

Waldemar WÓJCIK*, Piotr KISAŁA*POLITECHNIKA LUBELSKA, WYDZIAŁ ELEKTROTECHNIKI I INFORMATYKI, KATEDRA ELEKTRONIKI
ul. Nadbystrzycka 38A, 20-618 Lublin**Analiza niepewności wyznaczenia rozkładu wydłużenia siatki Bragga na podstawie jej charakterystyk spektralnych**

Prof. dr hab. inż. Waldemar WÓJCIK

Kierownik Katedry Elektroniki, dziekan Wydziału Elektrotechniki i Informatyki Pol. Lubelskiej. Studia na Wydziale Elektroniki Pol. Wrocławskiej (1975), doktorat w Pol. Lubelskiej (1985), habilitacja w Pol. Lwowskiej (2001), tytuł profesora nauk technicznych. w roku 2009. W pracy naukowej zajmuje się procesami cieplnymi, fizyką ciała stałego, sterowaniem procesów technologicznych, optoelektroniką, cyfrową analizą danych oraz kryptografią. W jego dorobku znajduje się około 400 publikacji.



e-mail: waldemar.wojcik@pollub.pl

Dr inż. Piotr KISAŁA

Ukończył studia na Wydziale Elektrycznym Pol. Lubelskiej w 2002 r. Od tego roku na stanowisku asystenta w Katedrze Elektroniki. Jego działalność naukowo-badawcza dotyczy telekomunikacyjnych i nietelemunikacyjnych zastosowań światłowodów oraz zastosowań światłowodowych siatek Bragga jako elementów filtrujących oraz czujników optycznych. Obronił pracę doktorską: "Metoda wyznaczania rozkładu naprężeń przy zastosowaniu światłowodowych siatek Bragga" (2009).



e-mail: p.kisala@pollub.pl

Streszczenie

W artykule przedstawiono analizę niepewności wyznaczenia parametrów siatki Bragga na podstawie jej widma. Analizowane parametry to okresy siatki mierzone w kilku obszarach, na jej długości, które zostały zastosowane do wyznaczenia jej wydłużenia względnego. Do obliczeń zastosowano analizę odwrotną. Zdefiniowano zadanie wprost, a przy wykorzystaniu modelu siatki i iteracyjnego algorytmu symulowanego wyżarzania zaprezentowano rozwiązanie zadania odwrotnego, polegającego na wyznaczeniu zmian wydłużenia względnego siatki na podstawie jej charakterystyk spektralnych.

Słowa kluczowe: światłowodowe siatki Bragga, rozkład wydłużenia, problem odwrotny, niepewność pomiaru.

The uncertainty analysis of the strain distribution recovery of the fiber Bragg grating on the basis of its spectra**Abstract**

This paper outlines the uncertainty analysis of the fiber Bragg grating strain distribution recovery. The grating spectra was used to carry out the analysis above. The inverse problem solution was also discussed. Analyzed parameters (grating period values), were distributed in a few points along the grating length. On the basis of the Bragg grating period values its strain values were determined. The inverse analysis was used for calculations. Initially the forward problem was defined. Then the inverse problem solution was presented by the use of the mathematical model of the Bragg grating sensor and the presented simulated annealing algorithm. The inverse problem depends on recovery of the strain distribution of the grating on its spectra basis. The measurement uncertainty was treated as a difference between the spectra values from the measurement and the real value of this spectra. This uncertainty characterizes the scatter (range width) inside which we could locate the spectra values with the satisfactory probability. As a uncertainty measure we accepted the standard deviation of the indirect measurement or in other words the root mean squared error. Six spectra of the grating were analyzed. In every case we checked if the changes of the spectra measurement uncertainty (root mean squared error between two spectra) had an influence on the uncertainty of the strain distribution recovery.

Keywords: fiber Bragg gratings, strain distribution, inverse problem, uncertainty of the measurement.

1. Wstęp

W metrologii o wiele większe znaczenie niż rozwiązywanie zadania wprost ma proces odwrotny, czyli wnioskowanie o przyczynach na podstawie skutków. Proces ten zwany zadaniem odwrotnym (ang. inverse problem) może przyjmować mniej lub bardziej formalną postać [1]. Zasadniczo zadanie odwrotne polega na ilościowym wyznaczeniu przyczyn, gdy znane są skutki i struktura modelu obiektu. Dlatego ten termin obejmuje w metrologii dwa

różne zagadnienia, tzn. rekonstrukcję sygnałów i estymację parametrów [2]. W niniejszej pracy problem odwrotny wykorzystano w celu estymacji parametrów modelu czujnika zmian wydłużenia. Badany czujnik wykorzystuje światłowodową siatkę Bragga [3, 4] – FBG (ang.: fiber Bragg grating). Może być on wykorzystywany jako czujnik do pomiaru ciśnień impulsowych [5, 6]. Obiecujące są również siatki zapisane na włóknach przewężanych termicznie w zastosowaniach czujnikowych [7].

W niniejszym artykule autorzy wykorzystali światłowodowe siatki Bragga jako czujniki zmian wydłużenia względnego. Na podstawie widma siatki wyznaczone jest jej wydłużenie względne w kilku punktach czyli zmienność wydłużenia w siatce [8]. Jest ono wyznaczone na podstawie zmian wartości okresów siatki na jej długości, będących jej parametrami. Artykuł ma na celu ustalenie wpływu niepewności pomiaru widma siatki, na niepewność wyznaczania zmian wydłużeń siatki.

2. Opracowanie i walidacja modelu matematycznego czujnika z siatką Bragga

Model matematyczny czujnika z siatką Bragga można przedstawić jako odwzorowanie sygnałów wejściowych u , w obecności zakłóceń losowych e [9], przy znanym wektorze parametrów θ , na sygnał wyjściowy y , co schematycznie przedstawione zostało na rys. 1.

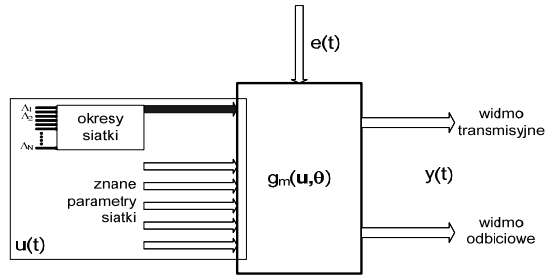
Odwzorowanie g_m , będące modelem matematycznym czujnika, można powiązać z sygnałami wejściowymi i obserwowanym wyjściem następująco [1]:

$$y_m(t) = g_m(t, \theta), \quad (1)$$

$$y(t) = y_m(t) + v(t), \quad (2)$$

gdzie y_m jest deterministycznym wyjściem (widmem siatki), a v to realizacja addytywnych zakłóceń losowych. W rzeczywistości mogą mieć one charakter szumu kolorowego, będącego efektem „filtracji” zakłóceń gaussowskich e , oddziałujących na cały obiekt. W procesie tworzenia opisu matematycznego posłużono się identyfikacją strukturalną [1], zaś dokładny opis modelu przedstawiono w literaturze [10]. Wszystkie modele cechują się pewnym ograniczonym zakresem stosowalności, w związku z czym żaden z nich nie może być adekwatny we wszystkich możliwych eksperymentach czy zastosowaniach [11]. Autorzy dokonali całościowej oceny modelu, a zwłaszcza walidacji w zakresie jego zastosowania, poprzez porównanie zachowania się modelu czujnika z siatką Bragga z taką liczbą informacji o obiekcie rzeczywistym, jaka w tym celu jest konieczna. Ocenie poddano matematyczną postać modelu, a pod uwagę wzięta została również posiadana wiedza, w tym dane eksperymentalne. Przetestowano program komputerowy pod kątem poprawności i dokład-

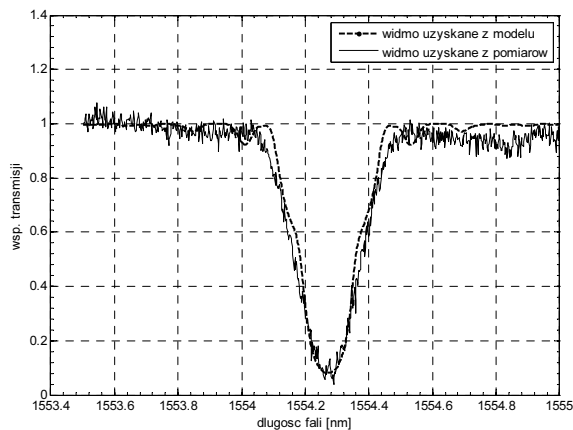
ności implementacji równań modelu matematycznego. Opisane czynności określa się mianem walidacji wewnętrznej [1].



Rys. 1. Schemat czujnika ze światłowodową siatką Bragga (u - pobudzenie badanego obiektu (przyczyna), y - reakcja (skutek), g_m - struktura modelu, θ - parametry modelu, e - zakłócenia losowe)

Fig. 1. The diagram of the mathematical model dependence between the input of measured object u (cause) and his reaction y (result), where g_m - the model structure, θ - it's parameters, and e - random interferences

Na rys. 2 zostały przedstawione widma transmisyjne siatki Bragga. Zgodność charakterystyki modelu z charakterystyką uzyskaną z pomiarów wskazuje, że model udało się potwierdzić badaniami laboratoryjnymi

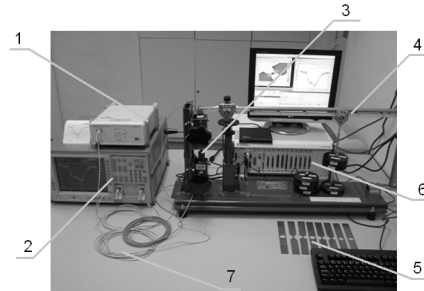


Rys. 2. Porównanie charakterystyk widmowych siatki: z modelu i zmierzonej
Fig. 2. Comparison of spectral grating characteristic (measured and modeled)

3. Pomiary charakterystyk spektralnych siatki przy różnych wydłużeniach siatki

Światło o długościach fali od 400-1700 nm (źródło światła białego YOKOGAWA AQ-4305) kierowane jest do włókna światłowodowego, na którym zapisana jest siatka Bragga (FBG) przymocowana za pomocą kleju do próbki, na którą działa siła rozciągająca F . Naprężenie próbki dokonane zostało przy wykorzystaniu specjalnego stanowiska laboratoryjnego. Światło (jego zmodyfikowane widmo) po przejściu przez wydłużoną siatkę jest kierowane do analizatora widma optycznego (ANDO AQ-6315B). W tym samym czasie losowo wygenerowany zostaje rozkład wydłużenia za pomocą algorytmu symulowanego wyżarzania. Ten przypadkowy rozkład zostaje następnie wprowadzony do modelu siatki Bragga, co pozwala na obliczenie widma transmisyjnego siatki. Widma te, tzn. wyznaczone z modelu i rzeczywiste (z analizatora widma) są ze sobą porównywane i obliczana zostaje wartość funkcji celu [8]. W przypadku braku zgodności charakterystyk spektralnych dobierane są nowe wartości rozkładu wydłużenia siatki (przy wykorzystaniu algorytmu symulowanego wyżarzania). Są one ponownie wykorzystane do obliczenia nowego widma transmisyjnego za pomocą modelu, które jest porównywane z widmem zmierzonym i cały proces powtarza się aż do uzyskania minimum funkcji celu. Rozkład wydłużenia, który doprowadzi do minimalizacji funkcji celu, będzie rozkładem wynikowym, najbardziej dopasowanym do rzeczywistego. Kolejnym

krokiem jest sprawdzenie zgodności rozkładu wyznaczonego za pomocą algorytmu z rozkładem teoretycznym, wynikającym z siły rozciągającej F oraz kształtu próbki rozciąganej. Znajomość siły F oraz kształtu próbki pozwala na obliczenie (za pomocą metody MES) teoretycznego rozkładu wydłużenia próbki i siatki. Na rys. 3 przedstawiono zdjęcie stanowiska pomiarowego.

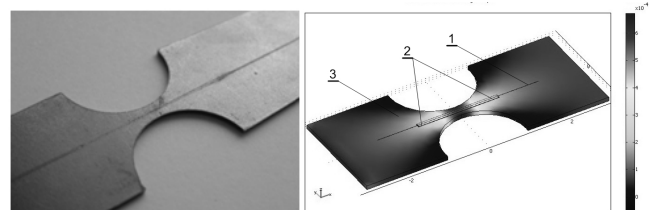


Rys. 3. Stanowisko pomiarowe [12]: 1 - źródło światła białego, 2 - analizator widma, 3 - siatka Bragga, 4 - stanowisko laboratoryjne do wytwarzania naprężeń, 5 - kształty rozciąganych próbek, 6 - urządzenie rejestracji danych pomiarowych i przeprowadzania obliczeń numerycznych, 7 - jednomodowe włókno światłowodowe, na którym zapisana jest siatka Bragga

Fig. 3. Measurement system [12]: 1 - white light source, 2 - spectrum analyzer, 3 - Bragg grating, 4 - lab. system for the strain generation, 5 - shapes of stretched specimens, 6 - the device for the measured data registration and numerical calculations, 7 - single mode fiber with the Bragg grating

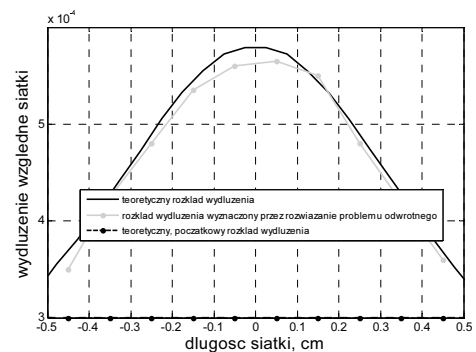
Na rys. 4 przedstawiony został kształt wykorzystanej próbki, zaś na rys. 5 rozkład wydłużenia tej próbki w funkcji naprężenia dla przypadków teoretycznego (obliczonego metodą elementów skończonych) i wyznaczonego (z pomiarów na stanowisku laboratoryjnym).

Wyznaczenie zmian wydłużenia polegało na rozwiązaniu zadania odwrotnego dla światłowodowej siatki Bragga. Na podstawie zmierzonego widma siatki, a następnie stosując algorytm symulowanego wyżarzania dokonano rozwiązania problemu odwrotnego. Dokładniej ten sposób wyznaczenia rozkładu odwrotnego został omówiony w pracy [13].



Rys. 4. Próbką badawczą z przyklejonym czujnikiem: 1 - włókno światłowodowe z siatką Bragga, 2 - obszar spoiny klejowej, 3 - próbka

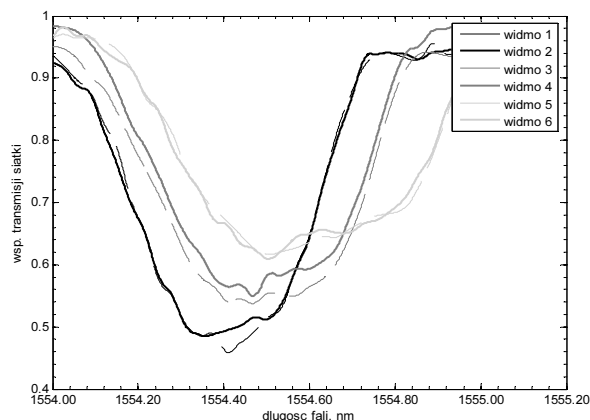
Fig. 4. Measuring system: 1 - optical fiber with the FBG, 2 - glue, 3 - specimen



Rys. 5. Rozkłady wydłużenia w siatce: teoretyczny (linia ciągła czarna), początkowy (linia czarna przerywana) oraz wyznaczony poprzez rozwiązanie problemu odwrotnego dla siatki Bragga (linia szara)
Fig. 5. Strain distributions in grating: theoretical (solid black line), initial (dashed black line) and recovered by the solution of the inverse problem for Bragg grating (grey line)

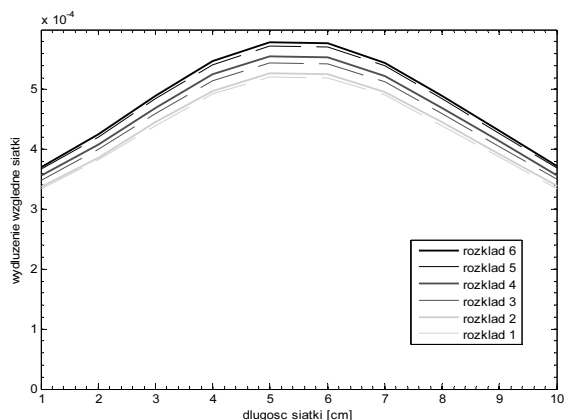
4. Wpływ niepewności pomiaru widma siatki na niepewność wyznaczenia zmiennego odkształcenia

Autorzy potraktowali niepewność pomiaru jako różnicę pomiędzy wartością widma uzyskaną w wyniku pomiaru, a rzeczywistą wartością tego widma. Charakteryzuje ona rozrzut wartości (szerokość przedziału), wewnątrz którego można z zadowalającym prawdopodobieństwem usytuować wartość widma. Jako miarę niepewności przyjęto odchylenie standardowe pomiaru pośredniego [14].



Rys. 6. Charakterystyki transmisyjne siatki
Fig. 6. Grating spectra characteristics

Przeanalizowano 6 charakterystyk widmowych siatki sprawdzając jak zmiany niepewności pomiaru widma (błąd średniokwadratowy pomiędzy dwiema charakterystykami) wpływa na niepewność wyznaczenia zmiennego (na długości siatki) wydłużenia względnego. Za miarę niepewności przyjęto analogicznie wartość błędów średniokwadratowego pomiędzy profilami odpowiadającymi zmierzonym charakterystykom widmowym siatki. Rozkład 1 i 2 z rys. 7 odpowiada charakterystykom 1 i 2 z rys. 6. Z kolei widma 3, 4, 5 i 6 z rys. 6 prowadzą do rozkładów – odpowiednio 3, 4, 5 i 6.



Rys. 7. Różnice w profilach wydłużenia względnego odpowiadające charakterystykom widmowym z rys. 6
Fig. 7. The differences between strain distributions related with the spectra from Fig. 6

Dla pary charakterystyk widmowych nr 1 i 2, błąd średniokwadratowy wyniósł 0,0145 (1,45%), i odpowiada on błędowi średniokwadratowemu pomiędzy profilem nr 1 i 2 wynoszącemu 0,0102 (1,02%). Błąd średniokwadratowy dla pary charakterystyk nr 5 i 6 wyniósł (podobnie jak dla pary charakterystyk nr 1 i 2) 0,014 (1,4%), co odpowiada błędowi średniokwadratowemu pomiędzy profilem nr 5 i 6 równym 0,0102 (1,02%).

Natomiast błąd średniokwadratowy dla pary charakterystyk nr 3 i 4 wyniósł 0,031 (3,1%), co odpowiada błędowi średniokwadratowemu pomiędzy profilem nr 3 i 4 równemu 0,0206 (2,06%).

Powyższe wyniki zebrane zostały w tabeli nr 1.

Tab. 1. Zestawienie błędów średniokwadratowych
Tab. 1. List of root-mean-square errors

Para charakterystyk widmowych z rys. 2	Para profili z rys. 3	Błąd średniokwadratowy dla pary ch-k widmowych	Błąd średniokwadratowy dla pary profili wydłużenia
1, 2	1, 2	0.0145 (1,45 %)	0.0102 (1,02 %)
3, 4	3, 4	0.031 (3,1 %)	0.0206 (2,06 %)
5, 6	5, 6	0.0140 (1,4 %)	0.0102 (1,02%)

5. Wnioski

Wartość niepewności pomiaru widma ma wpływ na niepewność wyznaczenia wydłużenia siatki w różnych jej obszarach.

W rzeczywistości pomiar widma, w oparciu o które wyznaczenie jest zmienne wydłużenie siatki Bragga obarczony jest błędami pomiarowymi. W niniejszym artykule przedstawiono wpływ błędów pomiaru widma na dokładność wyznaczenia wydłużenia.

Zwiększenie niepewności pomiaru widma powoduje wzrost błędów wyznaczenia rozkładu wydłużenia.

Zmiana długości okresu siatki umożliwia wyznaczenie zmiany wartości wydłużenia siatki.

Rozwiązanie zadania wprost może być zrealizowane poprzez opracowanie i walidację modelu matematycznego czujnika z siatką Bragga.

6. Literatura

- [1] Mrocza J.: Problemy metrologii elektronicznej i fotonicznej, praca zbiorowa pod redakcją Janusza Mroczy, Oficyna Wydawnicza Pol. Wrocławskiej, Wrocław 2008, pp. 16-41.
- [2] Czerwiński M., Mrocza J., Girasole T., Gouesbet G., Grehen G.: Light-transmittance predictions under multiple-light-scattering conditions. II. Inverse problem: particle size determination, Applied Optics VOL. 40 ; ISSUE: 9 ; (c) 2001 Optical Society of America, pp.1525-1531.
- [3] Sikora A., Kaczmarek Z.: Analiza pracy światłowodowej siatki Bragga o stałym okresie przy odkształceniach impulsowych, Pomiary Automatyka Kontrola (53), nr 9bis/2007, s. 309-312, 2007.
- [4] Othonos A., Kalli K.: Fibre Bragg gratings: fundamentals and applications in telecommunications and sensing, (Artech House), 1999, pp. 21-45.
- [5] Kaczmarek Z.: "Fiber Bragg grating impulsive pressure sensor". Proc. SPIE, Optical Fibers Applications, 2005, Vol. 5952, pp. 151-155.
- [6] Kaczmarek Z.: Światłowodowy czujnik ciśnienia impulsowych z siatką Bragga, Pomiary Automatyka Kontrola, No. 4, 2006, s. 24-28.
- [7] Jędrzejewski K., Tenderenda T.: materiały konferencyjne X Konferencji Światłowodowy i ich zastosowania, Krasnobród 2006, s. 131-138.
- [8] Wójcik W., Lach Z., Kisała P.: Wstępna ocena metod wyznaczania rozkładu naprężeń zmierzonych przy użyciu światłowodowej siatki Bragga, Pomiary Automatyka Kontrola, Vol.53, nr 11'2007, s. 15-19.
- [9] Mrocza J., Szczuciński D.: Problem odwrotny - jakość rekonstrukcji funkcji rozkładu wielkości cząstek w pomiarach nefelometrycznych i turbidymetrycznych, PAK, 2007 nr 9bis, s. 246-249.
- [10] Wójcik W., Kisała P., The application of inverse analysis in strain distribution recovery using the fibre Bragg grating sensors, Metrology and Measurement Systems, Index 330930, 2009 Polish Academy of Sciences.
- [11] Mrocza J., Szczuciński D.: Wpływ modelu rozproszenia światła na jakość rozwiązań zagadnienia odwrotnego w pomiarach nefelometrycznych, Pomiary Automatyka Kontrola 2007 nr 9bis, s. 242-245.
- [12] Wójcik W., Kisała P., Wybrane zastosowania czujników optoelektronicznych, Elektronika (L), nr 7/2009, s. 181-189.
- [13] Wójcik W., Kisała P., Cięszczyk S.: Czujnik rozkładu naprężenia ze światłowodową siatką Bragga, PAK, Vol.53, nr 11'2007, s. 6-9.
- [14] Teoria pomiarów, pod red. Henryka Szydlowskiego, PWN, Warszawa (1978).