

**Zbyszek KRAJEWSKI, Leszek R. JAROSZEWICZ**

INSTYTUT FIZYKI TECHNICZNEJ, WOJSKOWA AKADEMIA TECHNICZNA, ul. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa

**A-FORS – autonomiczny światłowodowy sejsmograf rotacyjny****Dr inż. Zbigniew KRAJEWSKI**

Asystent naukowo-dydaktyczny w Zakładzie Technicznych Zastosowań Fizyki, Instytutu Fizyki Technicznej Wydziału Nowych Technologii i Chemii WAT. Początkowo zainteresowania dotyczyły badań aspektów polaryzacji światła w światłowodach. Aktualnie zajmuje się zastosowaniem giroskopu światłowodowego jako czujników do pomiaru wielkości fizycznych.



e-mail: zkrajewski@wat.edu.pl

**Prof. dr hab. inż. Leszek R. JAROSZEWICZ**

Fellow of SPIE (ur. 24.05.1959) ukończył studia w roku 1983 w WAT na kierunku fizyka techniczna, doktoryzował się w zakresie optoelektroniki światłowodowej w 1989 r, zaś w roku 1996 obronił rozprawę habilitacyjną z zakresu elektroniki. W roku 2002 otrzymał tytuł profesora nauk technicznych. Związany z WAT od roku 1979. Obecnie główne jego zainteresowania naukowe to technologia in-line i aplikacje fotoniki światłowodowej dla potrzeb tele- i niatelekomunikacyjnych zastosowań.



e-mail: jarosz@wat.edu.pl

**Streszczenie**

Przedstawiono zrealizowaną koncepcję czujnika światłowodowego A-FORS (Autonomicznego Światłowodowego Sejsmografu Rotacyjnego) przeznaczonego do detekcji efektów rotacyjnych występujących podczas zdarzeń sejsmicznych. Główną cechą charakteryzującą układ A-FORS jest jego bardzo wysoka czułości rzędu  $3 \cdot 10^{-8}$  [rad/s] w 20 Hz paśmie detekcji. Układ realizowano w oparciu o światłowodowy interferometr Sagnaca, z zastosowaniem specyficznych rozwiązań optoelektronicznych mających na celu maksymalizację czułości, specyfikację pod konkretne zastosowanie oraz zapewnienie mobilności i niezależności. W prezentowanym czujniku bardzo istotnymi elementami są elektroniczny układ detekcji synchronicznej i bezprzewodowy system archiwizacji danych. Zaprezentowano też procedurę i wyniki skalowania układu w oparciu o pomiar prędkości obrotowej Ziemi.

**Słowa kluczowe:** światłowodowy interferometr Sagnaca, czułość, fale rotacyjne.

**A-FORS - Autonomous-Fiber Optic Rotational Seismograph****Abstract**

In the paper the concept of fiber-optic sensor A-FORS (Autonomous-Fiber Optic Rotational Seismograph) application to detection of rotation effects occurring during seismic events is presented. The main feature of the A-FORS is its very high sensitivity in the range of about  $3 \cdot 10^{-8}$  [rad/s] for 20 Hz detection band. The device is based on the fiber-optic Sagnac interferometer, involving specific optoelectronic solutions leading to maximum sensitivity and providing mobility and independence. The electronic synchronous detection system and wireless collection of data system are the main advantages of the sensor. The remote data transfer and active remote control of detection system parameters allow placing the device at any place active seismically and far from urban noise. Finally, The process of calibration and its outcome, based on measuring the speed of the Earth's rotation, is also presented. Detection of the constant component of the Earth's rotation for Warsaw latitude was used for the A-FORS calibration (Fig.4). Because the Sagnac phase shift detects only the absolute rotation speed in a plane of the interferometric loop, the A-FORS placed in the north or south direction should give the signal of rotation  $\Omega_E = \pm 9.18$  deg/h (Figs.5, 6). The sensor sensitivity was determined by comparing these signals with the noise level (Fig. 7).

**Keywords:** fibre-optic Sagnac interferometer, sensitivity, rotational waves.

**1. Wstęp**

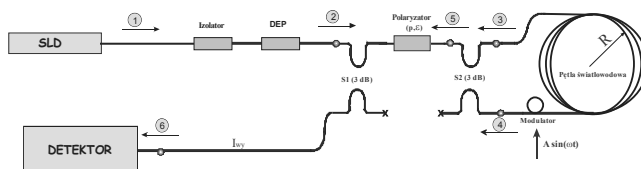
Rejestracja efektów rotacyjnych [1, 2] występujących podczas zdarzeń sejsmicznych wymaga budowy nowego rodzaju sejsmometru, ponieważ klasyczne sejsmometry są bezwładnościowymi czujnikami przyspieszenia liniowego (prędkości liniowej), zatem nie nadają się bezpośrednio do rejestracji ruchu obrotowego. Idealnym rozwiązaniem tego problemu jest zastosowanie jako sejsmometru rotacyjnego światłowodowego interferometru Sagnaca. Zasadniczym czynnikiem różniącym A-FORS od klasycznych konstrukcji giroskopów światłowodowych jest fakt, iż mierzy on

prędkość kątową a nie kąt [3, 4]. Dlatego też problem dryfu występujący w giroskopach optycznych jest tutaj praktycznie do pominięcia.

Optymalizacja układu, której głównym celem jest zapewnienie jak największej czułości systemu, wymaga maksymalizacji takich parametrów jako: promień pętli czujnika, moc optyczna źródła i długość użytego włókna. Kolejnym ważnym zagadnieniem jest zapewnienie mobilności takiego układu oraz bezawaryjnego przesyłania rejestrowanych danych.

**2. Budowa części optycznej A-FORS**

Na rys. 1 przedstawiono schemat części optycznej zbudowanego sejsmografu rotacyjnego A-FORS. W czujniku jako źródło zastosowano diodę superluminescencyjną o mocy  $P=20.87$  mW, środkowej długości fali  $\lambda=1328.4$  nm i szerokości widmowej 31.2 nm, pętlę światłowodową o promieniu  $R=0.335$  m zawierającą 15000 m światłowodu jednomodowego.



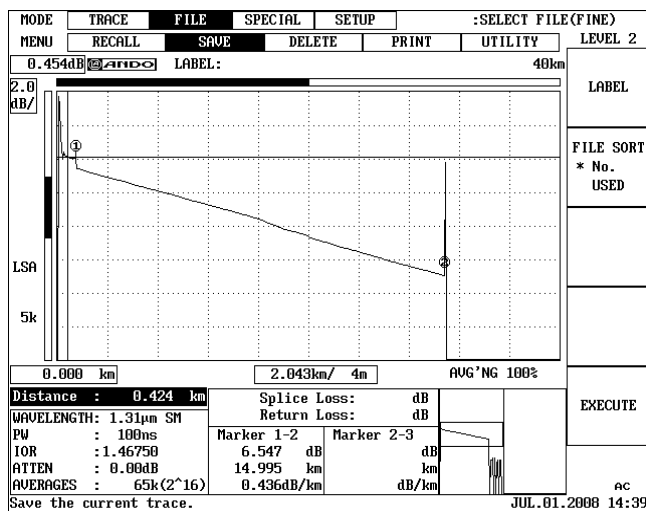
Rys. 1. Schemat części optycznej A-FORS  
Fig. 1. Scheme of the optical part A-FORS

Podłoże pod pętlę wykonane na zamówienie przez MEL PW zawiera w swej epoksydowej strukturze opiłki permaloju, jako element zabezpieczający izolację magnetyczną (rys. 2).



Rys. 2. Podłoże pętli światłowodowej  
Fig. 2. Base of the fiber loop

Zastosowany światłowód jednodomowy o katalogowej tłumienności 0.33 dB/km po nawinięciu na tak zaprojektowany korpus w wyniku występowania zagięcia toru oraz mikrozgięć na nierównościach wykazywał wzrost tłumienności do 0.436 dB/km (rys. 3). Całkowite straty części optycznej układu, uwzględniające straty wnoszone przez poszczególne elementy składowe interferometru, ostatecznie wyniosły 19.7 dB. Uwzględniając to oraz parametry geometryczne pętli światłowodowej teoretyczna czułość tak zbudowanego sejsmografu wyniosła  $9 \cdot 10^{-9}$  [rad/s] dla 20 Hz pasma detekcyjnego.



Rys. 3. Straty w pętli światłowodowej  
Fig. 3. Losses in the fiber loop

### 3. System detekcji i archiwizacji danych

Istota pomiaru bazuje na zastosowaniu detekcji synchronicznej na częstotliwości modulatora fazy wynoszącej 6.8 kHz. Stosując pomiar pierwszej ( $A_{\omega 1}$ ) i drugiej ( $A_{\omega 2}$ ) harmonicznej sygnału wyjściowego wyznaczane jest przesunięcie fazy Sagnaca jako [5]:

$$\Delta\phi = \arctan\left[k \cdot \frac{A_{\omega 1}}{A_{\omega 2}}\right] = \arctan\left[\frac{u(t)}{S_e}\right], \quad u(t) = \frac{A_{\omega 1}}{A_{\omega 2}} \quad (1)$$

gdzie:  $k$  – stała związana z parametrami sygnału modulatora.

Stąd uzyskuje się końcowe wyrażenie na wartość prędkości kąto-  
towej:

$$\Omega = S_o \arctan\left[\frac{u(t)}{S_e}\right] \quad (2)$$

gdzie:  $S_o$ ,  $S_e$  stałe, odpowiednio optyczna i elektroniczna układu.

Trudność w realizacji takiego rozwiązania polega na zapewnieniu dużego zakresu dynamiki przy równoczesnym pomiarze pierwszej i drugiej harmonicznej, gdyż ich wartości różnią się znacznie. Dlatego sygnał digitalizacją podlega filtracji za pomocą specjalnego filtra dolnoprzepustowego zapewniającego odpowiednie odseparowanie tych składowych. Następnie sygnał podawany jest na przetwornik AC – zastosowano odpowiednią konfigurację przetwornika ADS8361. Uzyskane w ten sposób sygnały cyfrowe zostają obrabiane na bazie procesora DSP. Jako optymalny wybrano procesor sygnałowy TMS320F28335 firmy Texas Instruments. Układ ten pracujący z częstotliwością 150MHz umożliwia wykonywanie 64-bitowych obliczeń. Obliczenia wykonywane są na ramkach sygnału o długości 1024 próbek 16-bitowych. Dalsza autorska metoda obróbki numeryczna sygnału pozwala na wyznaczenie składowych harmonicznych pierwszej

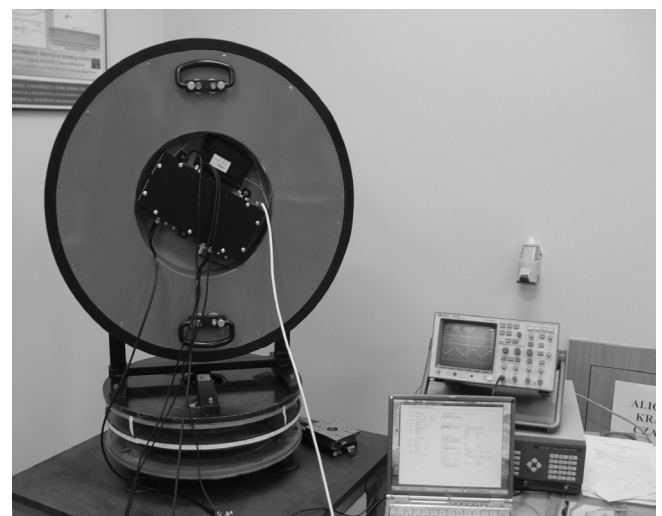
i drugiej rejestrowanego sygnału co daje na podstawie zależności (1, 2) poszukiwaną informację o prędkości kąto-  
wej.

Wyniki obliczeń przesyłane są za pomocą modułu komunikacyjnego do zdalnego serwera służącego do archiwizacji danych. Moduł komunikacyjny jest wyposażony w interfejs umożliwiający komunikację z lokalnym komputerem PC oraz modem GSM/GPRS. Zarówno komputer lokalny jak i serwer zdalny mogą być używane do odbierania i gromadzenia wyników pomiaru oraz sterowania parametrami urządzenia.

Takie rozwiązanie zapewnia, niezbędne przy rejestracji efektów rotacyjnych występujących podczas zdarzeń sejsmicznych, mobilność oraz niezależność czujnika.

### 4. Kalibracja czujnika

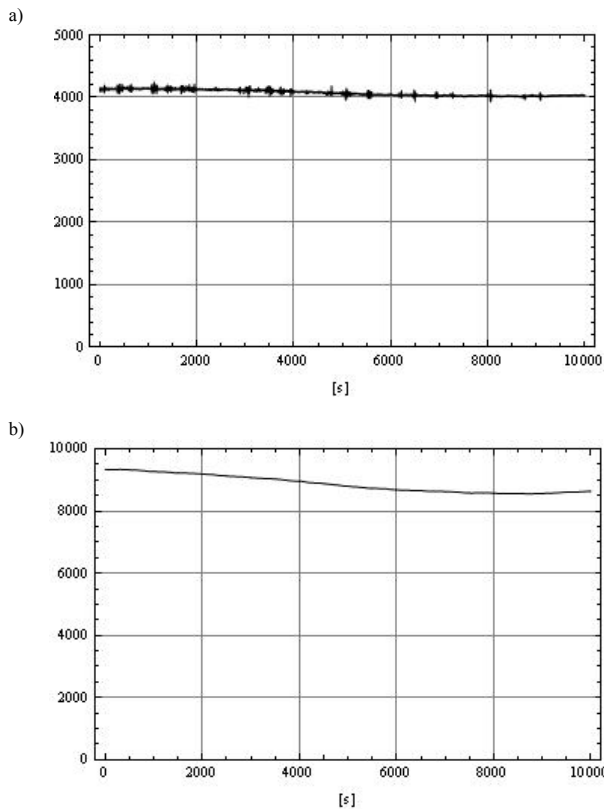
Poprawna praca systemu A-FORS wymaga określenia stałych optycznej  $S_o$  i elektronicznej  $S_e$  układu. W celu wyznaczenia tych stałych stosuje się skalowanie interferometru. Ponieważ układ nie rejestruje kąta a jedynie prędkość obrotu, zatem dla jego skalowania możliwe jest wykorzystanie pomiaru małej, dobrze zdefiniowanej prędkości obrotowej. Idealnym rozwiązaniem jest w tym wypadku skalowanie poprzez pomiar prędkości obrotowej Ziemi. Na rys. 4 przedstawiono układ podczas procesu kalibracji.



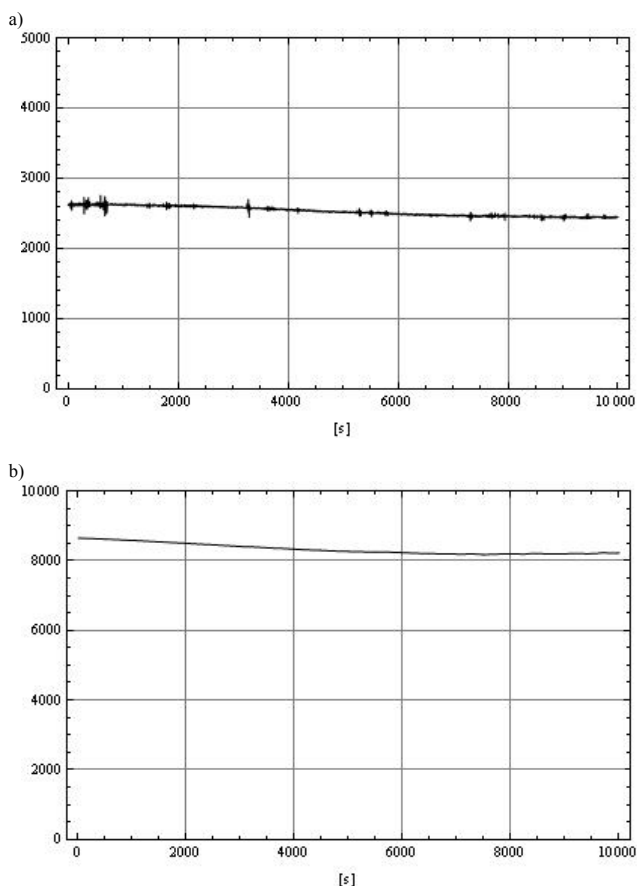
Rys. 4. Układ do kalibracji czujnika  
Fig. 4. Scheme of the optical part A-FORS

Interferometr Sagnaca jest czuły na prędkości kąto-  
padłe do jego płaszczyzny, stąd jeśli ustawimy go odpowiednio skierowanego N-S i S-N to jesteśmy w stanie zmierzyć wartość rzutu prędkości kąto-  
wej Ziemi, na danej szerokości geograficznej, na oś obrotu czujnika. Na wykresach 5 i 6 przedstawiono wyniki skalowania A-FORS. Na osi rzędnej wartości są w skali umownej.

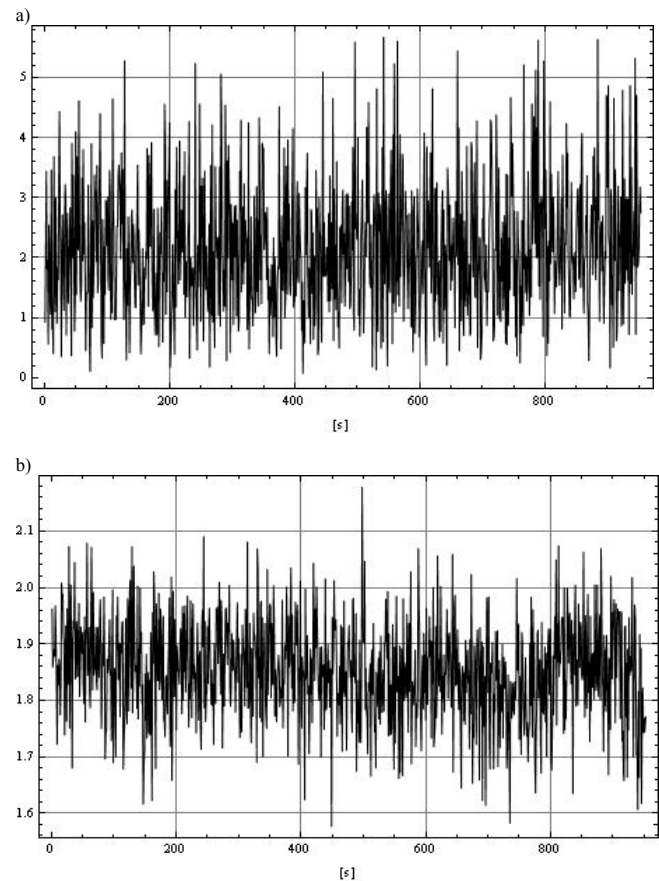
Różnica wskazań dla tych dwu położenia wynika z nieidealności ustawienia czujnika w pozycji pionowej oraz trudności zapewnienia jednakowych warunków pomiarowych. Z tak otrzymanych wyników wyliczono wartość średnią sygnału odpowiadającego prędkości obrotowej Ziemi na naszej szerokości geograficznej, czyli  $4.4 \cdot 10^{-5}$  [rad/s], a następnie wartości stałych: optycznej  $S_o$  i elektronicznej  $S_e$ . Porównując wartość sygnału podczas detekcji rotacji Ziemi z wartością szumów czujnika (rys. 7), uzyskanych przy braku napięcia modulacji na modulatorze, określono czułość układu na poziomie  $2.2 \cdot 10^{-8}$  [rad/s] dla 20 Hz pasma detekcyjnego, co oznacza iż jest ona około 2,5-krotnie gorsza od teoretycznie spodziewanej.



Rys. 5. a) Pierwsza harmoniczna (N-S); b) druga harmoniczna (N-S)  
 Fig. 5. a) First harmonic (N-S); b) second harmonic (N-S)



Rys. 6. a) Pierwsza harmoniczna (S-N); b) druga harmoniczna (S-N)  
 Fig. 6. a) First harmonic (S-N); b) second harmonic (S-N)



Rys. 7. a) Szum - pierwsza harmoniczna; b) szum - druga harmoniczna  
 Fig. 7. a) Noise- first harmonic; b) noise - second harmonic.

## 5. Wnioski

Prezentowany układ A-FORS ze względu na zastosowanie nowego systemu detekcji elektronicznej oraz nowatorskiego rozwiązania do przesyłania danych wydaje się być idealnym rozwiązaniem do rejestracji zdarzeń sejsmicznych. Czujnik ten mierząc jedynie bezwzględny obrót wolny jest od zaburzeń spowodowanych przez liniowe przemieszczenia. Ponadto posiadając czułość rzędu  $2.2 \cdot 10^{-8}$  [rad/s] wydaje się być bardzo obiecującym urządzeniem pod względem zastosowania przy pomiarze efektów rotacyjnych.

*Praca została zrealizowana w ramach dofinansowania przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego grantu N525-2166-33.*

## 6. Literatura

- [1] Teisseyre R.: Earthquake processes in a micromorphic continuum, *Pure Appl. Geophys.*, 102 (1973), 15-28.
- [2] Teisseyre R., Nagahama H.: Micro-inertia continuum: rotations and semi-waves, *Acta Geophys. Pol.*, 47 (1999), 259-272.
- [3] Jaroszewicz L. R., Krajewski Z., Solarz L.: The fiber-optic Sagnac interferometer application for recognition of the rotational seismic events, *Proc. of SPIE*, 5459 (2004), 272-280.
- [4] Jaroszewicz L. R., Krajewski Z., Solarz L.: Fiber-optic Sagnac interferometer as a sensor of the seismic rotation waves, *Proc. of SPIE*, 5855 (2005), 194-197.
- [5] Ostrzyżek A.: Analiza dokładności pomiaru prędkości kątowej w giroskopie światłowodowym, rozprawa doktorska, Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa, 1989.