

Laserowe przetworniki żyroskopowe do pomiaru parametrów ruchu obrotowego

Zygmunt Lech Warszawa

W artykule omówiono przetworniki żyroskopowe oparte na idei interferometru Sagniaca bez części ruchomych w torze optycznym. Podano ich układy pomiarowe, parametry metrologiczne i użytkowe oraz ograniczenia i jako alternatywę – interferometri typu L wg pomysłu polskich twórców (PAR 9/2006).

Optyczne przetworniki interferometryczne stosuje się m.in. w dokładnych pomiarach wielkości geometrycznych w przemyśle maszynowym i elektrotechnicznym [1], w badaniach właściwości optycznych materiałów oraz w nanometrii i analizie obrazów [2]. W ostatnich dziesięcioleciach opracowano jednolaserowe dwuwiaźkowe żyroskopy pierścieniowe o symbolu RLG (*Ring Laser Gyroscopes*), a następnie żyroskopy światłowodowe FOG (*Fiber-Optic Gyroscopes*) jako inercjalne przetworniki do pomiarów kierunku i kąta obrotu [3]. Działają one podobnie jak klasyczny interferometr Sagniaca z 1910 r., ale są wytwarzane z wykorzystaniem najnowszych możliwości technologicznych optyki i elektroniki. Podstawą ich działania jest stałość prędkości światła w ośrodku jednorodnym (próżnia, powietrze, światłowód) i jej niezależność od prędkości źródła i detektora. Przy prędkości obrotowej przetwornika zgodnej z kierunkiem obiegu wiązki światła droga tej wiązki wydłuża się i faza wzrasta, zaś dla wiązki o kierunku przeciwnym – w takim samym stopniu maleje. Ich tory optyczne nie zawierają części ruchomych. Sygnał wyjściowy detektora obserwującego interferencję obu wiązek zależy od ich wypadkowej różnicy fazy $\Delta\varphi$. Jest ona proporcjonalna do zmiany prędkości

kątowej $\varpi_r = \frac{d\alpha}{dt}$ układu od jej

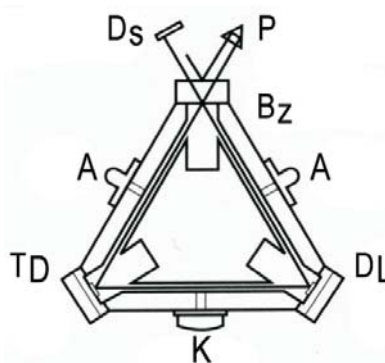
wartości początkowej (zwykle $\omega_{r0} = 0$) i stanowi podstawowy sygnał pomiarowy takich przetworników, wykrywany jako zmiana długości fali $\Delta\lambda$ lub różnica częstotliwości Δf [3]. Po scałkowaniu tego sygnału otrzymuje się przyrost kąta obrotu α od położenia początkowego, a po zróżniczkowaniu przyspieszenie kątowe. Różnicę fazy $\Delta\varphi$ wiązek przetwornika mierzy się w różnych układach optoelektronicznych. Takie inercjalne prze-

tworniki żyroskopowe buduje się na ogół z ciągłymi źródłami laserowymi [3, 4, 8]. Opracowano też prototypowe rozwiązania ze źródłami impulsowymi [6]. Produkowane są przetworniki do pomiaru parametrów obrotu względem jednej, dwu oraz trzech osi. Oparte są na nich inercjalne systemy nawigacji i sterowania morskie i lotnicze, do celów wojskowych i cywilnych. Przetworniki te są już dostępne jako niedrogie moduły scalone wraz z elektroniką do badania parametrów jazdy samochodów i do systemów ich nawigacji współpracujących z odbiornikiem sieci satelitarnej GPS, do robotów przemysłowych, stabilizacji platform o różnym przeznaczeniu i do opracowanych ostatnio jednoosobowych transporterów jednoosiowych typu Segway. Możliwości tych przetworników są ogromne, ale w Polsce są one jeszcze zbyt mało znane.

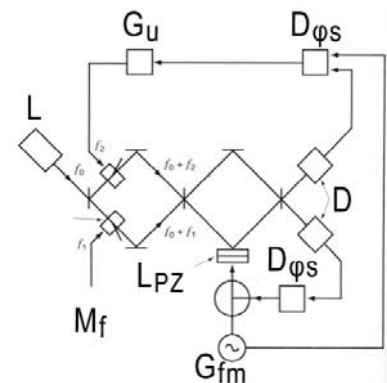
Układy optoelektronicznych przetworników żyroskopowych typu Sagniaca

Interferometryczne pierścieniowe żyroskopy laserowe

Na rys. 1 [3] przedstawiono podstawowe rozwiązania laserowych przetworników żyroskopowych RLG



Rys. 1a. Jednoosiowy pierścieniowy żyroskop laserowy RLG o trójkątnym kształcie dwukierunkowego toru optycznego [wg 3, 4]: A – anoda, DS – detektor sygnału, P – pryzmat, Bz – blok ze szkła ceramicznego (zerodur), DL – detektor kontroli długości, K – katoda, TD – przetwornik do kontroli długości



Rys. 1b. Schemat blokowy pierścieniowego żyrotora z zewnętrznym laserem i eliminacją blokady Δf przy małych prędkościach obrotu [wg 3]: L – laser, G_U – generator o stabilizowanym napięciu, D_{φ_s} – nadajny detektor fazy (*serwo*), D – detektory, LPZ – lustro poruszane piezoelektrycznie, M_f – (*driver*) modulator przebiegiem o stałej częstotliwości f_1 , G_{fm} – generator o częstotliwości f_m

doc. (em.) dr inż. Zygmunt Lech
Warszawa – Polskie Towarzystwo
Metrologiczne, Warszawa

(*Ring Laser Gyroscopes*), aktywnego ARLG i pasywnego PRLG, opracowanych przed erą przetworników światłowodowych. Zasadę budowy czujnika prędkości obrotowej w postaci żyroskopu z wewnętrznym dwukierunkowo promieniującym laserem o torze optycznym w kształcie idealnego pierścienia bez części ruchomych podał Schultz-Du Bois w 1966 r. Macek opracował jego prototyp o torze kwadratowym, a następnie pojawiło się rozwiązanie o torze trójkątnym, podane na rys. 1a. W kanale zamkniętym wewnątrz bloku ze specjalnego szkła ceramicznego lub krzemu, dzięki niemal bezstratnym (1%) odbiciom światła w wierzchołkach trójkąta, dwie wiązki świetlne wytwarzane przez laser He-Ne cyrkulują w przeciwnych kierunkach. Przy odpowiednim doborze długości toru dla nieobracającego się przetwornika tworzą one stacjonarny obraz interferencyjny. Przy obracaniu się żyroskopu różne stają się długości dróg, które przebywają w tym samym czasie obie wiązki światła poruszające się w przeciwnych kierunkach ze stałą prędkością i różne też są ich czasy obiegu toru zamkniętego. Zmienia się obraz interferencji w obszarze detekcji, gdyż pomiędzy wiązkami powstaje przesunięcie fazowe zależne od wartości i zwrotu prędkości kątowej. Różnicy faz odpowiada różnica częstotliwości wiązek Δf wykrywana przez fotodetektor. Przy małych prędkościach zjawiska relatywistyczne są pomijalne i Δf liniowo zależy od przyrostu prędkości kątowej $\Delta\omega_r$ przetwornika:

$$\Delta f = \frac{4Af}{ncL} \Delta\omega_r \quad (1)$$

gdzie:

- A – powierzchnia objęta przez wiązki światła,
- L – długość drogi wiązki,
- λ – długość fali światła,
- c – prędkość światła w próżni,
- f – częstotliwość źródła światła spójnego,
- n – współczynnik załamania światła (*refraction index*) toru optycznego względem próżni (dla powietrza ok. 1).

Wartość Δf jest podstawowym sygnałem umożliwiającym pomiary zmian prędkości obrotu $\Delta\omega_r$. Interferujące wiązki doprowadza się do fotodetektora D_S i różnicę Δf mierzy się w układzie elektronicznym.

Obok takich zalet jak zwarta konstrukcja bez części ruchomych i niezawodność, przy małych prędkościach obrotu główną występuje wada tego rozwiązania w postaci strefy nieczułości, tj. zjawisko blokady sygnału różnicy częstotliwości (*frequency lock in*) w wyniku wymiany energii pomiędzy wiązkami wskutek nieznacznych wstecznych odbić. Obie wiązki synchronizują się na wypadkowej częstotliwości. Ok. 1970 r. opracowano metodę likwidacji tego zjawiska poprzez piezoelektryczne wzbudzenie drgań mechanicznych układu (mechaniczny *dithering*, typowo: ± 100 arcsek, 400 Hz). Ponadto w układzie powstaje przypadkowy dryft narastający w funkcji czasu wg pierwiastka kwadratowego. Przy randomizacji drgań osiągnięto strefę nieczułości $< 0,002$ °/h i pełzanie $(0,001-0,003)$ °/h^{1/2}.

Wystarczyło to dla wielu zastosowań i ok. 1980 r. żyroskopy te zaczęto stosować powszechnie w nawigacji zamiast ich wersji mechanicznych. Inne metody eliminacji strefy nieczułości to: stosowanie pasywnego rezonatora [3] oraz lasera impulsowego [5]. Ponadto w żyroskopie występuje też ograniczenie wzmocnienia sygnału wynikające z szumu kwantowego.

W pasywnych optycznych przetwornikach żyroskopowych (PRLG) laser jest dołączany z zewnątrz do pierścieniowego toru optycznego. Na rys. 1b podano schemat żyroskopu PRLG pracującego w układzie otwartym (struktura kaskadowa) z eliminacją strefy nieczułości poprzez piezoelektryczne wzbudzenie drgań jednego z luster. Wady tej konstrukcji to: duża objętość oraz nieco wyższy poziom dolnego ograniczenia czułości ze względu na fotonowy szum śrutowy (*photon shot noise level*) [3].

Oba rozwiązania żyroskopów RLG są dość kosztowne ze względu na wymaganą dużą precyzję wykonania, czystość środowiska produkcyjnego i stabilność konstrukcyjną toru optycznego oraz konieczność stabilizacji prądu lasera i stosowanie układu do *ditheringu*.

Światłowodowe przetworniki żyroskopowe

Zasadę interferometru Sagniaca wykorzystują też światłowodowe przetworniki żyroskopowe o symbolu FOG (*Fiber Optic Gyroscopes*). One również mierzą zmiany prędkości obrotowej, są nieco mniej dokładne, ale znacznie łatwiejsze do wytwarzania niż poprzednie. W przetwornikach tych stosuje się światłowód w postaci wielozwojowej cewki, który zastępuje zaproponowany pierwotnie przez Schultza-DuBoisa pierścień laserowy. Pojedynczą wiązkę światła z lasera dzieli się na dwie przebiegające przez ten sam światłowód w przeciwnych kierunkach. Źródłem światła jest dioda luminescencyjna o niskiej koherencji emitowanej wiązki. Układ jest czuły na podstawowy mod tej wiązki. Światłowód powinien być jednorodny oraz utrzymujący polaryzację wiązki, gdyż światło o różnej polaryzacji ma w nim różne prędkości. Na końcu drogi dwu wiązek przebiegających przeciwnie bada się ich interferencję. Różnicę fazy zależną od zmiany prędkości kątowej wykrywa się dwójako, tj. metodą interferencyjną w żyroskopach o symbolu IFOG działających w układzie optoelektronicznym otwartym lub zamkniętym oraz metodą rezonansową w żyroskopach rezonansowych RFOG [3].

Światłowodowy interferencyjny przetwornik żyroskopowy IFOG o układzie otwartym

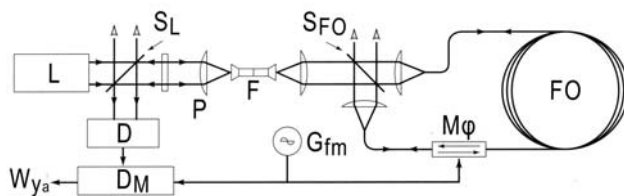
W przetwornikach IFOG przesunięcie fazy $\Delta\varphi$ w obrazie prążków jest związane ze zmianą prędkości obrotowej $\Delta\omega_r$ wg zależności:

$$\Delta\varphi = \frac{LDn}{\lambda c} \Delta\omega_r \quad (2)$$

gdzie:

- L i D – długość światłowodu i średnica jego zwoju,
- λ – długość fali,
- c – prędkość światła w próżni,
- n – współczynnik załamania światła dla materiału światłowodu (*refraction index*).

Stabilność wskazań zależy od długości L światłowodu i średnicy jego zwoju D oraz długości fali świetlnej λ . Osiąga się czułość poniżej 1 μ rad. Ograniczenie dokładności nie jest związane z optyką, a głównie z szumami układów elektronicznych i długością światłowodu. Jako typowe stosuje się długości fali: 860, 1330 i 1550 nm. Krótsze fale tworzą sygnał o większej częstotliwości. Typową konfigurację układu otwartego podano na rys. 2.



Rys. 2. Uproszczony schemat światłowodowego żyroskopu IFOG o układzie otwartym i wyjściu analogowym [wg 3]: L – źródło światła, S_L – płytka dzieląca światło (light splitter) źródła, P – polaryzator, F – filtr, S_{FO} – płytka dzieląca światło światłowodu, FO – zwój światłowodowy, M_φ – modulator fazy, G_{fm} – generator elektroniczny, D_M – demodulator, W_{y_a} – wyjście analogowe

Zawiera on diodę laserową jako źródło światła, sprzęgacz kierunkowy tego źródła z detektorem, polaryzator, sprzęgacz cewki z układem i cewkę światłowodową zastępującą pierścień Sagniacza. Pierwszy ze sprzęgaczy służy też do izolacji szerokopasmowego źródła optycznego i detektora. Sygnał powrotny omija laser i jest odbierany przez fotodetektor. Aby rozróżnić kierunek, potrzebne jest dodatkowe stałe przesunięcie fazy sygnału optycznego o $\pi/2$. Wówczas układ prążków utworzonych na końcu drogi przez dwie wiązki o przeciwnych kierunkach propagacji zmienia się wraz z prędkością kątową w taki sposób, że zagęszcza się dla jednego kierunku obrotu i rozrzedza dla drugiego. Całkowanie mierzzonego sygnału daje zmianę kąta lub może służyć jego uśrednianiu.

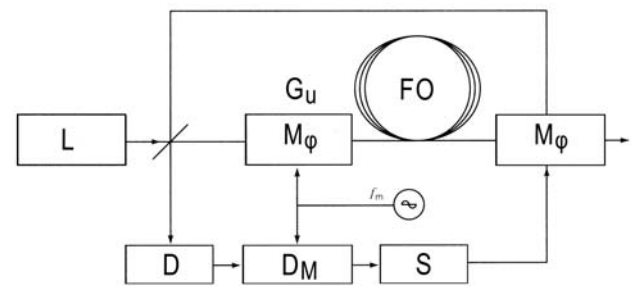
Wadą układu w stosunku do innych rozwiązań jest nieliniowa zależność funkcji przetwarzania, niestabilność dodatkowego przesunięcia fazowego, wymagany dość długi światłowód, ograniczony zakres w stosunku do żyroskopów typu ARLG, zależność współczynnika czułości od dryftu elementów analogowych i intensywności źródła światła. Zalety to: niskie koszty wytwarzania, duża odporność na udary i wibracje, niezależność od grawitacji i obrotów względem osi prostopadłych, niekrytyczny wpływ geometrii cewki, szybka odpowiedź układu, duża czułość w stosunku do poziomu dryftu fazy odniesienia i pełzania (długoczasowego dryftu).

Rozwiązanie to nadaje się do stosowania w tanich i prostych systemach o średniej dokładności, takich

jak żyrokompassy do nawigacji samochodów, wskaźniki zmiany kąta i liczniki obrotów oraz stabilizatory położenia. Szereg tego rodzaju żyroskopów IFOG o wyjściu analogowym i cyfrowym stosuje się w technice wojskowej, w przemyśle – głównie w robotach, pojazdach i do stabilizacji platform oraz w helikopterach rolniczych i z kamerami do obserwacji oraz nadzoru z powietrza.

Światłowodowy interferencyjny przetwornik żyroskopowy IFOG o układzie zamkniętym

Żyroskopy światłowodowe IFOG o układzie zamkniętym stosuje się przy wymaganej większej dokładności pomiarów, tj. dopuszczalnym dryfcie rzędu 0,001 – 0,01 $\%/h$ i niestabilności współczynnika przetwarzania poniżej 100 ppm. Przetwarzanie sygnału w tych przetwornikach jest bardziej skomplikowane niż w poprzednich o układzie otwartym i wyjściu analogowym. Uproszczony schemat jednego z takich układów przedstawiono na rys. 3. Stosuje się tu pętlę sprzężenia



Rys. 3. Uproszczony schemat światłowodowego żyroskopu IFOG o układzie zamkniętym z zerowaniem fazy [wg 3]: L – źródło światła, D – detektor, D_M – demodulator, M_φ – nieodwracalny modulator fazy, T_φ – przetwornik fazy, FO – zwój światłowodowy, S – układ nadążny (serwo)

zwrotnego. Sygnał wyjściowy demodulatora steruje, za pomocą układu S, jednym z nieodwracalnych przetworników fazy M_φ , tak, aby przesunięcie fazy pomiędzy wiązkami, indukowane przez obrót przetwornika, sprowadzić do zera w stanie równowagi. Odpowiada mu zmiana częstotliwości:

$$\Delta f = \frac{4AN}{n\lambda L} \Delta\omega_r = \frac{Df}{nc} \Delta\omega_r \quad (3)$$

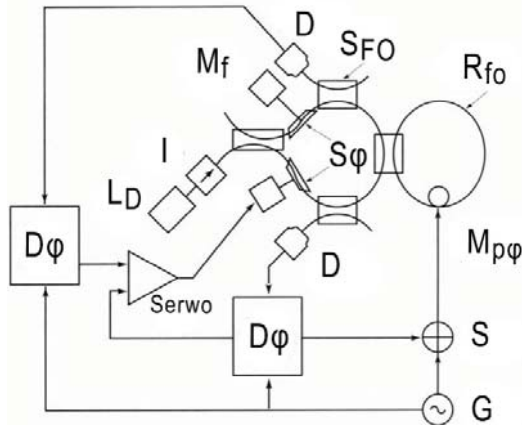
gdzie:

- A – powierzchnia objęta przez wiązkę optyczną,
- L – długość drogi wiązki,
- N – liczba zwojów i $D = 2R$ – średnica kołowego zwoju światłowodu,
- λ – długość fali światła i c – jego prędkość w próżni,
- f – częstotliwość źródła światła spójnego,
- n – współczynnik załamania światła dla materiału światłowodu względem próżni (*refraction index*).

Zmiana Δf jest cyfrowym sygnałem wyjściowym linowo zależnym od zmiany prędkości obrotu.

Światłowodowy żyroskopowy przetwornik rezonansowy RFOG

To rozwiązanie przetwornika żyroskopowego o symbolu RFOG stało się ostatnio bardzo popularne. Schemat ilustrujący działanie jego układu optoelektronicznego przedstawia rys. 4.



Rys. 4. Schemat budowy światłowodowego rezonatora pierścieniowego RFOG [3]: $D\phi$ – detektor fazoczuły, L_D – dioda laserowa, I – izolator, M_f – modulator (*driver*) przebiegiem o stałej częstotliwości f_1 , D – detektor, S_{FO} – sprzęgacz światłowodowy, S_ϕ – przesuwnik fazy, R_{FO} – pierścieniowy rezonator światłowodowy, $M_{p\phi}$ – modulator piezoelektryczny fazy, G – generator, S – sumator

Pasywnym rezonatorem jest wielozwojowa pętla światłowodowa R_{FO} o końcach sprzężonych ze sobą optycznie. Światło z lasera L_D , po podzieleniu na dwie wiązki, jest modulowane częstotliwościowo (FM) i propaguje się w pętli R_{FO} w przeciwnych kierunkach. Długość światłowodów w stanie spoczynku odpowiada całkowitej liczbie długości fal. Przy rotacji drogi wiązek się różnią. Sprzęgacze wyjściowe S_{FO} wykrywają natężenie energii w pętli. Zdemodulowany sygnał wyjściowy z detektorów zawiera piki rezonansowe odległe o różnicę częstotliwości

$$\Delta f = \frac{Df}{nc} \Delta\sigma_r \quad (4)$$

W praktyce laser stroi się do rezonansu dla jednej z wiązek, a steruje się drugą do rezonansu za pomocą elektrooptycznego przesuwnika częstotliwości.

Zalety przetworników rezonansowych RFOG to: duża niezawodność i trwałość (długi czas eksploatacji), krótki czas startu i ustalania się wskazań oraz małe wymiary i masa. Wymagają one 10–100 razy krótszego światłowodu niż przetworniki interferencyjne IFOG, tj. rzędu 50 – 100 m, gdyż wiązki światła obiegają pętlę wielokrotnie. Dolne ograniczenie sygnału, tak jak i w przetwornikach interferencyjnych, wynika z poziomu szumu śrutowego (*shot-noise level*). Wady to: konieczność stosowania źródła o wysokiej koherencji oraz światłowodu o bardzo małym tłumieniu.

Ocena stanu techniki żyroskopów optycznych

Interferencyjne żyroskopy laserowe RLG typu Sagniac'a i od niedawna światłowodowe FOG jako przetworniki i oparte na nich systemy wyspecjalizowane do wielu zastosowań produkuje do celów militarnych i cywilnych szereg firm, m.in. w USA: grupa Northrop Grumman wspólnie z Sperry Marine, Naval i Litef GmbH; Crossbow Technology Inc., w Japonii: Hitachi i inne). Stosuje się je w nawigacji morskiej i lotniczej, pociskach sterowanych, do badania dynamiki samochodów w ruchu i orientacji o ich położeniu, do stabilizacji statków i platform roboczych oraz do robotów [5] (np. firmy: Andrew Corporation, KVH Industries Inc.). Przykłady rozwiązań przetworników żyroskopowych podano na rys. 5–8, a tani układ do trzyosiowej stabilizacji platformy – na rys. 9 [3]. Prowadzone są też prace badaw-



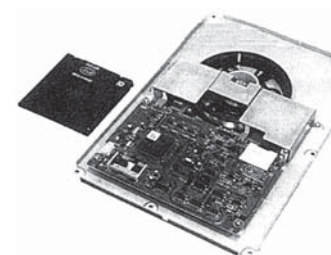
Rys. 5. Żyroskopy FOG firmy Northrop Grumman a) z lewej: jednoosiowe – dokładność wzrasta ze średnicą, b) z prawej od góry: jedno-, dwu- i trójosiowy



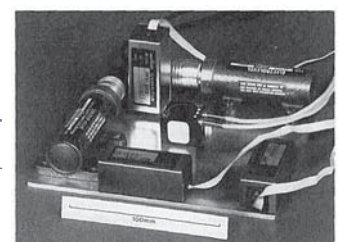
Rys. 6. Światłowodowy trójosiowy układ inercjalny LN200 firmy Northrop Grumman (z prawej – po zdjęciu pokrywy)



Rys. 7. Światłowodowy jednoosiowy przetwornik żyroskopowy IFOG o układzie otwartym firmy AUTOGYRO® [3]

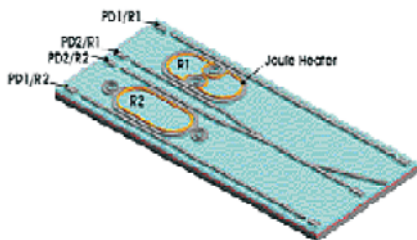


Rys. 8. Żyroskop FOG do auta Mark II Toyota [4]

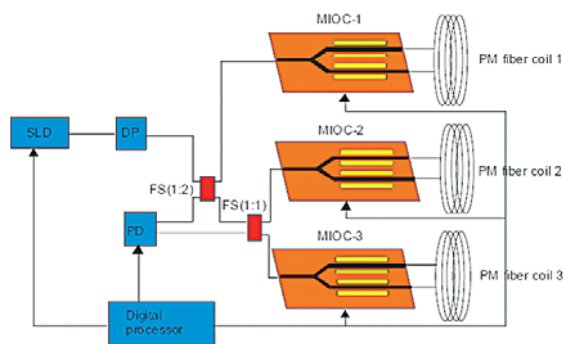


Rys. 9. Prosty trójosiowy układ INS do stabilizacji platformy robota [3]

cze nad doskonaleniem optoelektronicznych układów pomiarowych żyroskopów i scalaniem ich elementów optycznych. Np. w Uniwersytecie stanu New Mexico (USA) opracowano modele żyroskopu z półprzewodnikowym laserem impulsowym [6] i pod kierunkiem prof Marka Osinskiego prototypowy dwupętłowy element światłowodowy [7] bez blokady sygnału różnicy częstotliwości (*frequency lock-in*) przy małej prędkości kątowej – rys. 10. Instytut Technologii Elektronicznej z Moskwy oferuje optyczne układy scalone żyroskopu światłowodowego o układzie zamkniętym jedno- oraz trójosiowe – rys. 11 [8].



Rys. 10. Dwupętłowy element światłowodowy żyroskopu FOG [7]



Rys. 11. Schemat ideowy scalonego trójosiowego światłowodowego żyroskopu FOG [8]: SLD – źródło światła, DP – depolaryzator, FS – sprzęgacz światłowodowy, PD – fotodetektor, MIOC – wielofunkcyjne zintegrowane „chipy” optyczne, PM – wielozwojowe cewki światłowodowe

Więcej szczegółów budowy żyroskopów i interferometrów laserowych można znaleźć w załączonej bibliografii, w tym głównie w rozdziale o żyroskopach poradnika techniki pomiarowej [3] i w pozycjach bibliografii w nim podanych oraz w publikacjach i materiałach firmowych zamieszczanych w Internecie. Inercjalny system do nawigacji opracowano też w Polsce w Przemysłowym Instytucie Telekomunikacji w Warszawie [13]. Jest on kompletny w oparciu o importowane optoelektroniczne przetworniki żyroskopowe.

Laserowe żyroskopy optyczne cechują się następującymi właściwościami użytkowymi [6]:

- brak części ruchomych, dość prosta konstrukcja i mała liczba komponentów – (poniżej 20)
- duża odporność mechaniczna, nieczułość na wibracje g i g^2

- długi czas bezawaryjnego i bezobsługowego użytkowania (>30 000 h)
- zakres o dużej dynamice (10^9)
- dowolne wyjście cyfrowe i wskazania analogowe
- krótki czas ustalania się wyniku pomiaru – mniej niż 50 ms dla rotacji 0,5 °/h
- zadowalająca dokładność i stabilność dla wielu zastosowań (RLG – od 0,010 °/h, FOG – od 0,1 °/h).

Stosowane powszechnie jednoźródłowe rozwiązania tych przetworników osiągnęły już niemal graniczne swoje możliwości, wynikające głównie z szumów i zakłóceń układu elektronicznego.

Oryginalną właściwością omawianych tu przetworników interferometrycznych jest ich **autonomiczność przy pomiarach kąta, gdyż jako inercjalne nie wymagają zewnętrznego układu odniesienia**. Stanowi go położenie detektora w początku cyklu pomiaru zmian prędkości kątowej ω_r .

Proponowany w Polsce kierunek rozwoju przetworników interferometrycznych

Należy też parę zdań poświęcić oryginalnej propozycji układu przetworników interferometrycznych, zainicjowanej przez dra Jana Galińskiego. W pracy studialnej Politechniki Warszawskiej zaproponował on wykorzystanie w pomiarach interferencji niespójnych ze sobą wiązek światła [12]. Wraz z prof. Henrykiem Kowalskim z Wojskowej Akademii Technicznej zgłosili do opatentowania odmienną od dotychczasowej koncepcję budowy układu pomiarowego interferometrów z zastosowaniem dwu laserowych źródeł światła [9, 10]. Przyjęli też dla tych przetworników nazwę: interferometry Lorentza i symbol L, chociaż podstawowa zasada działania – pojawienie się różnicy czasów przeletu (fazy lub częstotliwości) wiązek światła zależnej od prędkości ruchu detektora, jest ta sama jak dla interferometru Sagniac’a. Przewidują oni, że interferometryczne przetworniki dwuczęstotliwościowe o układach wg ich pomysłu stwarzają szansę na uzyskanie lepszych parametrów użytkowych i metrologicznych niż dla jednoczęstotliwościowych. Autor zapoznał się bliżej z tą ideą opracowując wspólnie z Galińskim referat [11] na Międzynarodową Konferencję Metrologia Kwantowa w Poznaniu w maju 2006 r. Został on opublikowany w PAR 9/2006 [12] pod innym tytułem i z kilkoma uzupełnieniami w tekście. Na tle krytycznego syntetycznego spojrzenia na dotychczasowe interferometry opisano w nim teoretyczne podstawy działania interferencyjnych przetworników dwuczęstotliwościowych, ich układ pomiarowy i przewidywane, jako możliwe do osiągnięcia ich parametry techniczne. W tym rozwiązaniu sygnał mierzony wystąpi w paśmie przesuniętym względem niskich częstotliwości i nie będą nań wpływać szumy i inne zakłócenia niskoczęstotliwościowe, czyli charakterystyka przetwarzania

dokończenie na stronie 70 ►

► *dokończenie ze strony 68*

sygnału mierzonego przez interferometr będzie taka jak filtru pasmowego.

Ze wstępnej teoretycznej analizy tego pomysłu wynika, że w układzie dwuczęstotliwościowym istnieje również możliwość budowy autonomicznych interferometrycznych przetworników inercjalnych do pomiaru zmian prędkości i przesunięcia obiektów w ruchu liniowym, które nie zawierałyby części ruchomych w torze optycznym i miały zakres praktycznie nieograniczony. Byłoby to szczególnie cenne, gdyż w literaturze nie ma opisów takich przetworników. Znalazłyby one równie szerokie – a może i szersze – zastosowanie niż żyroskopy optyczne mierzące parametry ruchu obrotowego.

Idea ta nie była dotąd zweryfikowana eksperymentalnie, a jest tego warta, zarówno w wersji czysto laserowej jak i światłowodowej, gdyż koszty wytwarzania klasycznych precyzyjnych interferometrów laserowych o ruchomym detektorze lub lustrze [1, 2], jak i pierścieniowych RLG są wysokie, a zwiększanie ich dokładności staje się bardzo trudne. Natomiast interferometry światłowodowe FOG, łatwiejsze w produkcji i znacznie tańsze niż klasyczne, chociaż wyparły już poprzednie z większości zastosowań, jeszcze nie w pełni nadają się do najdokładniejszych pomiarów.

Zdaniem piszącego te słowa wskazane jest by tę oryginalną polską drogę doskonalenia i rozwoju przetworników interferometrycznych, opartą na interferencji światła z dwu różnych źródeł laserowych, poddać jeszcze wnikliwej konstruktywnej dyskusji specjalistów z kilku dziedzin. Umożliwiłaby ona nie tylko bardziej szczegółową weryfikację poprzedzającą podjęcie prac badawczo-rozwojowych, ale i optymalizację działań prowadzących do zastosowań. Dyskusja taka powinna poprzedzić ostateczną decyzję o podjęciu prac laboratoryjnych i konstrukcyjnych oraz ułatwić wybór warunków do budowy prototypów.

Dalsze prace, być może byłyby już prowadzone we współpracy międzynarodowej i objęłyby profesjonalne opracowanie prototypowej konstrukcji jednoosiowego modułu przetwornika żyroskopowego o układzie typu L oraz szczegółowe zbadanie jego parametrów. Kolejnym etapem byłaby próba opracowania odpowiednika interferometrów typu Sagniacza do pomiaru parametrów ruchu prostoliniowego. Jeśli udałoby się i dla tego ruchu zbudować autonomiczne przetworniki światłowodowe bez części ruchomych w torze optycznym, nawet o niezbyt dużych dokładnościach, to byłoby to osiągnięcie techniczne istotne w skali międzynarodowej. Warto próbować. Pozyskanie źródeł finansowania, chociażby tylko na sprawdzenie eksperymentalne tej interesującej idei polskich autorów, może stanowić szansę stymulującą rozwój rodzimej techniki pomiarowej o dużym znaczeniu dla gospodarki i obronności kraju.

Przy pozytywnym wyniku weryfikacji eksperymentalnej można przewidywać, że powstałoby wiele urządzeń i przyrządów z miniaturowymi przetwornikami

do pomiarów parametrów ruchu obrotowego oraz liniowego, bez części ruchomych w torze optycznym, niezbyt kosztownych i nietrudnych w produkcji, doskonalszych użytkowo i metrologicznie

Na zakończenie autor pragnie podziękować dr. Janowi Galińskiemu oraz prof. Henrykowi Kowalskiemu za wiele dyskusji o ich oryginalnym pomysle, które stały się stymulatorem do bardziej gruntownego poznania przetworników interferencyjnych.

Bibliografia

1. Zastorogin Ju. F.: *Precizionnyje izmerenia parametrov dviżenija s ispolzovaniem lasera*. Maszynostrojenie, Moskwa 1986.
2. K. Patorski, M. Kujawińska, L. Sałbut, *Interferometria laserowa z automatyczną analizą obrazu*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2005.
3. Bilur Barchan, Gyroscopes, chapter of: Dyer S.A. (ed.): *Survey of Instrumentation and Measurement*, Wiley Interscience, Jon Wiley & Sons, New York 2001, pp. 644–666.
4. J.H. Sharp, Laser Gyroscopes, Internet: http://www.mech.gla.ac.uk/~sharpj/lectures/lasers/notes/laser_gyro.pdf
5. S. Bennett, S.R. Emge R.B.Dyott, *Fiber optics Gyros for Robotics*, Internet www.xbow.com/products/product_details.aspx. KVH Industries Inc.
6. Tien Trang Dang, A. Stintz, J-C. Diels, Y. Zhang, *Active Solid State Short Pulse Laser Gyroscope*. The University of New Mexico, Internet: <http://panda.unm.edu/JCDiels/mslg/sstgyro3.pdf>
7. Breck Hitz, *Rings on a Chip Portend Tiny Laser Gyroscopes*, <http://www.photonics.com/content/spectra/2005/March/research/77545.aspx>
8. *Closed-loop Fiber Optical Gyroscopes with Linear Digital Output*, Optolink Ltd., Moscow Institute of Electronic Technology, www.optolink.ru.
9. J. Galiński, H. Kowalski, *Interferometr laserowy z transformacją Lorentza – Interferometr L*. Zgłoszenie Patentowe RP nr P 368884.
10. J. Galiński, H. Kowalski, *Żyroskop laserowy światłowodowy dwuczęstotliwościowy*, Zgłoszenie Patentowe RP nr P 365980 z dnia 03 08 2004.
11. J. Galiński, Z. Warsza, *O możliwości wykorzystania w pomiarach interferencji dwu wiązek światła ze źródeł niespójnych*, Referat na Międzynarodowej Konferencji Metrologia Kwantowa, Poznań maj 2006.
12. J. Galiński, Z. Warsza, *Nowy rodzaj przyrządów do pomiarów wielkości geometrycznych z interferencją światła z dwu źródeł*, *Pomiary Automatyka Robotyka* 9, 2006, s. 10 – 15.
13. UNZ 90/UNZ50 *Systemy nawigacji lądowej*, Przemysłowy Instytut Telekomunikacji Warszawa, www.PIT.EDU.pl ■