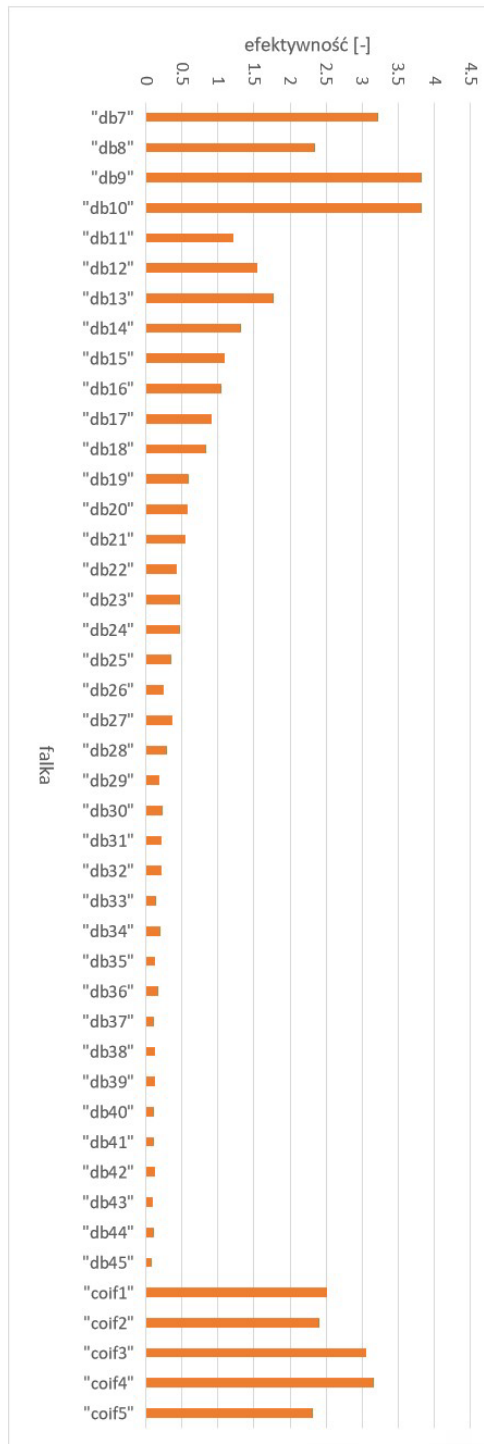
Rys. 7.30. Czasy obliczeń dla badanych falek – część 1



Rys. 7.31. Czasy obliczeń dla badanych falek – część 2



Rys. 7.32. Efektywność badanych falek – część 1



Rys. 7.33. Efektywność badanych falek – część 2

8. Wnioski

Niniejsza monografia dotyczy zagadnień związanych z pomiarem kąta obrotu płaszczyzny polaryzacji światła propagującego we włóknie światłowodowym.

W monografii przedstawiono aktualny stan wiedzy z zakresu badania kąta obrotu płaszczyzny polaryzacji światła przy pomocy technik światłowodowych. Dokonano krytycznej analizy rozwiązań opisanych w literaturze i wskazano ich ograniczenia.

Zaprezentowano istniejące w Laboratorium Optoelektroniki i Techniki Laserowej stanowisko przeznaczone do wytwarzania siatek Bragga, które zostało użyte do wykonania siatek wykorzystywanych na potrzeby niniejszego opracowania. Omówiono również proces wytwarzania siatek Bragga i zaprezentowano charakterystyki widmowe wytworzonych siatek TFBG.

Wytworzone siatki użyto do zbudowania układu pomiarowego przeznaczonego do badania kąta obrotu płaszczyzny polaryzacji światła. Budowa układu została zoptymalizowana pod kątem minimalizacji zakłóceń wprowadzanych przez elementy układu poprzez jednoczesny pomiar widma światła wprowadzanego do siatki TFBG, jak i widma światła propagującego przez tę siatkę. Układ ten wykorzystano do wykonania pomiarów kąta obrotu płaszczyzny polaryzacji światła. Zarejestrowano widma światła. Zapisane widma światła zostały użyte do obliczenia mierzonego kąta obrotu płaszczyzny polaryzacji światła.

Przybliżono pojęcie transformaty falkowej i zbadano jej właściwości pod kątem identyfikacji tych, które mogą okazać się przydatne w procesie wyznaczania kąta obrotu płaszczyzny polaryzacji światła. Dokonano również analizy przydatności poszczególnych falek pod kątem możliwości ich zastosowania w przedmiotowym badaniu. Na podstawie przeprowadzonych analiz wytypowano charakterystyki do zastosowania w obliczeniach oraz opracowano metodę ich automatycznego doboru. Na tej podstawie opracowano metodę obliczania kąta obrotu płaszczyzny polaryzacji światła.

W wyniku przeprowadzonych badań wyciągnięto następujące wnioski i spostrzeżenia:

- podczas zmiany kąta obrotu płaszczyzny polaryzacji światła zachodzi zjawisko przekazywania energii pomiędzy współczynnikami transformaty falkowej wykonywanej przy użyciu falki Haara,
- suma wartości wszystkich współczynników danego poziomu transformaty zawiera zniekształcenia, które przyjmują najniższe wartości dla poziomów od siódmego wzwyż,
- nie wszystkie falki pozwalają na uzyskanie funkcji o równie niskim poziomie zniekształceń,
- w przypadku badanych falek najniższy poziom zakłóceń występuje na poziomach 6–8 dekompozycji falkowej.

Zbadano opracowaną metodę poprzez weryfikację jej działania na siatkach o kątach pochylenia struktur dyfrakcyjnych równych 5° i 7° oraz przedyskutowano różnice uzyskanych wyników. Finalnie zbadano wpływ zmian kluczowych parametrów metody na uzyskiwane wyniki i określono błąd pomiarowy zaproponowanej metody. Tym samym udowodniono, że pomiar kąta obrotu płaszczyzny polaryzacji światła jest możliwy przy zastosowaniu skośnej siatki Bragga i przeprowadzeniu analizy uzyskanych widm światła za pomocą transformaty falkowej.

Najważniejszymi osiągnięciami są:

- opracowanie metody pomiaru kąta obrotu płaszczyzny polaryzacji światła wykorzystującej skośną siatkę Bragga (TFBG), bazującą na przekształceniu falkowym,
- zbadanie właściwości opracowanej metody,
- wykazanie możliwości zastosowania DWT do analizy widm światła propagującego przez TFBG w celu obliczenia kąta obrotu płaszczyzny polaryzacji światła w zakresie $0\text{--}180^\circ$ kąta obrotu,
- opracowanie metody automatycznego doboru falek oraz poziomów ich dekompozycji gwarantujących uzyskanie najlepszej dokładności pomiaru,

- opracowanie metody kalibracji układu pomiarowego, pozwalającej na uzyskiwanie powtarzalnych pomiarów pomimo zastosowania elementów układu pomiarowego różniących się parametrami (np. kątem pochylenia struktur dyfrakcyjnych),
- zbadanie przydatności wybranych falek do pośredniego pomiaru kąta obrotu płaszczyzny polaryzacji światła.

Planowany jest dalszy rozwój metody poprzez zautomatyzowanie wykonywania pomiarów. W trakcie dotychczasowych badań nie było to możliwe ze względu na to, że posiadany sprzęt laboratoryjny nie daje takiej możliwości.

Bibliografia

- [1] Chung Y. C., „Fiber-optic Communications – Historical Perspectives and Future Directions,” *Korean Journal of Optics and Photonics* 29(5), s. 187–203, 2018.
- [2] Wang Y., Li B., Liu P. i Hao F., „Fiber-optic communication method applied to high-temperature environment,” *Semiconductor Lasers and Applications XI* 11891, s. 1189104, 2021.
- [3] Skorupski K., Harasim D., Panas P., Cięższyk S., Kisała P., Kacejko P., Mrocza J. i Wydra M., „Overhead Transmission Line Sag Estimation Using the Simple Opto-Mechanical System with Fiber Bragg Gratings – Part 2: Interrogation System,” *Sensors* 9(20), s. 1–21, 2020.
- [4] Torbus S. A., „Zastosowanie światłowodów telekomunikacyjnych G.652, G.653 i G.655 w polarymetrycznych czujnikach natężenia prądu,” *Pomiary Automatyka Kontrola* 57(5), s. 441–446, 2011.
- [5] Rovera A., Tancau A., Boetti N., Dalla Vedova M. D. L., Maggiore P. i Janner D., „Fiber Optic Sensors for Harsh and High Radiation Environments in Aerospace Applications,” *Sensors* 23(5), s. 2512, 2023.
- [6] SEDI-ATI, „Extreme Environment,” <https://www.sedi-ati.com/optical-fiber-solution-extreme-environment/> [dostęp: 10.02.2024].
- [7] He X., He Z., Ran Z., Cui J., Wang N., Gong J., Guo J., Xiao Y., Sun D., Zhu J., Li Z., Yu Y., Sun Z. i Rao Y., „Temperature-insensitive Quasi-distributed Fiber-optic Fabry-Perot High-pressure sensing based on microwave interference system,” *Optics and Laser Technology*, s. 109069, 2023.
- [8] Pickrell G., Udd E. i Du H., „Applications for fiber optic sensing in the upstream oil and gas industry,” *Fiber Optic Sensors and Applications XII* 9480, s. 94800D, 2015.
- [9] Baldwin C. S., „Brief history of fiber optic sensing in the oil field industry,” *SPIE Fiber Optic Sensors and Applications XI* 9098, 2014.

- [10] Xu P., Ba D., He W., Hu H. i Dong Y., „Distributed Brillouin optical fiber temperature and strain sensing at a high temperature up to 1000 °C by using an annealed gold-coated fiber,” *Optics Express* 26(23), s. 29724–29734, 2018.
- [11] Xu P., Dong Y., Zhou D., Fu C., Zhang J., Zhang H., Lu Z., Chen L. i X. Bao X., „1200°C high-temperature distributed optical fiber sensing using Brillouin optical time domain analysis,” *Applied Optics* 55(21), s. 5471–5478, 2016.
- [12] Ignacio V., Ruiz Zamarreno C., Ozcariz A. i Matias I. R., „Fiber Optic Gas Sensors Based on Lossy Mode Resonances and Sensing Materials Used Therefor: A Comprehensive Review,” *Sensors*, s. 731, 2021.
- [13] Pospisilova M., Kuncova G. i Troegl J., „Fiber-Optic Chemical Sensors and Fiber-Optic Bio-Sensors,” *Sensors* 15(10), s. 25208–25259, 2015.
- [14] Rani Z., He X., Rao Y., Sun D., Qin X., Zeng D., Chu W., Li X. i Wei Y., „Fiber-Optic Microstructure Sensors: A Review,” *Photonic Sensors* 11(2), s. 227–261, 2021.
- [15] Zhu C., Zhuang Y., Liu B. i Huang J., „Review of Fiber Optic Displacement Sensors,” *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 71, s. 7008212, 2022.
- [16] Floris I., Adam J. M., Calderon P. A. i Sales S., „Fiber Optic Shape Sensors: A comprehensive review,” *Optics and Lasers in Engineering* 139, s. 106508, 2021.
- [17] Zhao Y., Liu Y., Han B., Wang M., Wang Q. i Zhang Y.-N., „Fiber optic volatile organic compound gas sensors: A review,” *Coordination Chemistry Reviews* 493, s. 215297, 2023.
- [18] Alemohammad H., Azhari A. i Liang R., „Fiber Optic Sensors for Harsh Environment Sensing: Case Studies on Environmental Sensing,” *Fiber Optic Sensors and Applications XV* 10654, s. UNSP 106540M, 2018.
- [19] Zhu C., Zheng H., Ma L., Yao Z., Liu B., Huang J. i Rao Y., „Advances in Fiber-Optic Extrinsic FabryPerot Interferometric Physical and Mechanical Sensors: A Review,” *IEEE Sensors Journal* 23(7), s. 6406–6426, 2023.
- [20] Kisała P., Skorupski K., Cieszczyk S., Panas P. i Klimek J., „Rotation and Twist Measurement Using Tilted Fibre Bragg Gratings,” *Metrology and Measurement Systems* 25(3), s. 429–440, 2018.
- [21] Szczeniowski S., *Fizyka Doświadczalna. Część IV: Optyka*, Warszawa: PWN, 1983.
- [22] Yutaka S. i Yukio S. Japonia Patent JPS59100828A, 1982.
- [23] Peng X., Zhou Y., Li L., Xu Z., Zhou M. i Xinye X., „High precision measurement of light polarization using a Cs atomic magnetometer configuration,” *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics* 54(10), 105401, 2021.
- [24] Paschotta R., „Fiber Bragg Gratings,” <https://doi.org/10.61835/73v> [dostęp: 05.02.2024].
- [25] Skorupski K., *Analiza wpływu wybranych parametrów układu do zapisu światłowodowych struktur periodycznych na charakterystyki spektralne wytwarzanych siatek Bragga w oparciu o zdefiniowane wskaźniki jakościowe*, Kraków: Akademia Górniczo-Hutnicza, 2017.
- [26] Klimek J., *Badanie wpływu parametrów procesu wytwarzania periodycznych struktur światłowodowych na ich charakterystyki widmowe*, Kraków: Akademia Górniczo-Hutnicza, 2021.
- [27] FOSCO, „What is Fiber Grating?,” <https://www.fiberoptics4sale.com/blogs/archive-posts/95046406-what-is-fiber-bragg-grating> [dostęp: 05.02.2024].

- [28] Harasim D., Wieloparametrowe czujniki wykorzystujące światłowodowe skośne siatki Bragga, Kraków: Akademia Górniczo-Hutnicza, 2022.
- [29] Sahota J. K., Gupta N. i Dhawan D., „Fiber Bragg grating sensors for monitoring of physical parameters: a comprehensive review,” *Optical Engineering* 59(6), 2020.
- [30] Banasiak M., Realizacja stanowiska do nanoszenia światłowodowych siatek Bragga z przesunięciami fazowymi, Warszawa: Politechnika Warszawska, 2014.
- [31] Erdogan T., „Fiber Grating Spectra,” *Journal of Lightwave Technology*, 15(8), s. 1277–1294, 1997.
- [32] Arslan M. M. i Bayrak G., „Temperature Compensation of FBG Sensors via Sensor Packaging Approach,” *Journal of Science* 35(4), s. 1471–1482, 2022.
- [33] Hong L., Wang J., Cai J., Teng Y. i Qiu Z., „Substrate-type sensitized FBG temperature sensor,” *Sensor Review* 43(2), s. 83–91, 2023.
- [34] Alshaikhli Z. S., „A comparative study on polymer and metals coated TFBG temperature sensor: coating thickness impact,” *Applied Physics A-Materials Science & Processing* 130(2), 2024.
- [35] Cai Y., Yang Z., Zhang B. i Wei Y., „Research on wind turbine blade damage based on pre-stressed FBG strain sensors,” *Optoelectronic Letters* 20(2), s. 83–88, 2024.
- [36] Alshaikhli Z. S., Salim E. T., Hekmat W. A., Salman L. A. i Alhasan S. F. H., „Metal-coated CYTOP FBG: pressure sensing improvement,” *Journal of Optics – India*, 2024.
- [37] An J., Liu T. i Jin Y., „Fiber Optic Vibration Sensor Based on the Tilted Fiber Bragg Grating,” *Advances in Materials Science and Engineering*, s. 545013, 2013.
- [38] Resen D. A., Mohammed M. F. i Fakhri M. A., „Review of Recent Optical Bio-Sensor Based FBG,” *International Journal of Nanoelectronics and Materials* 15, s. 165–181, 2022.
- [39] Li J., Lu C., Zeng F., Zhang Y., Li S. i Sun W., „Range extension method for reflective-matched FBG interrogation based on CFBG sensor,” *Optical Fiber Technology*, s. 103210, 2023.
- [40] Interlab, „NORIA Światłowodowe siatki Bragga,” <https://www.interlab.pl/produkt/noria-swiatlowodowe-siatki-bragga.html>, [dostęp: 08.02.2024].
- [41] Chaoui F., Otman A., Alejos A. V., Naghar A., Falcone F. i El Yakhloufi M., „Theoretical approach to optimize fiber Bragg grating sensor performance using an automated new code,” *Optik* 140, s. 634–643, 2017.
- [42] Sun N.-H., Liau J.-J., Kiang Y.-W., Lin S.-C., Ro R., Chiang J.-S. i Chang H.-W., „Numerical analysis of apodized fiber Bragg gratings using coupled mode theory,” *Progress In Electromagnetics Research* 99, s. 289–306, 2009.
- [43] Khalid K., Zafrullah M., Bilal S. M. i Mirza M., „Simulation and analysis of Gaussian apodized fiber Bragg grating strain sensor,” *Journal of Optical Technology* 79(10), 667–673, 2012.
- [44] Bhatia V., „Applications of long-period gratings to single and multi-parameter sensing,” *Optics Express* 4(11), s. 457–466, 1999.
- [45] Zhang S., Deng S., Geng T., Sun C., Niu H., Li X., Wang Z., Li Z., Ma Y., Yang W., Tong C. i Yuan L., „A miniature ultra long period fiber grating for simultaneous measurement of axial strain and temperature,” *Optics & Laser Technology* 126, 2020.

- [46] AOS. GmbH, „Phase shifted FBG,” <https://www.aos-fiber.com/eng/FBG/Pshiften.html> [dostęp: 09.02.2024].
- [47] Kisała P. A., Światłowodowe struktury periodyczne o pochylonej modulacji współczynnika załamania: właściwości i zastosowania, Lublin: Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, 2019.
- [48] Dong X., Zhang H., Liu B. i Miao Y., „Tilted fiber Bragg gratings: Principle and sensing applications,” *Photonic Sensors*, s. 6–30, 2011.
- [49] Singh Y., Raghuwanshi S. K., Prakash O. i Saini K. P., „Design and development of tilted fiber Bragg grating (TFBG) chemical sensor with regression analysis of grating parameters for sensitivity optimization,” *Optical and Quantum Electronics* 53, s. 664, 2021.
- [50] Zhou W., Zhou Y. i Albert J., „A true fiber optic refractometer,” *Laser & Photonics Reviews*, 11(1), 2017.
- [51] Chen X., Zhou K., Zhang L. i Bennion I., „In-fiber twist sensor based on a fiber Bragg grating with 81° tilted structure,” *IEEE Photonics Technology Letters* 18(24), s. 2596–2598, 2006.
- [52] Caucheteur C., Guo T. i Albert J., „Review of plasmonic fiber optic biochemical sensors: improving the limit of detection,” *Analytical and Bioanalytical Chemistry* 407, s. 3883–3897, 2015.
- [53] Chen X., Du F., Tuan G., Lao J., Zhang X., Zhang Z., Liu F., Li J., Chen C. i Guan B.-O., „Liquid Crystal-Embedded Tilted Fiber Grating Electric Field Intensity Sensor,” *Journal of Lightwave Technology* 35(16), pp. 3347–3353, 2017.
- [54] Ming-jie Y., Bobo G., Quan-Fu A., Chengbin Y., Yong Liang G. i Ken-Tye Y., „Recent development of fiber-optic chemical sensors and biosensors: mechanisms, materials, micro/nano-fabrications and applications,” *Coordination Chemistry Reviews* 376, s. 348–392, 2018.
- [55] Shahoei H. i Yao J., „Slow and fast light effects in a tilted fiber Bragg grating and the application in a continuously tunable microwave photonic filter,” *2013 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest (MTT)*, s. 1–3, 2013.
- [56] Kowalczyk P. i Nowosielska K., „Analiza możliwości wykrywania uszkodzeń konstrukcji za pomocą technik światłowodowych,” *Prace Instytutu Lotnictwa* 201, s. 86–96, 2009.
- [57] Hill K. O., Fuji Y., Johnson D. C. i Kawasaki B. S., „Photosensitivity in optical fiber waveguides: Application to reflection filter fabrication,” *Applied Physics Letters* 32, s. 647–649, 1978.
- [58] Meltz G., Morey W. W. i Glenn W. H., „Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method,” *Optics Letters* 14(15), s. 823–825, 1989.
- [59] Meltz G. i Morey W. W., „Bragg grating formation and germanosilicate fiber photosensitivity,” *SPIE Proceedings* 1516, s. 185–199, 1991.
- [60] Kashyap R., Fiber Bragg Gratings, Toronto: Elsevier Academic Press, 2010.
- [61] Becker M., Bergmann J., Bruckner S., Franke M., Lindner E., Rothhardt M. W. i Bartelt H., „Fiber Bragg grating inscription combining DUV sub-picosecond laser pulses and two-beam interferometry,” *Optics Express* 16(23), s. 19169–19178, 2008.
- [62] Albert J., Shao L.-Y. i Caucheteur C., „Tilted fiber Bragg grating sensors,” *Laser & Photonics Reviews* 7(1), s. 83–108, 2012.

- [63] Harasim D. i Kusambayeva N., „The optical measurement method for structural twist monitoring with using tilted Bragg grating sensor,” *Przegląd Elektrotechniczny* 94(7), s. 62–65, 2018.
- [64] Reid D. C., Ragdale C. M., Bennion I., Buus J. i Stewart W. J., „Phase-shifted Moire grating fibre resonators,” *Electronics Letters* 26(1), s. 10–12, 1990.
- [65] Ribaut C., Loyez M., Larieu J.-C., Chevineau S., Lambert P., Rimmelink M., Wattiez R. i Caucheteur C., „Cancer biomarker sensing using packaged plasmonic opticalfiber gratings: Towards in vivo diagnosis,” *Biosensors and Bioelectronics* 92, pp. 449–456, 2017.
- [66] Kozieł G., Harasim D., Dziuba-Kozieł M. i Kisała P., „Fourier Transform Usaga to Analyse Data of Polarisation Plane Rotation Measurement with a TFBG Sensor,” *Metrology and Measurement Systems*, tom 31, nr 2, s. 159–171, 2024.
- [67] Białasiewicz J. T., Falki i aproksymacje, Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 2000.
- [68] Józefczyk I., „Dyskretna transformata falkowa dla wybranego modelu symulacyjnego sygnału wibroakustycznego,” *Diagnostyka* 34, s. 137–141, 2005.
- [69] „Wavelet Browser,” <https://wavelets.pybytes.com>, [dostęp: 12.12.2024].
- [70] Nahar S., Subhash C. J., Aggarwal A. K. i Bajpai R. P., „Fibre Bragg grating writing using phase mask technology,” *Journal of Scientific & Industrial Research* vol. 64, s. 108–115, 2005.