

Małgorzata DETKA, Zdzisław KACZMAREKPOLITECHNIKA ŚWIĘTOKRZYSKA, KATEDRA ELEKTROTECHNIKI I SYSTEMÓW POMIAROWYCH
Al. 1000-lecia Państwa Polskiego 7, 25-314 Kielce**Odtwarzanie rozkładu odkształcenia na podstawie widma światłowodowej siatki Bragga****Dr inż. Małgorzata DETKA**

Jest absolwentką Wydziału Elektrotechniki Automatyki i Informatyki specjalności Informatyka Politechniki Świętokrzyskiej. Stopień doktora na tym samym wydziale uzyskała w 2006 r. Pracuje jako adiunkt w Katedrze Elektrotechniki i Systemów Pomiarowych PŚk w Kielcach. Jej zainteresowania naukowe obejmują pomiary z użyciem światłowodowych czujników pomiarowych a zwłaszcza metody odtwarzania sygnałów. Jest autorem kilku artykułów o wymienionej tematyce.

e-mail: m.detka@tu.kielce.pl

**Prof. dr hab. inż. Zdzisław KACZMAREK**

Profesor zwyczajny w Katedrze Elektrotechniki i Systemów Pomiarowych na Wydziale Elektrotechniki Automatyki i Informatyki Politechniki Świętokrzyskiej. Jego tematyka naukowo-badawcza obejmuje sensorykę elektroniczną i światłowodową, wybrane zagadnienia miernictwa dynamicznego i odtwarzanie sygnałów pomiarowych. Opublikował z tego zakresu ponad 100 artykułów i referatów naukowych.

e-mail: z.kaczmarek@tu.kielce.pl

**Streszczenie**

W artykule przedstawiono syntezę parametrów światłowodowej siatki Bragga (FBG) oraz rekonstrukcję rozłożonego odkształcenia działającego na siatkę na podstawie jej widma odbitego. Wykorzystano do tego celu metodę macierzy przejścia oraz nieliniową metodę optymalizacji Nelder-Meada. Wyniki przeprowadzonych symulacji i odtwarzania profilu odkształcenia wskazują na dobrą ich zgodność z oryginalnymi profilami odkształcenia; błędy rekonstrukcji tych profili nie przekraczają pojedynczych procentów. Na tej podstawie stwierdza się, że metodę optymalizacji Nelder-Meada w połączeniu z metodą macierzy przejścia można z powodzeniem stosować w zadaniach miernictwa wielkości rozłożonych.

Słowa kluczowe: światłowodowa siatka Bragga, odtwarzanie, czujnik rozłożony, metoda macierzy przejścia.

Strain profile reconstruction on the basis of the reflection spectrum of a fiber Bragg grating**Abstract**

A synthesis of the fiber Bragg grating (FBG) parameters and reconstruction of the distributed strain affecting the grating performed by means of its reflection spectrum is presented. For this purpose, there are applied the transition matrix method and the Nelder-Mead nonlinear optimization method. The essence of both methods is described. First, simulations of reconstruction of the grating parameters and the linear distributions of compressive strains were performed. The results of these simulations are presented in Section 3. Then the reconstruction of the compressive strain profiles was carried out on the basis of the measured spectrum of the grating. The results of those calculations are given in Section 4. The reconstruction results of the strain profile carried out on the basis of the simulated reflection spectrum and the measured reflection spectrum of the FBG show good agreement with the original strain profile; the profile reconstruction errors are within the single digit percentage range. One can conclude that the Nelder-Mead optimization method combined with the transition matrix method can be used for distributed sensing problems.

Keywords: fiber Bragg grating, reconstruction, distributed sensing, transfer matrix method.

1. Wstęp

Światłowodowe siatki Bragga są wykorzystywane w miernictwie wielkości nie elektrycznych do budowy czujników jedno i wielopunktowych oraz rozłożonych. W pierwszych dwóch rodzajach czujników korzysta się z zależności długości fali Bragga siatki od działającego na nią wymuszenia. W czujnikach rozłożonych do odtworzenia profilu wymuszenia działającego wzdłuż siatki korzysta się z jej widm spektralnych. Widma te zawierają informacje o parametrach siatki a zatem i o rozkładzie działającego na nią mesurandu. Odtwarzanie parametrów siatki i profilu mesurandu i parametrów siatki na podstawie jej widm spektralnych należy do

zadań odwrotnych, których rozwiązanie wiąże się z określonymi trudnościami. Trudności te zwiększa fakt, że siatka Bragga jest elementem nieliniowym. Opracowano szereg metod rozwiązania tego zadania. Należą do nich metoda transformaty Fourier [1, 3], metoda analizy czasowo-częstotliwościowej [4], metoda Gelfand-Levian-Marczenko [5], metody optymalizacji [6, 7], algorytm layer-peeling [8] i algorytmy genetyczne [9, 10]. Część tych metod opiera się tylko na zmierzonym widmie amplitudowym wiązki odbitej lub transmitującej przez siatkę [1, 2, 4-14], inne wykorzystują tylko widmo fazowe siatki [1, 3] i jeszcze inne bazują zarówno na zmierzonych widmach amplitudowym i fazowym siatki [1, 4, 8]. W praktyce pomiarowej najchętniej korzysta się z metod bazujących na zmierzonym widmie amplitudowym siatki, ze względu na łatwość pomiaru tego widma. Pomiar charakterystyki fazowej siatki wymaga złożonego i drogiego układu pomiarowego, który jest znacznie trudniejszy do realizacji w porównaniu z pomiarem widma amplitudowego. W artykule przedstawiono wyniki wyznaczania estymat parametrów siatki oraz wyniki obliczeń estymat rozkładów odkształcenia ściskającego wzdłuż siatki Bragga, na podstawie widma amplitudowego jej wiązki odbitej. Wykorzystano do tego celu algorytm optymalizacji Nelder-Meada i metodę macierzy przejścia.

2. Odtwarzanie parametrów siatki i rozkładu odkształceń

Kolejność procedur w postawionym zadaniu jest następująca: najpierw oblicza się widmo amplitudowe siatki równomiernej przy zadanych jej parametrach, a następnie na podstawie obliczonego widma amplitudowego po dodaniu szumu odtwarza się parametry siatki. W kolejnej procedurze oblicza się widmo amplitudowe siatki poddanej założonemu rozkładowi odkształceń, wykorzystując odtworzone uprzednio parametry siatki, a następnie na podstawie obliczonego widma i dodaniu do niego szumu białego odtwarza się rozkład odkształcenia.

Do obliczania widma wiązki odbitej siatki nierównomiernej zastosowano metodę macierzy przejścia [15]. Dla przejrzystości pracy poniżej podano zarys tej metody.

Rozkład współczynnika załamania rdzenia siatki charakteryzujący siatkę Bragga dany jest funkcją:

$$n_{eff}(z) = n_0 + \delta n_{eff}(z) \cos\left(\frac{2\pi}{\Lambda} z + \phi(z)\right), \quad (1)$$

gdzie n_0 jest średnią wartością współczynnika załamania, δn_{eff} jest amplitudą zmian współczynnika załamania, z jest odległością wzdłuż osi podłużnej włókna, a Λ jest okresem siatki i $\phi(z)$ opisuje zmienność tego okresu.

Okres siatki, którego zmiany powodowane są przez rozkład odkształcenia $\varepsilon(z)$ można zapisać w postaci zależności:

$$\Lambda(z) = \Lambda_0[1 + (1 - p_e)\varepsilon(z)], \quad (2)$$

gdzie Λ_0 jest okresem początkowym, a p_e współczynnikiem elastoptycznym.

Jeśli siatka jest apodyzowana profilem Gaussa to zmiana współczynnika załamania wyraża się wzorem:

$$\delta n_{eff}(z) = \delta n_{eff} \exp\left[-\rho\left(\frac{z-L/2}{L}\right)^2\right] = \delta n_{eff} g(z), \quad (3)$$

gdzie L jest długością siatki, ρ jest parametrem szerokości funkcji Gaussa.

W metodzie macierzy przejścia siatkę dzieli się na M jednakowych, równomiernych sekcji. Wyznacza się macierze 2×2 każdej sekcji, a następnie mnoży się wszystkie. Iloczyn macierzy wszystkich sekcji opisuje całą siatkę. Macierz T całej siatki można opisać wyrażeniem

$$T = \begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} \\ t_{21} & t_{22} \end{bmatrix} = T_1 \cdot T_2 \cdot \dots \cdot T_M, \quad (4)$$

gdzie $T_1, T_2 \dots T_M$ są macierzami równomiernych sekcji 1, 2 ... M siatki. Zależności do obliczenia macierzy równomiernych sekcji podane są w [1,15].

Współczynnik odbicia mocy dla całej siatki ma postać:

$$R = \left| \frac{t_{21}}{t_{22}} \right|^2, \quad (5)$$

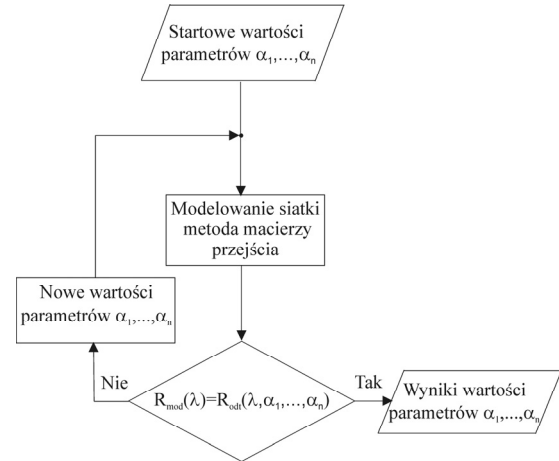
Dla założonych wartości parametrów siatki $L, \Lambda, \delta n_{eff}, \rho$ oraz $\varepsilon(z)$ na podstawie powyższych zależności można obliczyć widmo amplitudowe wiązki odbitej siatki.

Do rekonstrukcji profilu odkształcenia i syntezy siatki wykorzystano jedną z technik optymalizacji: metodę sympleksu Nelder-Meada. W n -wymiarowej przestrzeni, to znaczy gdy jest do odtworzenia n parametrów, sympleks jest figurą geometryczną o $n+1$ wierzchołkach. Metoda Nelder-Meada polega na przekształcaniu wybranego na początku obliczeń sympleksu $x_i (i=1, \dots, n+1)$ tak, aby jego najgorszy punkt (największa wartość funkcji celu) był zastąpiony przez nowy, lepszy punkt. Decyzje o nowym położeniu wierzchołków sympleksu podejmowane są na podstawie wartości funkcji celu w bieżących punktach. Przekształcania sympleksu dokonuje się tak długo, aż odległość między jego wierzchołkami w pobliżu szukanego minimum będzie nie większa od zadanej dokładności. Początkowy sympleks jest budowany wokół podanego punktu startowego x_0 przez zmianę pojedynczych współrzędnych o 10%. Jako funkcję celu przyjęto odchylenie średniokwadratowe między widmem zamodelowanym i zrekonstruowanym siatki

$$f(\alpha) = \sqrt[4]{\int_0^{\infty} [R_{mod}(\lambda) - R_{odt}(\lambda, \alpha_1, \dots, \alpha_n)]^4 d\lambda}, \quad (6)$$

gdzie $R_{mod}(\lambda)$ i $R_{odt}(\lambda, \alpha_1, \dots, \alpha_n)$ są odpowiednio widmem zamodelowanym i odtworzonym siatki. Wyznaczając minimum funkcji celu $f(\alpha)$ otrzymujemy optymalne wartości parametrów $\alpha_1, \dots, \alpha_n$. Schemat ilustrujący etapy optymalizacji przedstawiono na rysunku 1.

Dokładny opis metody Nelder-Meada jest zawarty w pracy [16].



Rys. 1. Schemat ilustrujący etapy procedury optymalizacji
Fig. 1. Stages of the optimization procedure.

3. Rezultaty obliczeń symulacyjnych

W pierwszej kolejności dokonuje się rekonstrukcji parametrów siatki nie odkształconej. Siatkę Bragga charakteryzującą następujące parametry: $L, \Lambda, \delta n_{eff}$, oraz ρ . Dla przyjętych wartości parametrów siatki, podanych w tabeli 1, oblicza się widmo amplitudowe wiązki odbitej siatki, apodyzowanej funkcją Gaussa (3) wykorzystując w tym celu metodę macierzy przejścia. Obliczone widmo przedstawiono na rysunku 2. Do obliczonego widma dodano szum biały. Dla celów symulacji siatkę podzielono na 50 jednakowych sekcji. Na podstawie obliczonego widma amplitudowego dokonuje się rekonstrukcji parametrów siatki wykorzystując the Nelder-Mead simplex algorithm z funkcją celu zgodnie ze wzorem (6), gdzie przyjmuje się $\alpha_1 = L, \alpha_2 = \Lambda, \alpha_3 = \delta n_{eff}, \alpha_4 = \rho$. Procedurę optymalizacji realizuje się zgodnie ze schematem przedstawionym na rysunku 1. Jako startowe wartości rekonstruowanych parametrów przyjmuje się ich wartości z odchyleniem o 40% od wartości zadanych. Wyniki rekonstrukcji parametrów siatki zamieszczono w tabeli 1 wraz z błędami tej rekonstrukcji.

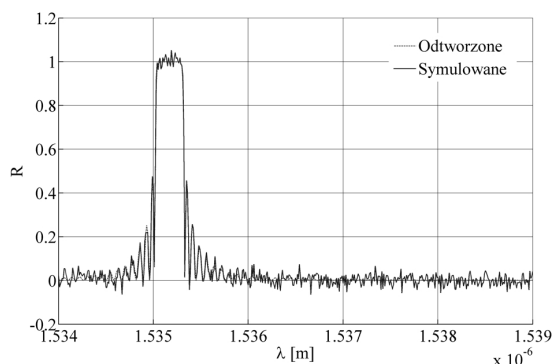
Tab. 1. Wyniki rekonstrukcji parametrów siatki
Tab. 1. Reconstruction results of the FBG physical parameters

Parametry	Wartości zadane	Wartości odtworzone	Maksymalny błąd względny
$L(\text{mm})$	10	9,963	$3,7 \times 10^{-3}$
$\Lambda(\text{nm})$	530,834	530,833998	$3,9 \times 10^{-7}$
$\delta n_{eff}(10^{-5})$	26	25,880	$4,6 \times 10^{-3}$
ρ	0,5	0,481	$3,9 \times 10^{-2}$

Z przeprowadzonych obliczeń wynika, że odtworzone parametry $L, \delta n_{eff}$, są z błędem nie przekraczającym 0,5%, natomiast okres siatki Λ odtworzono bardzo dokładnie z błędem nie przekraczającym $4 \cdot 10^{-5}\%$. Najmniej dokładnie odtworzono wartość parametru funkcji apodyzującej ρ ; błąd odtworzenia wynosi 3,9%. Na podstawie odtworzonych wartości parametrów siatki obliczono jej widmo amplitudowe. Na rysunku 2 przedstawiono widmo amplitudowe siatki oryginalne i obliczone z rekonstrukcji. Zgodność kształtu tych widm jest bardzo dobra.

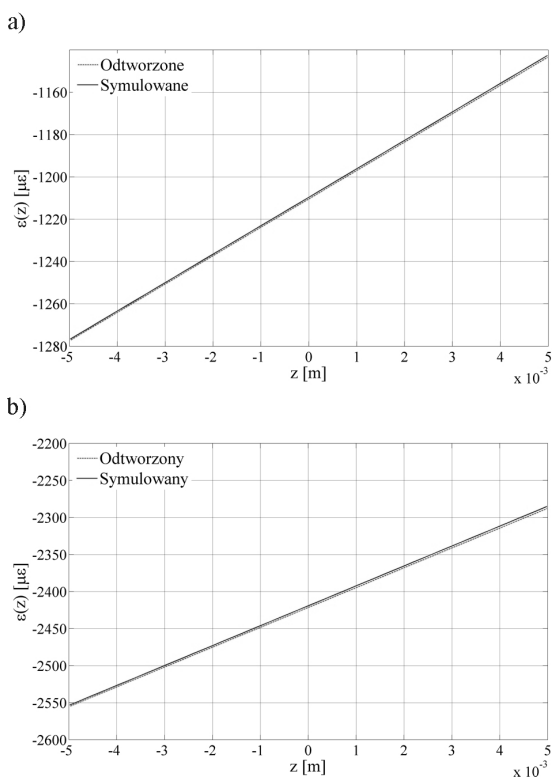
W drugiej kolejności odtwarzano rozkład odkształcenia na podstawie jej zamodelowanego widma wywołanego zadaniem rozkładem odkształcenia. Założono, że rozkład odkształcenia jest funkcją pierwszego rzędu: $\varepsilon(z) = a_1 + a_2 z$. Mając wyznaczone parametry siatki $L, \Lambda, \delta n_{eff}$ i ρ w pierwszym etapie, nieznanymi parametrami są teraz a_1 i a_2 .

Podobnie jak w pierwszym etapie proponowana metoda pozwala na wyznaczenie wartości tych dwóch parametrów, a co za tym idzie pozwala na odtworzenie rozkładu odkształcenia $\varepsilon(z)$.



Rys. 2. Symulowane i odtworzone widmo odbicia siatki z szumem 2.5%
Fig. 2. Simulated and reconstructed reflection spectrum of the grating with 2.5% noise

W tym etapie odtwarzania przyjęte parametry siatki są następujące: $L=10$ mm, $A=530,834$ nm, $\delta n_{eff}=26 \cdot 10^{-5}$ i $\rho=0,5$. Siatkę również podzielono na 50 sekcji ($M=50$). Symulowane i zrekonstruowane rozłożone odkształcenie dla dwu różnych par parametrów tego odkształcenia a_1 i a_2 przedstawiono na rysunku 3. Wyniki błędów rekonstrukcji rozkładów odkształcenia przedstawiono w tabeli 2. Z tabeli tej widać, że błąd odtworzenia odkształcenia ściskającego (parametru a_1) jest mniejszy niż 0,1 %, natomiast błąd odtworzenia gradientu odkształcenia (parametru a_2) nie przekracza 0,4%. Rozdzielczość przestrzenna odtworzonego profilu odkształcenia wynika z przyjętej liczby sekcji FBB w metodzie macierzy przejścia i wynosi 0,2 mm.

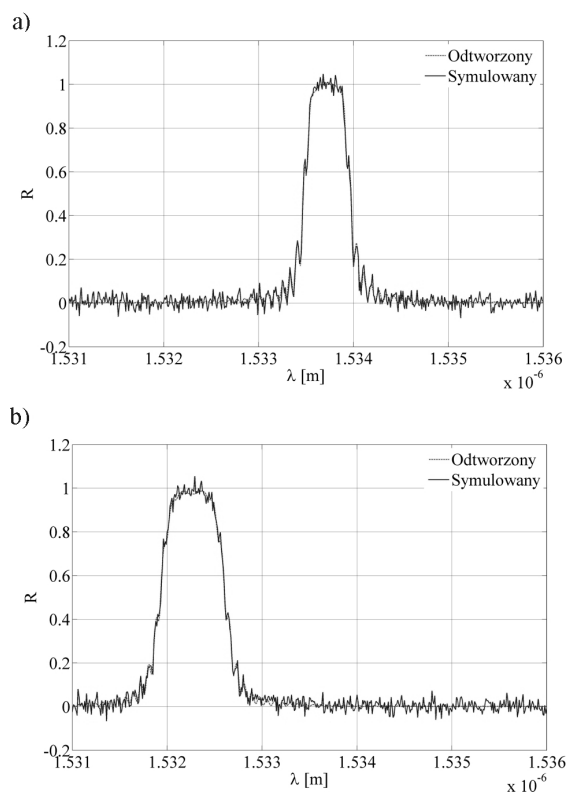


Rys. 3. Symulowane i odtworzone rozkłady odkształcenia:
a) $\varepsilon(z) = -1209\mu\epsilon + (13,44 \mu\epsilon / \text{mm})z$;
b) $\varepsilon(z) = -2419 \mu\epsilon + (26,88 \mu\epsilon / \text{mm})z$
Fig. 3. Simulated and reconstructed strain profile:
a) $\varepsilon(z) = -1209\mu\epsilon + (13,44 \mu\epsilon / \text{mm})z$;
b) $\varepsilon(z) = -2419 \mu\epsilon + (26,88 \mu\epsilon / \text{mm})z$

Tab. 2. Wyniki błędów rekonstrukcji rozkładów odkształcenia
Tab. 2. Errors of the reconstruction of the strain profile

$\varepsilon(z)$	Odtworzone wartości współczynników wielomianu		Błąd odkształcenia a_1 [%]	Błąd gradientu a_2 [%]
	a_1 [$\mu\epsilon$]	a_2 [$\mu\epsilon/\text{mm}$]		
$-1209\mu\epsilon + (13,44\mu\epsilon/\text{mm})z$	-1210,37	13,41	0,064	0,25
$-2419\mu\epsilon + (26,88\mu\epsilon/\text{mm})z$	-2421,51	26,79	0,097	0,34

Symulowane i zrekonstruowane widmo odbite siatki poddanej rozłożonemu odkształceniu $\varepsilon(z)=a_1+a_2z$ dla dwu par parametrów a_1 i a_2 przedstawiono na rysunku 4. Widać na nim, że zarówno kształt obydwu widm jak i ich centralne długości fali są prawie identyczne.



Rys. 4. Symulowane i odtworzone widma odbicia siatki dla różnych profili odkształcenia: a) $\varepsilon(z) = -1209\mu\epsilon + (13,44 \mu\epsilon / \text{mm})z$;
b) $\varepsilon(z) = -2419 \mu\epsilon + (26,88 \mu\epsilon / \text{mm})z$

Fig. 4. Simulated and reconstructed reflection spectrum of the grating for the strain profile: a) $\varepsilon(z) = -1209\mu\epsilon + (13,44 \mu\epsilon / \text{mm})z$;
b) $\varepsilon(z) = -2419 \mu\epsilon + (26,88 \mu\epsilon / \text{mm})z$

4. Rezultaty odtwarzania profilu odkształcenia ze zmierzonego widma amplitudowego siatki

Analogicznie jak w przypadku obliczeń symulacyjnych w pierwszej kolejności dokonuje się syntezy parametrów siatki w tym przypadku użytej w pomiarach, na podstawie zmierzonego widma odbitego siatki nieodkształconej. Następnie bazując na wyznaczonych parametrach siatki i zmierzonym widmie odbitym siatki poddanej rozłożonemu odkształceniu dokonuje się obliczeń rekonstrukcji profilu odkształcenia zgodnie z procedurą optymalizacji Neldera-Meada.

Pomiary widma odbitego nieodkształconej siatki Bragga oraz poddanej rozłożonemu odkształceniu, przeprowadzono na stanowisku pomiarowym, którego opis zamieszczono w pracy [17]. Na stanowisku tym wykorzystano płaską belkę jednostronnie utwierdzoną o jednakowej szerokości z zainstalowaną na jej powierzchni siatką Bragga, której swobodny koniec poddawano ugięciu o zadanych wartościach. W ten sposób wytwarzano w belce rozłożone odkształcenie, w postaci stałego odkształcenia z nałożonym gradientem odkształcenia. To rozłożone odkształcenie działające wzdłuż zainstalowanej siatki można zapisać w postaci zależności:

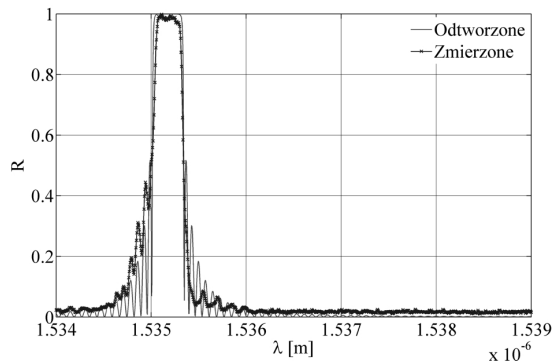
$$\varepsilon(z) = \varepsilon + \frac{d\varepsilon}{dz} z, \quad (7)$$

Zarówno odkształcenie ε jak i gradient odkształcenia $d\varepsilon/dz$ są liniowo zależne od strzałki ugięcia belki. Rezultaty tych pomiarów wykorzystano w rekonstrukcji profili odkształceń. Z danych podanych przez producenta długość siatki wynosi 10 mm. Zatem do odtworzenia pozostały parametry: $\alpha_1 = \Lambda$, $\alpha_2 = \delta n_{\text{eff}}$, $\alpha_3 = \rho$. Odtworzono wartości tych parametrów na podstawie zmierzonego widma odbitego siatki nieodkształconej. Wyniki tego odtwarzania zamieszczono w tabeli 3.

Tab. 3. Wyniki rekonstrukcji parametrów siatki
Tab. 3. Reconstruction results of the FBG physical parameters

Parametry	Wartości odtworzone
Λ (nm)	530,836
δn_{eff} (10^{-5})	25,9329
ρ	0,3606

Na podstawie odtworzonych wartości parametrów siatki obliczono jej widmo odbite. Na rysunku 5 przedstawiono zmierzone i odtworzone widmo odbite. Widać na nim, że zarówno kształty obydwu widm jak i ich centralne długości fali dobrze zgadzają się ze sobą.



Rys. 5. Zmierzone i zrekonstruowane widmo odbicia siatki
Fig. 5. Measured and reconstructed reflection spectrum of the grating

W drugiej kolejności znając parametry siatki oraz zmierzone widmo odbite siatki poddanej rozłożonemu odkształceniu wykonuje się obliczenia rekonstrukcji parametrów rozłożonego odkształcenia. Na rysunku 6 pokazano tak odtworzony rozkład odkształcenia wraz z odpowiadającym rozkładem wyznaczonym na podstawie zależności obowiązujących dla belki zginanej jednostronnie utwierdzonej. Wykorzystano tu znaną zależność na odkształcenie belki:

$$\varepsilon = \frac{3hl}{2l_0^3} f, \quad (8)$$

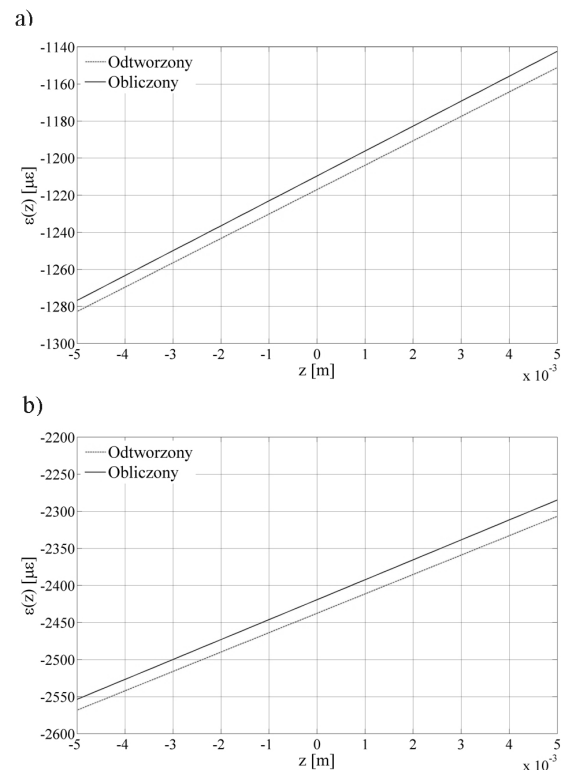
gdzie: f , l_0 , h , l oznaczają odpowiednio strzałkę ugięcia, długość, grubość i długość biegnąca belki.

Jeżeli powiązać współrzędną osiową belki l i współrzędną osiową siatki z zależnością $l=l_c+z$, gdzie l_c jest odległością środka siatki zainstalowanej na belce od jej swobodnego końca, to na podstawie zależności (8) składniki prawej strony wzoru (7) są określone przez relacje

$$\varepsilon = \frac{3hl_c}{2l_0^3} f \quad i \quad \frac{d\varepsilon}{dz} = \frac{3h}{2l_0^3} f, \quad (9)$$

gdzie ε jest odkształceniem środka siatki.

Przyjmując wartości parametrów odkształcenia rozłożonego, ε i $d\varepsilon/dz$, wyznaczone z zależności (9) jako odniesienia wyznaczono maksymalne względne błędy rekonstrukcji tych parametrów. Zestawiono je w tabeli 4. Z tabeli tej widać, że błąd odtworzenia odkształcenia jest mniejszy niż 0,8%, natomiast błąd odtworzenia gradientu odkształcenia nie przekracza 3,0%.



Rys. 6. Obliczone i odtworzone rozkłady odkształcenia:

a) $\varepsilon(z) = -1209\mu\varepsilon + (13,44 \mu\varepsilon / \text{mm})z$;

b) $\varepsilon(z) = -2419 \mu\varepsilon + (26,88 \mu\varepsilon / \text{mm})z$

Fig. 6. Calculated and reconstructed strain profile:

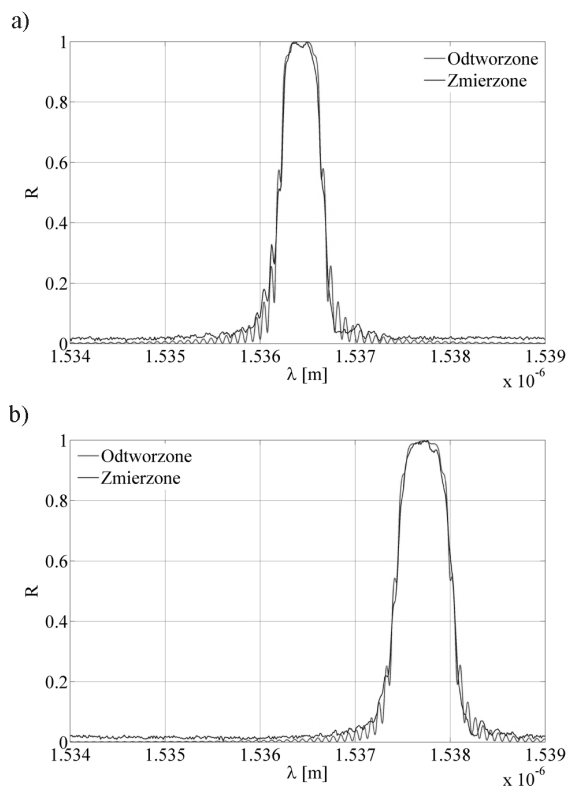
a) $\varepsilon(z) = -1209\mu\varepsilon + (13,44 \mu\varepsilon / \text{mm})z$;

b) $\varepsilon(z) = -2419 \mu\varepsilon + (26,88 \mu\varepsilon / \text{mm})z$

Tab. 4. Wyniki błędów rekonstrukcji rozkładów odkształcenia
Tab. 4. Errors of the reconstruction of the strain profiles

Obliczone wartości współczynników wielomianu		Odtworzone wartości współczynników wielomianu		Błąd odkształcenia a1 [%]	Błąd gradientu a2 [%]
a_1 [με]	a_2 [με/mm]	a_1 [με]	a_2 [με/mm]		
-1209,6	13,44	-1216,98	13,16	0,610	2,07
-2419,2	26,88	-2437,51	26,15	0,757	2,71

Zmierzone i zrekonstruowane widmo odbite siatki poddanej rozkładowi $\varepsilon(z)=\varepsilon+(d\varepsilon/dz)z$ odkształceń dla dwu różnych par parametrów a_1 i a_2 przedstawiono na rysunku 7. Widać na nim, że zarówno kształty obydwu widm jak i centralne długości fali dobrze zgadzają się ze sobą. Widmo przesuwa się w kierunku fal krótszych pod wpływem odkształcenia, zatem jest ono odkształceniem ściskającym.



Rys. 7. Zmierzone i odtworzone widma odbicia siatki dla różnych profili odkształcenia: a) $\varepsilon(z) = -1209\mu\varepsilon + (13,44 \mu\varepsilon/\text{mm})z$;

b) $\varepsilon(z) = -2419 \mu\varepsilon + (26,88 \mu\varepsilon/\text{mm})z$

Fig. 7. Measured and reconstructed reflection spectrum of the grating for strain profile: a) $\varepsilon(z) = -1209\mu\varepsilon + (13,44 \mu\varepsilon/\text{mm})z$;

b) $\varepsilon(z) = -2419 \mu\varepsilon + (26,88 \mu\varepsilon/\text{mm})z$

5. Wnioski

W artykule przedstawiono zastosowanie metody optymalizacji Nelder-Mead i metody macierzy przejścia do syntezy parametrów światłowodowej siatki Bragga i odtworzenia rozkładu odkształceń ściskających wzdłuż jej długości na podstawie jej widma amplitudowego. Przeprowadzone symulacje wskazują, że rekonstrukcje zarówno parametrów siatki jak i rozkładów odkształcenia wykonano z zadawalającą dokładnością. Błąd względny odtwarzania parametrów siatki nie przekroczył 0,4%, z wyjątkiem parametru funkcji apodyzującej, natomiast błąd względny amplitudy odtworzonych liniowych rozkładów odkształceń wynosi $\sim 0,5\%$. Rekonstrukcje profili odkształcenia na podstawie zmierzonego widma odbitego siatki wykonano z błędem mniejszym niż 3%.

Rozdzielczość przestrzenna odtwarzanych profili odkształcenia zarówno dla symulacji odtwarzania jak i odtwarzania jest zdeterminowana liczbą sekcji FBG przyjętej w metodzie MMP i wynosi 0,2 mm. Przedstawione rezultaty symulacji odtwarzania i odtwarzania dają podstawę do stwierdzenia, że metodę optymalizacji NM można z powodzeniem stosować do wyznaczania rozkładów mesurandu, wykorzystując w tym celu światłowodowe siatki Bragga i ich widmo amplitudowe.

6. Literatura

- [1] Othonos T. A., Kalli K.: Fiber Bragg Grating: Fundamentals and Applications in Telecommunications and Sensing. Artech House, Boston London 1999.
- [2] Hung S., Leblanc M., Ohn M. M., and Measures R. M.: Bragg intragrating structural sensing. Appl Opt., Vol. 34, no. 22, 1995, pp. 5003-5009.
- [3] Hung S., Ohn M. M., Measures R. M.: Phase-based Bragg intragrating distributed strain sensor. Appl. Opt., Vol. 35, no.7, 1996, pp. 1135-1142.
- [4] Azana J., Muriel M. M., Chen L. R., Smith P. W. E.: Fiber Bragg grating period reconstruction using time-frequency signal analysis and application to distributed sensing. J. Lightwave Technol., Vol. 19, no.5, 2001, pp. 646-654.
- [5] Peral E., Capmany J., Marti J.: Iterative solution to the Gel'Fand-Levitan-Marchenko coupled equations and application to synthesis of fiber gratings. IEEE J. Quantum Electron., no.32, 1996, pp. 2078-2084.
- [6] Shi C., Zeng N., Zhang M., Liao Y., Lai S.: Adaptive simulated annealing algorithm for the fiber Bragg grating distributed strain sensing. Opt. Commun., no.226, 2003, pp. 167-173.
- [7] Li M., Zeng N., Shi C., Zhang M., Liao Y.: Fiber Bragg grating distributed strain sensing: an adaptive simulated annealing algorithm approach. Optics & Laser Technol., no.37, 2005, pp. 454-457.
- [8] [Skaar J., Wang L., Erdogan T.: On the synthesis of fiber Bragg gratings by Layer Peeling. IEEE J. Quantum Electron., no.37, 2001, pp. 165-173.
- [9] Casagrande F., Crespi P., Grassi A. M., Lulli A., Kenny R. P.: Whelan M. P., From the Reflected Spectrum to the Properties of a Fiber Bragg Grating: A Genetic Algorithm Approach with Application to Distributed Strain Sensing. Appl Opt., Vol. 41, no.25, 2001, pp. 5238-5244.
- [10] Gill A., Peters K., Studer M.: Genetic algorithm for the reconstruction of Bragg grating sensor strain profiles. Meas. Sci. Technol., no.15, 2004, pp. 1877-1884.
- [11] LeBlanc M., Huang S.Y., Ohn M. M., Measures R. M., A.: Guemes and Othonos A., Distributed strain measurement based on a fiber Bragg grating and its reflection spectrum analysis. Opt. Lett., no.21, 1996, pp. 1405-1407.
- [12] Hung S., Ohn M. M., Leblanc M., and Measures R. M.: Continuous arbitrary strain profile measurements with fiber Bragg gratings. Smart Materials and Structures, no.7, 1998, pp. 248-256.
- [13] Wójcik W., Kisała P.: Analiza niepewności wyznaczania rozkładu wydłużenia siatki Bragga na podstawie jej charakterystyk spektralnych. Pomiary Automatyka Kontrola, no.5, 2010, pp. 427-429.
- [14] Peters K., Pattis P., Botsis J., Giacari P.: Experimental verification of response of embedded optical fiber Bragg grating sensors in non-homogeneous strain fields. Optics & Lasers Engineering, no.33, 2000, pp. 107-119.
- [15] Erdogan T.: Fiber grating spectra. J. Lightwave Technol., Vol. 15, no. 8, 1997, pp. 1277-1294.
- [16] Lagaris J. C., Reeds J. A. Wright M. H., Wright P. E.: Convergence Properties of the Nelder-Mead Simplex Method in Low Dimensions. Siam J. Optimizat., Vol. 9, no.1, 1998, pp. 112-147.
- [17] Kaczmarek Z., Detka M.: Wpływ gradient odkształcenia światłowodowej siatki Bragga o stałym okresie na jej charakterystyki spektralne. Pomiary Automatyka Kontrola, no.12, 2010, pp. 1439-1441.

otrzymano / received: 23.01.2013

przyjęto do druku / accepted: 01.03.2013

artykuł recenzowany / revised paper