

APARATURA BADAWCZA I DYDAKTYCZNA

Laboratoryjny giroskop światłowodowy

ZBIGNIEW KRAJEWSKI¹, JERZY KALWAS², ROMUALD JÓŹWICKI³

¹ WOJSKOWA AKADEMIA TECHNICZNA, INSTYTUT FIZYKI

² CENTRALNY OŚRODEK BADAWCZO ROZWOJOWY APARATURY BADAWCZEJ I DYDAKTYCZNEJ
COBRABiD sp. z o.o.

³ POLITECHNIKA WARSZAWSKA, INSTYTUT MIKROMECHANIKI I FOTONIKI

STRESZCZENIE

Omówiono w skrócie zasadę pomiaru prędkości kątowej obiektu za pomocą światłowodowego giroskopu oraz przedstawiono realizację laboratoryjnego modelu. Przytoczono wyniki pomiaru.

Laboratory fiber gyroscope

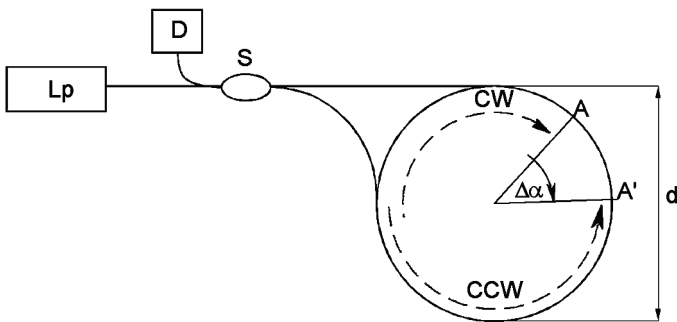
ABSTRACT

Measurement principle of the angular speed using a fiber gyroscope is shown shortly. The constructed laboratory model is described. Some measurement results are given.

1. PODSTAWY FIZYCZNE DZIAŁANIA GIROSKOPU

Działanie giroskopu światłowodowego bazuje na efekcie Sagnaca. Dokładna analiza tego efektu wymaga rozwiązania równań Maxwella w zakrzywionej przestrzeni inercjalnej [1]. Z uwagi na dość skomplikowane rozważania i ich trudną interpretację fizyczną zazwyczaj do rozwiązań technicznych wystarczający jest uproszczony model kinetyczny bazujący na propagacji promieniowania w kołowej drodze optycznej, zwłaszcza w pętli światłowodowej.

Idea budowy giroskopu światłowodowego jest przedstawiona na Rysunku 1. Z uwagi na miniaturyzację układu źródłem promieniowania jest zazwyczaj laser półprzewodnikowy Lp. Światłowód jednodomowy



Rysunek 1. Giroskop światłowodowy, Lp- laser, S-sprzęgacz, D-detektor

o długości kilkudziesięciu metrów jest nawinięty na cylindryczny rdzeń o średnicy d , a jego dwa końce połączone są w sprzęgaczu S. Im dłuższy światłowód, tym większa czułość układu na jednostkę kąta obrotu giroskopu. Na rysunku zaznaczono tylko czołowy zwój światłowodu. Promieniowanie lasera przez sprzęgacz S jest dzielone na dwie części, przy czym jedna część propaguje się w kierunku zgodnym z ruchem wskazówek zegara (CW), a druga w kierunku przeciwnym (CCW). Kierunki są zaznaczone liniami przerywanymi ze strzałkami wskazującymi na kierunki propagacji modów. Przeciwbieżnie propagujące się mody łączą się przez sprzęgacz, interferują ze sobą, a wynik interferencji jest rejestrowany przez detektor D. Jeżeli przez L oznaczy się długość światłowodu (od jednego końca sprzęgacza do drugiego) i przez n jego współczynnik załamania, to prędkość promieniowania w światłowodzie wynosi $v = c/n$, a czas obiegu promieniowania przez cały światłowód $\Delta t = Ln/c$. W tym czasie przy prędkości kątowej giroskopu ω_α giroskop obróci się o kąt $\Delta\alpha = \omega_\alpha \Delta t = \frac{nL}{c} \omega_\alpha$ i punkt A pierwszego zwoju światłowodu przemieści się do punktu A'. Każdy z końców światłowodu przemieści się o odcinek $\Delta l = 0,5d\Delta\alpha$, gdzie d jest średnicą cylindra, na który nawinięto światłowód. Dla zaznaczonego na rysunku kie-

runku obrotu droga promieniowania CW się wydłuży, a CCW – skróci. Między modami propagującymi się w przeciwnych kierunkach powstanie więc różnica faz równa [2]

$$\Delta\varphi = 2k\Delta l = \frac{2\pi nLd}{c\lambda_0} \omega_\alpha = S_0 \omega_\alpha \quad (1)$$

gdzie $k = 2\pi/\lambda$, λ – długość fali promieniowania w światłowodzie o współczynniku załamania n , λ_0 – długość fali w próżni, c – prędkość fali w próżni. Stała S_0 jest wielkością charakteryzującą zastosowane rozwiązanie techniczne. Zależność (1) jest podstawowym wzorem określającym działanie giroskopu światłowodowego.

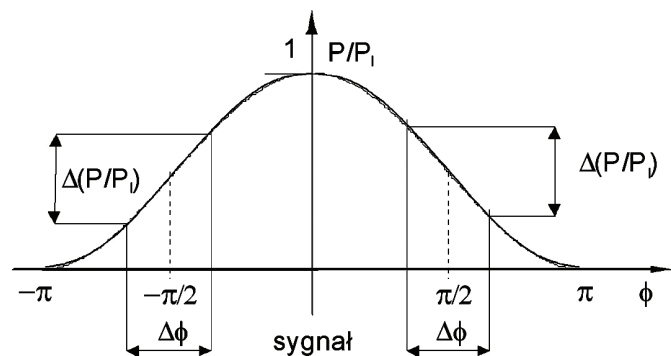
2. POMIAR FAZY

Pomiar małych prędkości kątowych ω_α wymaga zastosowania specjalnego elektronicznego układu detekcyjnego z uwagi na małe wartości przesunięcia fazowego $\Delta\varphi$. Układ taki nie rejestruje bezpośrednio zmiany fazowej, a zmianę mocy promieniowania wywołaną przez powyższą zmianę fazy. Jeżeli dla prostoty rozważań założymy, że sprzęgacz S (Rys. 1) dzieli moc transmitowanego promieniowania bezstratnie na dwie równe części, wówczas wynik interferencji przeciw bieżnych fal CW i CCW można opisać równaniem [3]

$$P = P_1 (1 + \cos \Delta\varphi) \quad (2)$$

gdzie P_1 jest mocą wiązki lasera. Zgodnie z (2) małe zmiany różnicy faz $\Delta\varphi$ wywołane małymi prędkościami kątowymi ω_α giroskopu są trudno rejestrowalne, a w technice ten zakres prędkości jest najbardziej istotny z punktu widzenia zastosowań.

W celu powiększenia czułości przesuwa się dynamiczny punkt pracy interferometru o $\pi/2$ za pomocą modulatora fazy umieszczonego na jednym z końców pętli światłowodowej. Jego efekt w sposób poglądowy został pokazany na Rysunku 2. Zmiana



Rysunek 2. Wpływ przesunięcia fazy f o $\pi/2$ na wynik pomiaru $\Delta(P/P_1)$ sygnału $\Delta\varphi$

fazy $\Delta\varphi$ wprowadza odpowiednią zmianę wyniku pomiaru $\Delta(P/P_1)$.

Ponieważ modulator znajduje się na brzegu pętli światłowodowej, to przeciwnie rozchodzące się fale doznają takiej samej modulacji, lecz nie w tym samym czasie. Jeżeli jedna z fal dociera do modulatora w chwili t , to fala rozchodząca się w przeciwną stronę dotrze do modulatora w chwili $(t+\tau)$, gdzie τ jest czasem przejścia fali przez pętlę światłowodową. W związku z tym różnica faz przeciwnie rozchodzących się fal wyniesie

$$\Delta\Phi_m = \Phi_m(t) - \Phi_m(t + \tau) \quad (3)$$

gdzie $\Delta\Phi_m(t)$ oznacza przesunięcie fazy wprowadzane przez modulator.

Jeżeli zastosujemy sinusoidalną modulację fazy za pomocą wspomnianego wcześniej modulatora, to znaczy

$$\Phi_m = \Phi_0 \sin(\omega_m t) \quad (4)$$

to zgodnie z (2) sygnał na detektorze możemy opisać za pomocą zależności [4]

$$P = P_1 \left\{ 1 + \cos(\Delta\varphi) \left[J_0(\Phi_e) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n}(\Phi_e) \cos(2n\omega_m t') \right] + 2 \sin(\Delta\varphi) \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n-1}(\Phi_e) \sin[(2n-1)\omega_m t'] \right\} \quad (5)$$

gdzie $t' = t + \tau/2$, a $\Phi_e = 2\Phi_0 \sin(\omega_m \tau/2)$ jest argumentem funkcji Bessela.

Z zależności (5) wynika, że składowe harmoniczne parzyste sygnału detektora są proporcjonalne do kosinusa z różnicy faz interferometru Sagnaca, zaś składowe nieparzyste – do sinusa z tej różnicy. Dlatego też składowe nieparzyste dają większe zmiany przy pomiarach małych prędkości kątowych (zmieniając znak na przeciwny przy zmianie kierunku obrotu – sinus jest funkcją nieparzystą). Jeżeli zastosujemy tzw. detekcję synchroniczną i wykonamy pomiar amplitud pierwszej (H_1) i drugiej (H_2) harmonicznej sygnału, to z ich ilorazu możemy otrzymać

$$\frac{H_1}{H_2} = \frac{J_1(\Phi_e)}{J_2(\Phi_e)} \operatorname{tg}(\Delta\varphi) \quad (6)$$

a więc

$$\Delta\varphi = \operatorname{arctg} \left[\frac{J_2(\Phi_e) H_1}{J_1(\Phi_e) H_2} \right] = \operatorname{arctg} \left[k \frac{H_1}{H_2} \right] \quad (7)$$

gdzie k jest ogólna stałą toru elektronicznego. Po uwzględnieniu (1) ostatecznie otrzymamy

$$\Omega = \frac{\Delta\varphi}{S_0} = C \operatorname{arctg}[k u(t)] \quad (8)$$

gdzie C i k są odpowiednio stałymi optycznymi i elektronicznymi układu, a $u(t) = H_1/H_2$ – detekowany sygnał synchroniczny będący stosunkiem odpowiednich amplitud sygnałów harmonicznych (ω_m oraz $2\omega_m$).

3. REALIZACJA UKŁADU GIROSKOPU ŚWIATŁOWODOWEGO

Budowę giroskopu można zrealizować za pomocą światłowodu dwójłomnego utrzymującego stan polaryzacji propagującej się wiązki lub z wykorzystaniem zwykłego światłowodu z zastosowaniem depolaryzatora w celu uniknięcia wpływu zjawiska polaryzacji. W obydwu układach stosuje się modulację fazy w pętli światłowodowej za pomocą modulatora w postaci pierścienia piezoceramicznego, na który nawija się światłowód. Pobudzenie napięciowe z generatora o odpowiedniej częstotliwości pozwala na dynamiczne przesunięcie punktu pracy interferometru. Układ elektronicznej detekcji powinien zapewniać rejestrację pierwszej i drugiej harmonicznej częstotliwości modulatora w sygnale wyjściowym.

Pozwoli to na podstawie przedstawionych wyrażeń teoretycznych oraz po uprzednim wyskalowaniu układu na wyznaczenie prędkości kątowej giroskopu. W celu rejestracji sygnałów wyjściowych można zastosować przetwornik A/C o odpowiedniej dynamice i szybkości rejestracji. Zarejestrowane dane można cyfrowo analizować za pomocą odpowiedniego oprogramowania pozwalającego na wyznaczenie widma sygnału.

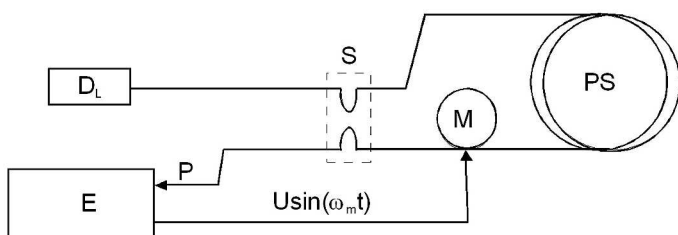
Na Rysunku 3 przedstawiony jest schemat ideowy układu wykonanego z zastosowaniem diody laserowej D_L generującej promieniowanie o długości fali 635 nm, modulatora piezoelektrycznego M i sprzęgacza S . W celu zmniejszenia niekorzystnego wpływu zmian stanu polaryzacji modów propagujących się w pętli światłowodowej PS w torze nadawczym i odbiorczym zastosowano niezaznaczone na rysunku korektory stanu polaryzacji. Układ elektroniczny E zawiera generator i układ detekcyjny. Zadaniem generatora jest przyłożenie zmiennego napięcia $U \sin(\omega_m t)$ o częstotliwości kołowej ω_m do modulatora M w celu wprowadzenia zmiennej fazy obydwu modów propagujących się w pętli światłowodowej. Amplituda U powinna być na tyle duża, aby można wymienioną zmianą obejmować również przesunięcia fazy o $\pi/2$. Układem detekcyjnym jest dioda

półprzewodnikowa pracująca jako źródło fotowoltaiczne wraz z oscyloskopem cyfrowym, co umożliwia zapisywanie spróbkowanego sygnału w formie cyfrowej w pamięci *flash*. Najlepszym rozwiązaniem jest zastosowanie nanowoltomierza selektywnego, który jest w stanie mierzyć bezpośrednio wartości składowych harmonicznym zawartych w analizowanym sygnale. Zastosowanie dowolnego przetwornika AC o odpowiedniej prędkości próbkowania i co najmniej 16 bitowej dynamice jest także możliwe.

Na Rysunku 4 pokazana jest fotografia laboratoryjnego układu zrealizowanego zgodnie ze schematem przedstawionym na Rysunku 3. Giroskop zamocowa-

no na stoliku obrotowym (1) umożliwiającym zadanie ruchu rotacyjnego o żądanym kierunku i wartości prędkości kątowej. Na stanowisku znajduje się ponadto generator sygnału podawanego na modulator fazy (2), oscyloskop cyfrowy (3) lub opcjonalnie nanowoltomierz Lock-in (4).

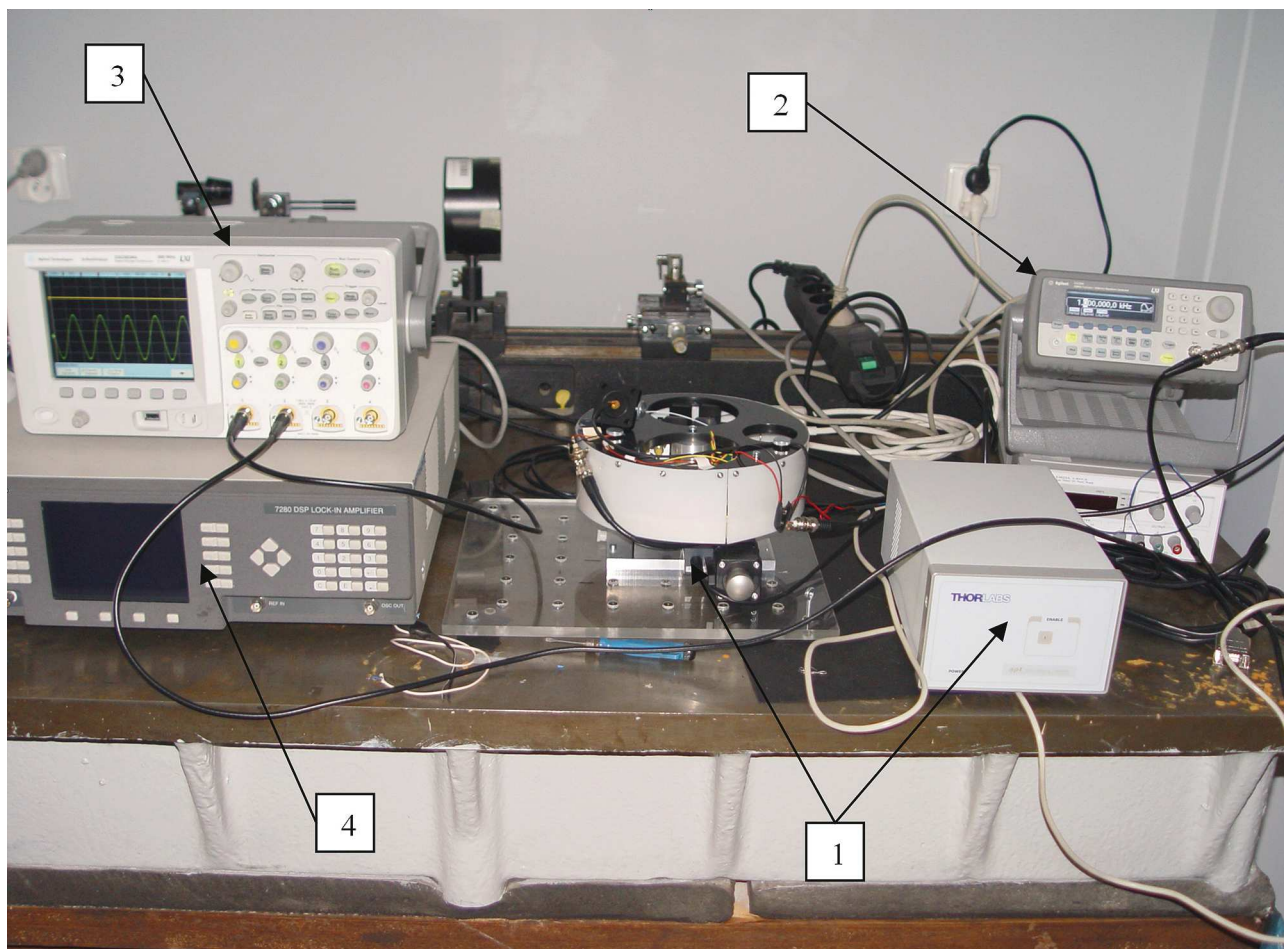
Generator ustawiony został na optymalną częstotliwość 8 kHz, dobraną eksperymentalnie, oraz maksymalną amplitudę 10 V. Poprawnym ustawieniem układu sterowanym przez nastawniki stanu polaryzacji jest uzyskanie sygnału wyjściowego w postaci drugiej harmonicznej (bez zniekształceń) przy braku pobudzenia rotacyjnego.



Rysunek 3. Schemat ideowy giroskopu. D_L -dioda laserowa, S-sprzęgacz, PS- pętla światłowodowa, M-modulator piezoelektryczny, E-układ elektroniczny

4. ANALIZA NUMERYCZNA SYGNAŁÓW Z INTERFEROMETRU SAGNACA

Sygnały z interferometru zostały zapisane za pomocą oscyloskopu cyfrowego w pamięci masowej i mogą być dowolnie numerycznie obrabiane. W celu wyznaczenia prędkości kątowej zgodnie z zależnościami (5)-(8) niezbędne jest wyznaczenie amplitudy pierwszej i drugiej harmonicznej sygnału wyjściowego. Amplitudy te wyznaczymy za pomocą transformaty



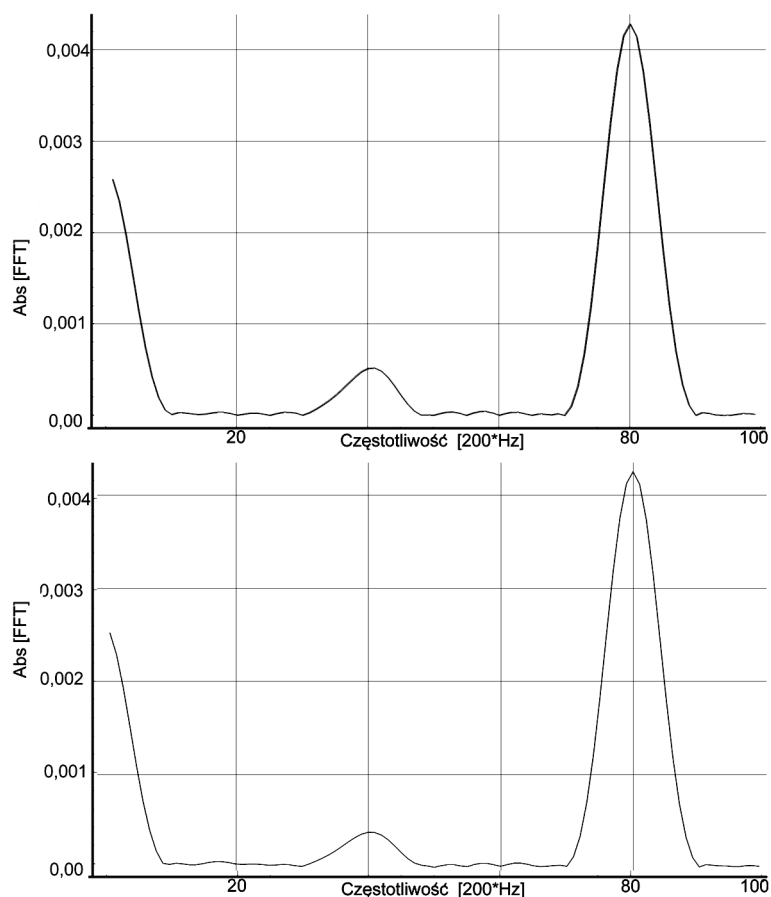
Rysunek 4. Zestawiony układ badawczy. 1 – stolik obrotowy z zasilaczem, 2 – generator modulatora fazy, 3 – oscyloskop cyfrowy, 4 – nanowoltomierz

Fouriera tego sygnału [5, 6]. Na Rysunku 5 pokazane są moduły transformaty Fouriera sygnału w paśmie 0-100 kHz przy obrocie stolika z prędkością kątową $10^0/s$ zgodnie z kierunkiem ruchu wskazówek zegara (Rys. 5a) i w kierunku przeciwnym (Rys. 5b).

Przy obrocie zgodnie z ruchem wskazówek zegara wartości tych amplitud wynoszą odpowiednio: 1-wsza harmoniczna – 0,00034 V, 2-ga harmoniczna – 0,0039 V (Rys. 5a). Amplituda pierwszej harmonicznej jest prawie 10 razy mniejsza od wartości amplitudy drugiej harmonicznej. Wynika to z małej prędkości obrotowej pobudzenia, w stosunku do uzyskanej czułości układu. Dla obrotu w przeciwnym kierunku ma odpowiednio 0,00048 V i 0,0040 V.

5. PODSUMOWANIE

Wykonane badania wykazały, że przy zaproponowanym rozwiązaniu możliwe są pomiary przy prędkości kątowej nie niższej niż 0,5 stopnia/sek. Poniżej tej prędkości zbyt duże jest płynięcie sygnału niepozwalające jednoznacznie i powtarzalnie wykonać pomiary. Górny zakres praktycznie jest ograniczony możliwościami mechanicznymi stolika.



Rysunek 5. Moduły transformaty Fouriera sygnału wyjściowego przy obrotach stolika w dwóch kierunkach

Podziękowanie

Realizacja giroskopu była możliwa dzięki wsparciu finansowemu przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego w ramach projektu rozwojowego nr N R01 0022 04/2008.

LITERATURA

- [1] Post E.J.: Sagnac Effect. Reviews of Modern Physics. 1967, 39, 475-493.
- [2] Józwicki R.: Technika laserowa i jej zastosowania. Warszawa, Oficyna Wydawnicza Pol. Warszawskiej, 2009, 165.
- [3] Józwicki R.: Podstawy inżynierii fotonicznej. Warszawa, Oficyna Wydawnicza Pol. Warszawskiej, 2009, 101.
- [4] Abramowitz M., Stegun I.: Handbook of mathematical functions with formulas, graphs and mathematical tables. Washington, National Bureau of Standards, 1964, 361.
- [5] Szabatin J.: Podstawy teorii sygnałów. Warszawa, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, 2007, 245-378.
- [6] Bracewell R.: Przekształcenie Fouriera i jego zastosowania. Warszawa, WNT, 1968 (tłum. z ang.).