

Nowy rodzaj przyrządów do pomiarów wielkości geometrycznych z interferencją światła z dwu źródeł

Jan Galiński
Zygmunt Lech Warszawa

Po rozszerzeniu definicji pojęcia interferencja o superpozycję wiązek światła ze źródeł niespójnych, wykazano, że pole elektromagnetyczne w punkcie przestrzeni zawiera składową okresową, którą można wykorzystać w pomiarach.

Interferencja

Dotychczas w pomiarach wielkości geometrycznych wykorzystywano taką interferencję wiązek światła, która w opisie fenomenologicznym wymagała wprowadzenia szeregu warunków, tj.:

- koherencji interferujących wiązek (spójności czasowej i przestrzennej realizowanej poprzez wykorzystanie dwóch wiązek światła pochodzących z jednego źródła)
- równości dróg optycznych obu interferujących wiązek światła (pojęcie drogi optycznej jest niejednoznaczne i może być mylące w analizie zjawiska interferencji)
- stacjonarności obrazu interferencyjnego – prążki interferencyjne, z którymi jest powiązane pojęcie kontrastu.

Uwarunkowania te prowadziły do konieczności spełnienia wysokich wymagań dokładności wykonania elementów optyki i elektroniki do budowy interferometrów. Dlatego koszty wytwarzania interferometrów są wysokie, a dokładność pomiaru jest ograniczona [1, 2].

Interferujące wiązki światła współpracując z fotodetekтором, dają następujący sygnał wyjściowy [4]:

$$I_k = \frac{A_0^2 + A_p^2}{2} + A_0 A_p \cos \left[(\omega_0 - \omega_p) t + k(z_0 \pm v_z t) + \varphi_0 \right] \quad (1)$$

gdzie: A_0, A_p – amplitudy interferujących wiązek światła,

ω_0, ω_p – częstotliwości tych fal,

$k = \omega/C$ – wektor falowy,

$\Delta\omega = (\omega_0 \pm v_z t)$ – zmiana częstotliwości wiązki

związana z przesunięciem czujnika pomiarowego z punktu z_0 o wektor przesunięcia $\pm v_z t$,

φ_0 – faza początkowa.

Interferometry klasyczne (jednoczęstotliwościowe) buduje się wg zasady, że wiązki te są spójne czasowo i przestrzennie. Ich spójność czasowa skutkuje tym, że: $(\omega_0 - \omega_p)t = 0$, gdyż $\omega_0 = \omega_p$ przy braku modulacji wiązki przedmiotowej o amplitudzie A_p i obraz interferencyjnych prążków jest stacjonarny. W zakresie zmian $0 \leq v_z t \leq z_{gr}$ sygnał pomiarowy interferometru $I_k(\omega)$ znajduje się w paśmie $0 \leq \omega \leq \omega_{gr}$. Pasma jego częstotliwości pokrywa się z pasmem częstotliwości szumów $I_s(\omega_s)$ układu pomiarowego i nie ma prostej możliwości rozdzielania obu tych sygnałów. Ta cecha interferometrów klasycznych spowodowała, że do oddzielenia sygnału pomiarowego od szumu trzeba stosować środki techniczne, takie jak:

- stabilizacja temperatury całego układu pomiarowego. Na przykład, stabilizacja układu pomiarowego interferometru Sagnaca (żyroskopu laserowego) budowanego w Wetzel (Niemcy) powinna trwać około 2 lata. Przewiduje się, że dopiero po tym czasie układ pomiarowy osiągnie zakładaną dokładność pomiaru 10-11
- duża dokładność wykonania elementów optycznych (co najmniej $\lambda/30$) i stabilizacja wymiarowa geometrii układu optycznego
- skomplikowana budowa fotodetektora
- ograniczona górna wartość zakresu pomiarowego interferometrów do ok. 50 m.

Zależność wektora falowego k od prędkości propagacji fali interferujących wiązek światła powoduje ponadto, że dokładność pomiaru w interferometrach klasycznych jest wrażliwa na czynniki środowiska pomiarowego (temperatura, ciśnienie, skład chemiczny atmosfery).

Pierwszy z autorów zaproponował remedium na te wady interferometrów klasycznych w postaci budowy interferometrów o innej zasadzie pomiaru, którą omawia się dalej. Wymagało to opracowania podstaw teoretycznych do wykorzystania interferencji wiązek ze źródeł niespójnych [3]. Metody korelacyjne stosowane do opisu przesyłania informacji za pomocą fal optycznych postawiły szereg problemów wymagających szczegółowego wyjaśnienia, w tym jako zasadniczy: *Jak interferują fotony emitowane przez źródła*

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

niezależne? Wymaga to wprowadzenia ogólniejszej definicji interferencji niż dotychczasowa:

Interferencja jest superpozycją stanów pól elektromagnetycznych w punkcie przestrzeni.

Przeprowadzone badania [2, 5, 6] dały pozytywną odpowiedź na pytanie: *Czy możliwe jest wykorzystanie interferencji wiązek światła ze źródeł niespójnych, np. dwóch niezależnych laserów?*

W literaturze [3] jest opisana interferencja światła jako wiązek składających się z fotonów. Jeżeli interferujące wiązki światła są niezależne i stacjonarne, to obraz interferencyjny jest jednorodnym polem przypadkowym, a interferencja ujawnia się przy badaniu współczynnika korelacji. Współczynnik korelacji interferujących fotonów zawiera składową okresową zależną od współrzędnej z – tak jak w równaniu (1).

Podstawy teoretyczne interferometru L (o działaniu wg transformacji Lorentza)

Robocza teza o możliwości wykorzystania interferencji wiązek światła ze źródeł niekoherentnych doprowadziła do opracowania podstaw teoretycznych budowy interferometrów dwuczęstotliwościowych [5]. Podstawy te wynikają z teorii pola EM (elektromagnetycznego) i obejmują zależności podane poniżej.

Propagowana w próżni fala płaska ma równanie:

$$E_{x,t} = A_{x,y} \cos(\omega t - kz + \varphi_0) \quad (2)$$

gdzie: $E_{z,t}$ – natężenie pola fali elektromagnetycznej propagowanej w płaszczyźnie xy wzdłuż prostej z ,

$A_{x,y}$ – amplituda fali elektromagnetycznej w płaszczyźnie x, y ,

$k = \omega/C_0 = \omega(e_0 m_0)^{1/2}$ – wektor falowy dla $C = C_0$,

C_0 – wektor prędkości propagacji fali elektromagnetycznej w próżni,

φ_0 – faza początkowa,

t – czas lokalny.

Na potrzeby metrologii korzystnie jest prowadzić rozważania przy wykorzystaniu czasoprzestrzeni M-L (Maxwella-Lorentza)¹.

Założenia do zbudowania modelu tej czasoprzestrzeni są następujące:

- światło – fala elektromagnetyczna ma względem eteru stałą prędkość propagacji równą C (eter jest tu pojęciem matematycznym)
- wektor świetlny (wektor propagacji) jest wektorem kierunkowym toru propagacji energii fali elektromagnetycznej, który przebiega po liniach prostych,

Pożegnaj się z ukochanymi natęgami.



Czy uwielbiasz układanie kabli w ciasnych przestrzeniach maszyn? Zdejmowanie z nich izolacji i umieszczanie cienkich przewodów w zaciskach? Czy kochasz regularne wymiany pierścieni ślizgowych? I traktujesz unikanie potknięcia się o kable prowadzące do wyłączników nożnych jako konkurencję sportową? W takim razie mamy dla Ciebie złe wiadomości: Nowe generacje naszego osprzętu łączeniowego są dostępne bez kabla. Sygnały sterujące są transmitowane drogą radiową, a energia elektryczna jest generowana przez wyłączniki samodzielnie – np. dzięki ogniwom słonecznym lub poprzez wykorzystanie energii kinetycznej napędu. Zapytaj o więcej szczegółów. I zobaczysz: bez kabli jest łatwiej!

steute Polska, al. Wilanowska 321, 02-665 Warszawa, tel. 0 22 843 08 20, fax 0 22 843 30 52, info@steute.pl, www.steute.pl

BEZPIECZNY OSPRZĘT ŁĄCZENIOWY DO
ZŁOŻONYCH I KRYTYCZNYCH ZASTOSOWAŃ

.steute

¹ Czasoprzestrzeń M-L jest opisana przez geometrię przestrzeni Mikowskiego i jest afiniczną przestrzenią czterowymiarową. Stanowi ona model szczególnej teorii względności Einsteina.

gdy pomija się wpływ grawitacji powodującej zakrzywienie czasoprzestrzeni M-L

- każdy punkt czasoprzestrzeni M-L ma swój czas lokalny t .

Propagacja fali elektromagnetycznej w próżni jest izotropowa i wektor C ma stałą wartość (nie zależy od prędkości v obserwatora i źródła). Przy pominięciu oddziaływania grawitacji i wprowadzeniu zależności: $k = \omega/C$ oraz $z = vt$ równanie (2) przyjmuje postać:

$$E = A \cos \left(\varpi t - vt \frac{\varpi}{C} + \varphi_0 \right)$$

lub

$$E = A \cos \left[\varpi \left(1 - \frac{v}{C} \right) t + \varphi_0 \right] \quad (3)$$

gdzie v jest prędkością chwilową obserwatora.

Gdy detektor fali elektromagnetycznej opisanej równaniem (3) porusza się z prędkością chwilową v w czasoprzestrzeni M-L, wówczas równanie pola (2) podlega transformacji Lorentza do postaci:

$$E_{x',t} = A_0 \cos \left(\varpi' t' - k z' + \varphi_0 \right)$$

lub

$$E_{x',t} = A_0 \cos \left[\varpi' \left(1 - \frac{v'}{C_0} \right) t' + \varphi_0 \right] \quad (4)$$

gdzie: z' - współrzędna w układzie prostokątnym związanym z detektorem D poruszającym się z prędkością chwilową v ,
 t' - czas lokalny na detektorze D poruszającym się z prędkością v ,
 v' - prędkość chwilowa v po transformacji Lorentza,
 A_0 - amplituda fali elektromagnetycznej (nie rozpatruje się transformacji amplitudy przy przejściu z układu K związanego ze źródłem fali, do układu K' związanego z detektorem D poruszającym się z prędkością v),
 φ_0 - faza początkowa, nie jest funkcją czasu t , ani współrzędnej z ,
 C_0 - wektor prędkości propagacji fali elektromagnetycznej w próżni.

Równania transformacyjne Lorentza:

$$x = \frac{x' + \left(\frac{v}{C_0} \right) C_0 t'}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{C_0} \right)^2}} \quad t = \frac{t' + \frac{v}{C_0} \frac{x'}{C_0}}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{C_0} \right)^2}} \quad (5a,b)$$

Równania (2) - (4) opisują tę samą falę elektromagnetyczną. W związku z tym zachodzą następujące związki [3]:

$$\varpi' \cong \varpi_0 \left(1 - \frac{v}{C_0} \right) \quad (6a) \quad b) \quad v \cong -C_0 \frac{\Delta \varpi}{\varpi} \quad (6b)$$

$$\Delta \varpi = \varpi' - \varpi \quad (6c)$$

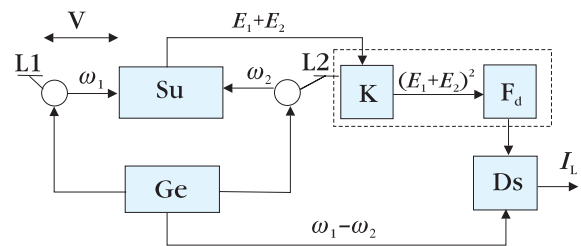
Równanie (6a) opisuje zjawisko Dopplera I rodzaju, natomiast równanie (6b) definiuje prędkość chwilową v w czasoprzestrzeni M-L. Tę nową definicję prędkości wykorzystuje się jako podstawowe równanie działania interferometru L w postaci:

$$v = - \frac{\Delta \varpi}{\varpi_0} C_0 = k_L C_0$$

gdzie: $k_L = -\Delta \omega / \omega_0$ - współczynnik wyznaczany przez pomiar w dziedzinie czasu,
 ω_0 - częstotliwość własna źródła fali elektromagnetycznej.

Spełnia ona postulaty metrologii, gdyż prędkość v wyznacza się przez porównanie z prędkością światła C_0 [6], przyjętą jako wartość wzorca. Porównanie następuje poprzez pomiar $\Delta \omega = \omega' - \omega$ w dziedzinie czasu.

Zasada budowy interferometru L



Rys. 1. Schemat blokowy interferometru L (z działaniem wg transformacji Lorentza): L1, L2 - lasery półprzewodnikowe; Su - sumator wiązek światła, K - kwadrator; Fd - filtr dolnoprzepustowy; Ds - detektor synchroniczny; Ge - generator elektryczny; ω_1, ω_2 - częstotliwości generowane przez Ge; D - detektor fali em. (składa się z K i Fd); E_1, E_2 - wiązki światła laserowego; I_L - sygnał wyjściowy interferometru; v - prędkość obiektu

Strukturę interferometru L przedstawiono na rys. 1 w postaci schematu blokowego [7]. Dwie wiązki światła laserowego są opisane równaniami:

$$E_{1,t} = A_1 \cos \left[\varpi_1 \left(1 - \frac{v}{C_0} \right) t + \varphi_{10} \right]$$

$$E_{2,t} = A_2 \cos \left[\varpi_2 \left(1 - \frac{v}{C_0} \right) t + \varphi_{20} \right] \quad (7)$$

Po zsumowaniu w Su, przechodzą one przez kwadrator K i filtr dolnoprzepustowy Fd, który odrzuca człony o częstotliwościach własnych laserów ω_{10}, ω_{20} oraz człony zawierające sumę i podwojenie tych częstotliwości. Gdy detektor D z rys. 1 porusza się z prędkością v , wówczas sygnał wyjściowy interferometru, wskutek transformacji Lorentza, wynosi:

$$I_L = \frac{(A_1 + A_2)^2}{2} + A_1 A_2 \cos \left[(\varpi_1 - \varpi_2) t - (\varpi_1 + \varpi_2) t \frac{v}{C_0} + \varphi_{0w} \right] \quad (8)$$

Składnik $(\omega_1 + \omega_2) t v / C_0$ opisuje zmianę częstotliwości interferujących fal elektromagnetycznych w czasie t na detektorze D poruszającym się z prędkością v . Jest to związane ze zjawiskiem Dopplera I rodzaju. Struktura wyrażenia (8) jest taka, jak równania opisującego sygnał pomiarowy interferometru dwuczęstotliwościowego [4]:

$$I_L = \frac{(A_1 + A_2)^2}{2} + A_1 A_2 \cos[(\varpi_1 - \varpi_2)t - \Delta\varpi't + \varphi_{0w}] \quad (9)$$

Analiza równania (9) prowadzi do zastąpienia układu pomiarowego interferometru dwuczęstotliwościowego charakterystyką filtra działającego w paśmie $(\omega_1 - \omega_2) \pm \Delta\omega$. Pasma działania filtra można dobrać tak, by pasma sygnału pomiarowego i szumów nie zachodziły na siebie. Ta korzystna cecha interferometru dwuczęstotliwościowego umożliwia budowę interferometru z transformacją Lorentza o stabilności długookresowej 10^{-11} z rozdzielczością pomiaru $\delta L = 10^{-11}$.

Przedstawione powyżej parametry metrologiczne interferometru L są nieosiągalne dla układów interferometrów klasycznych (jednoczęstotliwościowych), które w teorii mogą być zastąpione charakterystyką filtra dolnoprzepustowego, dla których pasma częstotliwości sygnału pomiarowego i szumów nakładają się (jest to przyczyna ograniczenia rozdzielczości pomiaru do $\delta L = 10^{-8}$).

Z pomiaru składnika $(\omega_1 - \omega_2) v / C_0 = B_L$ w równaniu (9) można wyznaczyć prędkość chwilową v obiektu:

$$v = \frac{B_L C_0}{\varpi_1 + \varpi_2} \quad (10)$$

Parametr B_L wyznacza się przez pomiar w dziedzinie czasu.

Wyznaczenie prędkości chwilowej v z równania (10) umożliwia wyznaczenie długości L_{AB} wektora przesunięcia obiektu L_{AB} przy ruchu z punktu A do punktu B przestrzeni.

$$\Delta L = v \Delta t \quad (11)$$

$$L_{AB} = \int_{t_p}^{t_k} v dt = \int_{t_p}^{t_k} \frac{B_L C_0}{\varpi_1 + \varpi_2} dt$$

gdzie: t_k, t_p - czas (lokalny) początku i końca ruchu.

Równanie (11) opisuje odległość punktów A i B w czasoprzestrzeni M-L.

Oszacowanie spodziewanej dokładności pomiaru

Oszacowanie to opiera się na opisie parametrów technicznych dostępnych obecnie urządzeń.

Przy założeniu, że generator elektryczny jest stabilizowany z dokładnością 10^{-11} i częstotliwości $\omega_1 - \omega_2$ znajdują się w paśmie poniżej 1 GHz, ich niepewności wynoszą: $\delta\omega_1 = 10^{-11}$, $\delta\omega_2 = 10^{-11}$.



DUŻE MOCE VLT® Nowe napędy Danfoss

Danfoss z sukcesem wprowadził nową platformę sprzętową dla przetwornic częstotliwości w zakresie mocy **90 kW do 630 kW (400 V / 500 V / 690 V)**

Już wkrótce w oparciu o napęd VLT® w konfiguracji modułowej, Danfoss zaoferuje układy regulacji prędkości obrotowej silników AC, **do 1,2 MW / 690 V**

VLT® to elastyczność konfiguracji, moduły wyposażenia **mogą być wbudowane** wewnątrz napędu:

- filtr RFI
- rozłącznik i bezpieczniki
- redukcja harmonicznych

Napędy Danfoss to:

- inteligentny układ chłodzenia
- konkurencyjne, małe gabaryty
- duża sprawność – małe straty cieplne

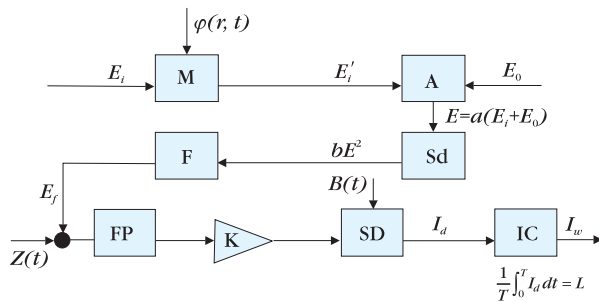
Przetwornice częstotliwości VLT® to idealne rozwiązanie dla napędów w przemyśle, w systemach ciepłowniczych i wentylacyjnych oraz dla gospodarki wodno-ściekowej.

B_L i Δt mogą być też wyznaczone z niepewnością 10^{-11} [9]. Prędkość światła C_0 jest wyznaczana współcześnie z niepewnością $\delta C_0 = 10^{-10}$.

W niepublikowanym jeszcze opracowaniu [6] Galiński wykazał, że wyznaczenie długości L_{AB} (oraz wzorca 1 metra) metodą przesunięcia wg równania (11) nie jest ograniczone dokładnością, z jaką jest znana prędkość światła δC_0 i można wyznaczać ją z dokładnością taką, jaką ma użyty w pomiarach wzorec czasu. Wystarczy jedynie warunek $C_0 = \text{const}$.

Interferometr laserowy z heterodynowaniem optycznym

Przykładem ilustrującym nową zasadę działania interferometrów jest rozwiązanie laserowego interferometru dwuczęstotliwościowego (rys. 2) wg patentu PRL Nr 148313, budowanego przez Galińskiego w PKNMij (obecnie GUM) pod koniec lat 1990.



Rys. 2. Schemat blokowy laserowego interferometru dwuczęstotliwościowego wg patentu PRL Nr 148313

Modulator M moduluje falę elektromagnetyczną E_i funkcją $\varphi(\mathbf{r}, t)$ związaną z przesunięciem przestrzennym czujnika pomiarowego o odległość r , w czasie t po dowolnej drodze L . Otrzymana fala E_i' i fala odniesienia E_0 dodają się w sumatorze A i sygnał $E = a(E_i' + E_0)$ przechodzi dalej przez kwadrator Sd i filtr dolnoprzepustowy F (kwadrator i filtr dolnoprzepustowy to charakterystyki fotodetektora), tworząc sygnał wyjściowy z fotodetektora E_f

$$E_f = A_i A_0 \cos \left[(\omega_i - \omega_0)t - \varphi(r, t) + \varphi_{0w} \right] \quad (12)$$

Sygnał ten i sygnał szumów $Z(t)$ przechodzą jeszcze przez filtr pasmowy, wzmacniacz K i detektor synchroniczny SD, który pełni istotną rolę w układzie pomiarowym. Jest on sterowany sygnałem $B(t)$ o częstotliwości $\omega = (\omega_i - \omega_0)$. Sygnał wyjściowy z detektora synchronicznego I_d zawiera splot sumy sygnału pomiarowego E_f i szumów $Z(t)$ z sygnałem sterującym $B(t) = \cos(\omega t + \varphi_0)$

$$I_d(\omega_d) = [E_f + Z(t)] * \cos(\omega t + \varphi_0) \quad (13)$$

Informacja pomiarowa zawarta w funkcji $\varphi(r, t) = z_0 + vt$ jest reprezentowana przez chwilową wartość częstotliwości ω_d sygnału I_d . W układzie IC trzeba na

bieżąco mierzyć cyfrowo, z wymaganą dokładnością, tę wartość i jej zmiany oraz całkować poprzez zliczanie przez cały czas trwania przesunięcia pomiędzy punktami AB. Nie jest to zadanie trywialne do realizacji. Sygnał wyjściowy układu I_w jest miarą długości $r = |L_{AB}|$ wektora przesunięcia L_{AB} wg wzoru:

$$I_w = \frac{1}{T} \int_0^T \varpi_d(t) dt = k_w r \quad (14)$$

gdzie k_w jest współczynnikiem proporcjonalności.

Opis szczegółów i sposobu realizacji technicznej układu wykracza poza przyjęte przez autorów ramy tej publikacji.

Warto podkreślić, że nowy rodzaj interferometru o zasadzie działania opisanej transformacją Lorentza, który proponuje się nazywać w skrócie interferometrem L, jest całkowicie autonomicznym przetwornikiem pomiarowym, tj. wyznaczenie modułu wektora przesunięcia nie wymaga określenia zewnętrznego układu odniesienia względem układu pomiarowego. Jego rozwiązanie zostało opatentowane [7] i było prezentowane na konkursie innowacji technicznych Eureka 2005 w Brukseli, gdzie wyróżniono je złotym medalem [7].

Podsumowanie

Przedstawione powyżej zasady interferencji niekoherentnych wiązek światła oraz opis działania interferometrów dwuczęstotliwościowych [5] oparty na transformacji Lorentza tworzą podstawy teoretyczne budowy nowego rodzaju interferometrów, które zaproponowano oznaczać symbolem L. Ich główne zalety to:

- stabilność długookresowa 10^{-11} warunkowana stabilnością długookresową generatora elektrycznego (gdy generator jest kontrolowany zegarem cezowym stabilność = 10^{-13})
- rozdzielczość pomiaru 10^{-11}
- zakres pomiarowy bez ograniczeń od góry
- brak wrażliwości na czynniki atmosferyczne (opis działania poprzez czasoprzestrzeń M-L dotyczy obszaru w przetworniku pomiarowym, a nie całej przestrzeni pomiędzy punktami pomiarowymi A i B).

W układzie pomiarowym nie wymaga się użycia elementów optycznych o wysokiej klasie dokładności, co stanowi dodatkową jego zaletę. (Klasyczne interferometry laserowe buduje się z elementów optycznych należących do klasy, co najmniej $\lambda/30$). Nie jest też konieczna wysoka stabilność geometryczna układu pomiarowego.

W budowie jest też obecnie dwuczęstotliwościowy żyroskop laserowy o przewidywanej stabilności długookresowej 10^{-11} , realizowany w technologii światłowodowej (jest on też interferometrem dwuczęstotliwościowym). Klasyczne żyroskopy laserowe, działające

wg interferometru Sagnaca, należą do klasy interferometrów jednoczęstotliwościowych i ich stabilność długookresowa zależy m.in. od długookresowej stabilności częstotliwości f lasera (dla lasera stabilizowanego na jodzie $\delta f = 10^{-11}$, a lepszych laserów obecnie się nie wytwarza).

Przedstawione powyżej podstawy działania interferometru L (z transformacją Lorentza) korzystają z nowego aparatu pojęciowego interferometrii, tj.:

- nie występuje tu pojęcie długości fali światła λ , (operuje się częstotliwością fali)
- stabilność i dokładność wskazań zależy tylko od stabilności częstotliwości własnej ω_g generatora elektrycznego (dla układu kontrolowanego zegarem cezowym $\delta\omega_g = 10^{-13}$)
- nie występuje wpływ czynników atmosferycznych na dokładność pomiaru (częstotliwość fali elektromagnetycznej nie zmienia się na drodze propagacji fali)
- prążki interferencyjne są niestacjonarne (detektor prążków jest budowany inaczej niż dotychczasowe)
- nie występuje ograniczenie zakresu pomiarowego interferometru od góry.

Odmienne, szersze niż dotąd spojrzenie na problemy stosowania interferometrii poskutkowało dostrzeżeniem możliwości budowy aparatury o nowych właściwościach metrologicznych i aplikacyjnych.

Bibliografia

1. J. Galiński i in., *Interferometr laserowy o dużej rozdzielczości*, Patent PRL nr 148 313.
2. J. Galiński, *Analiza właściwości metrologicznych przetworników optoelektronicznych do pomiarów odchyłek kształtu i położenia przedmiotów*, Sprawozdanie z pracy badawczej nr 114/503/573, Grant rektorski Politechniki Warszawskiej, maj 1995.
3. W.W. Mitiugow, *Fizyczne podstawy teorii informacji*, PWN, Warszawa 1980.
4. I.W. Sawieliew, *Wykłady z fizyki*, t. 2, PWN, Warszawa 1994.
5. J. Galiński, H. Kowalski, J. Sanecki, *Some aspects of application of a double frequency interferometer for distance measurements*, Proc. SPIE vol. 673, International Conference on Holography Application, 2 - 4 July 1986, Beijing China.
6. J. Galiński, *Kinematyczna metoda odtwarzania jednostki długości wg definicji: $1\text{ m} = C_0 \Delta t$* , Niepublikowane prace własne, 2004.
7. J. Galiński, H. Kowalski, *Interferometr laserowy z transformacją Lorentza - Interferometr L*, Zgłoszenie patentowe RP nr P 368 884.
8. J. Galiński, H. Kowalski, R. Okniński, *Układ do pomiaru częstotliwości działający według metody zliczania z detektorem synchronicznym o dokładności pomiaru 10^{-11} w czasie próbkowania 1 s*, Dyplom GOLD MEDAL Eureka! Brussels, 19.11.2005.

Przetwornice VLT® Danfoss w układach napędowych suwnic

Przetwornice częstotliwości firmy Danfoss znajdują zastosowania w różnych aplikacjach: począwszy od systemów pompowych i wentylatorowych po bardzo zaawansowane aplikacje przemysłowe. Danfoss optymalizuje także układy napędowe na podstawie bezpośredniej kontroli momentu. Przetwornice VLT® wyposażone w algorytm Flux to właśnie dynamiczne – sterowane wektorem strumienia pola – napędy do wymagających zastosowań w przemyśle. Dzięki połączeniu sterowania wektorem strumienia z serwomotorami lub standardowymi silnikami AC otrzymujemy rozwiązanie napędu o niezwykle wysokich parametrach funkcjonalno-ekonomicznych.



Rys. 1. Standardowy zakres mocy przetwornicy VLT® 5000Flux to 0,75-400 kW

Doskonałe parametry przetwornicy częstotliwości VLT® 5000 Flux umożliwiają precyzyjne sterowanie napędem w wielu aplikacjach – zarówno w otwartej, jak i zamkniętej pętli regulacji – między innymi w urządzeniach dźwigowych i innych systemach podnoszenia. Ponieważ układ regulacji oddziałuje na wielkości tworzące bezpośrednio moment obrotowy wału silnika, otrzymujemy napęd o bardzo dobrej dynamice i stabilności. W ten sposób można utrzymać moment obciążenia na poziomie 100 % bez obawy utraty kontroli układu.