

Marek ŚCIUBA, Marek DOBOSZ

INSTYTUT METROLOGII I SYSTEMÓW POMIAROWYCH POLITECHNIKI WARSZAWSKIEJ

Ultradźwiękowy układ do pomiaru temperatury powietrza, do zastosowania w interferencyjnych pomiarach długości.

mgr inż. Marek ŚCIUBA

Ukończył studia magisterskie na Wydziale Mechatroniki Politechniki Warszawskiej w 2004r. Obecnie doktorant w Instytucie Metrologii i Systemów Pomiarowych tego wydziału. Zajmuje się pomiarami temperatury do zastosowań w pomiarach interferencyjnych.



e-mail: m.sciuba@mchtr.pw.edu.pl

Prof. dr hab. Inż. Marek DOBOSZ

Ukończył studia mgr na Wydziale Mechatroniki Precyzyjnej (obecnie Mechatroniki) Politechniki Warszawskiej w 1980r. Na tym samym wydziale obronił doktorat w 1984, pracę habilitacyjną w 1996r oraz uzyskał tytuł profesora w 2005r. Obecnie kierownik Zakładu Metrologii i Inżynierii Jakości, Instytutu Metrologii i Systemów Pomiarowych Wydziału Mechatroniki Politechniki Warszawskiej. Zajmuje się laserowymi technikami pomiarowymi wielkości geometrycznych



e-mail: m.dobosz@mchtr.pw.edu.pl

Streszczenie

Zaprezentowano niektóre ograniczenia związane z wykorzystaniem długości fali światła jako wzorca długości w interferencyjnych pomiarach długości. W szczególności przedstawiono trudności dokładnego wyznaczenia współczynnika załamania powietrza, wynikający z braku precyzyjnych metod pomiarowych temperatury na drodze pomiarowej. Zaproponowano układ do ultradźwiękowego pomiaru temperatury powietrza wzdłuż osi wiązki pomiarowej interferometru. Przedstawiono wyniki wstępnych badań eksperymentalnych tej techniki.

Słowa kluczowe: ultradźwięki, pomiar temperatury, interferometr

Ultrasonic method for measurement of temperature, for employment in distance interferometer measurement

Abstract

Some limitations of application of a light wavelength as a length master in interferometric measurements of length are presented. Especially the difficulties of precise evaluation of an air refraction index along the measured path are shown. These difficulties are caused by lack of satisfactory accurate method of temperature measurement along the laser beam. Ultrasonic system for temperature measurement along the measurement beam of the interferometer is proposed. Initial experimental results of the proposed technique are presented.

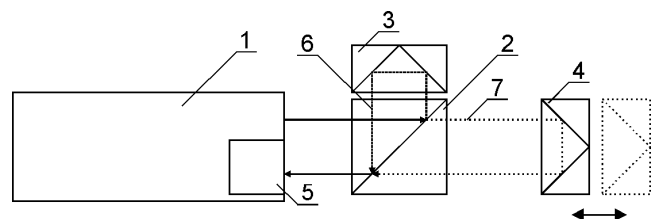
Keywords: ultrasonic, temperature measurement, interferometer

1. Wstęp

Interferencyjna metoda pomiaru odległości jest najdokładniejszą metodą pomiarową. Stosowana jest w pomiarach wzorców, maszyn współrzędnościowych, czy przyrządów pomiarowych. Typowo, układ interferometru do pomiaru przemieszczeń pracuje w układzie składającym się z [1] (rys. 1):

1. laserowego źródła światła,
2. elementu światłodzielącego,
- 3, 4. pryzmatów narożnych,
5. detektora promieniowania.

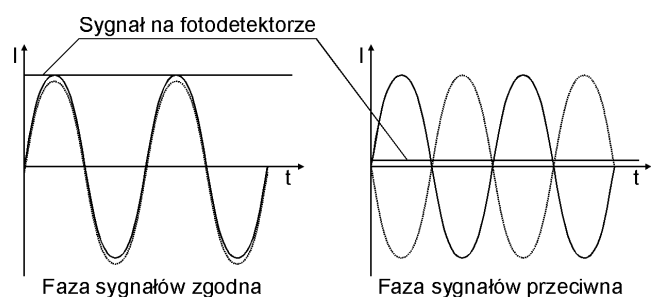
Pryzmat 3 jest elementem nieruchomym (pryzmat odniesienia) i najczęściej umocowany jest do elementu światłodzielącego. Pryzmat 4 jest elementem przesuwającym w czasie pomiarów.



Rys. 1. Układ pomiaru interferencyjnego
Fig. 1. Interferometer measurement system

Jako laser wzorcowy najczęściej stosowane są stabilizowane lasery helowo – neonowe. Umożliwiają one uzyskanie dużych stabilności częstotliwości emitowanej fali światła (nawet 10^{-8} do 10^{-9}).

Podczas pomiaru interferencyjnego wiązka światła laserowego jest przez element światłodzielący dzielona na dwie części – jedna część (6) trafia do pryzmatu odniesienia, a druga (7) do pryzmatu pomiarowego. Po odbiciu obie wiązki wracają do elementu światłodzielącego gdzie są ze sobą łączone i odbijane w stronę detektora. Na wyjściu detektora otrzymujemy prąd proporcjonalny do średniej wartości natężenia padającego oświetlenia – detektor nie jest w stanie nadążyć za chwilowymi zmianami sygnału o częstotliwości padającego światła. Ponieważ obie wiązki światła (wzorcową i pomiarową) mają taką samą częstotliwość to po ich nałożeniu oświetlenie fotodetektora jest proporcjonalne do fazy pomiędzy wiązkami wzorcową i pomiarową (rys. 2).



Rys. 2. Sumowanie sygnałów świetlnych
Fig. 2. Adding light signal

Jeśli faza obu wiązek jest jednakowa – następuje dodanie się sygnałów i maksymalne oświetlenie fotodetektora, jeśli faza jest przeciwna – wiązki wzajemnie się znoszą i fotodetektor nie zostaje oświetlony. Podczas pomiaru przesunięcie fazy zmienia się wraz z ruchem pryzmatu pomiarowego – zmienia się różnica dróg optycznych w torze wzorcowym i pomiarowym. Zliczając ilość zmian oświetlenia fotodetektora uzyskujemy możliwość pomiaru przesunięcia pryzmatu pomiarowego. Jeden cykl zmian natężenia oświetlenia odpowiada przesunięciu pryzmatu pomiarowego o odcinek odpowiadający $\frac{1}{2}$ długości fali światła lasera. Jeśli długość fali jest znana to możemy dokładnie określić o jaki odcinek został przesunięty pryzmat wzorcowy.

Jednak na długość fali światła wpływ ma wiele czynników. Najważniejszym z nich jest częstotliwość generowanej fali – jednak jest ona znana i często utrzymywana z dużą stabilnością. Oprócz częstotliwości na długość fali światła wpływ ma współczynnik załamania powietrza [2][3], zmieniający się wraz ze zmianami temperatury, wilgotności, ciśnienia i składu chemicznego. Największy wpływ na współczynnik załamania powietrza ma jego temperatura. Zmiana temperatury o 1K powoduje zmianę wskazań o ok. 10^{-6} , co oznacza że dla odcinka pomiarowego równego 1m wskazanie zmieni się o 1 μ m. W niektórych zastosowaniach są to zmiany niedopuszczalne. W przeciwieństwie do innych parametrów powietrza, zmiany temperatury mogą następować na niewielkich odcinkach i w krótkim czasie (np. zbliżenie ręki operatora) i tradycyjne pomiary temperatury mogą ich nawet nie zarejestrować – średni czas odpowiedzi termometru może przekraczać 2-3 minuty. W przypadku pomiaru interferencyjnego ważna jest średnia wartość temperatury na odcinku pomiarowym – termometry mierzą zaś punktowo. Stosowane metody pomiaru temperatury polegają na umieszczeniu od kilku do kilkunastu termometrów na odcinku pomiarowym, lub użyciu jednego termometru poruszającego się wzdłuż toru pomiarowego. Metody te mają jednak wady – nie jest znana temperatura we wszystkich punktach toru pomiarowego lub nie są uwzględniane zmiany temperatury w czasie pomiarów.

Prezentowana metoda ultradźwiękowego pomiaru temperatury daje nam jako wynik średnią wartość temperatury z całego toru pomiarowego, uwzględniając jej nierównomierny rozkład.

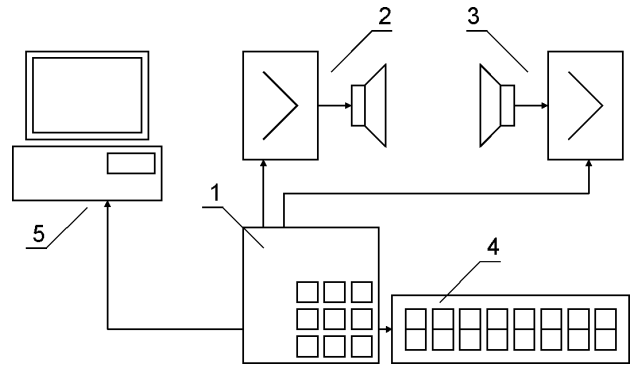
2. Zasada pomiaru

Ultradźwiękowy pomiar temperatury powietrza [4][5] opiera się na pomiarze zmian prędkości dźwięku zachodzących zgodnie z zależnością (1) [6]:

$$V = 331(1 + 0,2 \cdot 10^{-3} \cdot R_H)(1 + 0,18 \cdot 10^{-3} \cdot T) \quad (1)$$

gdzie R_H jest wilgotnością względną powietrza, a T jest jego temperaturą wyrażoną w $^{\circ}C$.

Pomiar prędkości dźwięku realizowany jest poprzez pomiar czasu przejścia fali ultradźwiękowej od nadajnika do odbiornika, przy jednoczesnej znajomości długości odcinka pomiarowego. Długość odcinka pomiarowego jest określona w pomiarze interferencyjnym. Początkowa niepewność określenia długości odcinka na poziomie 2-3 μ m (co odpowiada niepewności pomiaru temperatury 2-3K na odcinku 1m) nie ma znaczenia ponieważ znajduje się poniżej rozdzielczości pomiaru ultradźwiękowego. Każdy następny pomiar jest korygowany wynikami uzyskanymi wcześniej. Prezentowana metoda wymaga jednak dokładnej znajomości odległości nadajnik – odbiornik, co w praktyce oznacza konieczność zetknięcia elementu światłodzielącego z pryzmatem ruchomym. Pomiary interferometryczne i ultradźwiękowe są wykonywane i rejestrowane synchronicznie, co umożliwia odpowiednią interpretację wyników. Aby była możliwość ciągłej korekty wskazań interferometru należałoby wprowadzić jeden program sterujący oboma urządzeniami, co na tym etapie badań nie jest możliwe.



Rys. 3. Ultradźwiękowy układ pomiarowy
Fig. 3. Ultrasonic measurement system

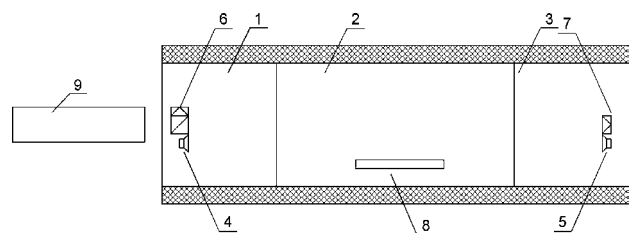
Ultradźwiękowy układ pomiarowy (rys. 3) składa się z:

1. Układu sterującego z klawiaturą lokalną
2. Nadajnika ultradźwiękowego ze wzmacniaczem mocy
3. Odbiornika z układem formowania sygnału
4. Wyświetlacza wyników pomiarów
5. Komputera rejestrującego wyniki

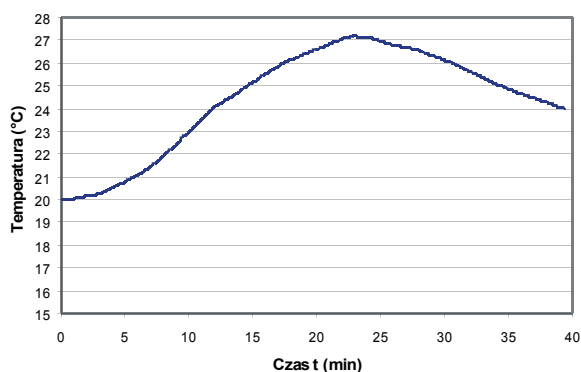
Układ sterujący wysyła ciągły sygnał o częstotliwości 41 kHz do nadajnika ultradźwiękowego. Po przejściu przez tor pomiarowy sygnał trafia do odbiornika, gdzie jest wzmacniany i formowany. Układ sterujący mierzy przesunięcie fazy (czas pomiędzy jednakowymi zboczami sygnału nadanego i odebranego) pomiędzy sygnałem nadawanym i odbieranym, oraz oblicza czas całkowity, uwzględniając poprzednie pomiary. Przy rozpoczęciu pomiarów wymagane jest zetknięcie nadajnika z odbiornikiem w celu określenia opóźnień wnoszonych przez układ pomiarowy przy zerowej odległości nadajnik – odbiornik. W tym momencie należy wyzerować wskazania. Po wyzerowaniu wskazań nie można dopuścić do przerwania wiązki pomiarowej (podobnie jak w interferometrze), ponieważ może doprowadzić to do błędnych pomiarów.

3. Uzyskane wyniki badań

Opisywany układ został umieszczony w izolującej obudowie styropianowej (rys. 4), która została dodatkowo podzielona na trzy strefy – dwie skrajne 1 i 3 w których zostały umieszczone układy nadajnika i odbiornika ultradźwiękowego 4 i 5, oraz optyka interferometru 6 i 7, oraz środkową 2, w której umieszczono płytkę grzejącą 8. Poszczególne strefy zostały oddzielone od siebie cienką folią z wykonanymi otworami na wiązki laserowe. Obudowa izolowała układ od zmian temperatury otoczenia oraz od ruchów powietrza mogących zaburzyć pomiar ultradźwiękowy. Odległość pomiędzy nadajnikiem i odbiornikiem ultradźwiękowym wynosiła 1m. Laser z układem fotodetekcyjnym 9 znajdował się poza obudową – położenie i drgania lasera względem reszty układu nie mają wpływu na dokładność pomiaru ponieważ występują w obu torach (wzorcowym i pomiarowym) i wzajemnie się kompensują.

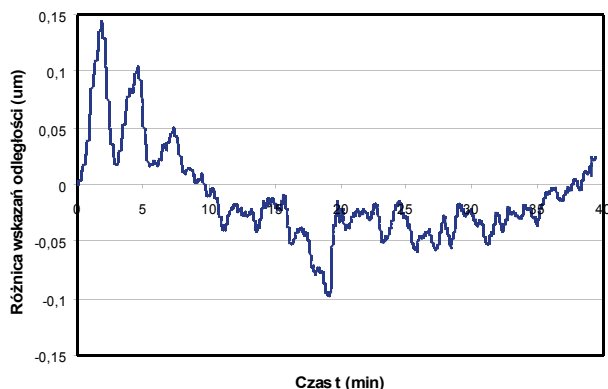


Rys. 4. Stanowisko pomiarowe
Fig. 4. Measuring position



Rys. 5 Zmiany temperatury w układzie
Fig. 5. Change of system temperature

W czasie pomiarów stopniowo ogrzewano i chłodzono płytkę, aby uzyskać gradienty temperatury. Temperatura płytki zmieniała się od ok. 20°C do ok. 35°C, a wskazania interferometru (służącego w tym przypadku za termometr) zmieniały się o ok. 7°C (rys. 5). Po uwzględnieniu ultradźwiękowego pomiaru temperatury i korekcie wskazań interferometru, otrzymano skorygowane wyniki pomiaru odległości w zakresie $\pm 0,15\mu\text{m}$ (rys. 6). Przy pomiarach wykorzystujących metody korekcji temperaturowej dostępnej w interferometrze (pomiar jednopunktowy) niepewność pomiaru wzrastała do ok. $6\mu\text{m}$.

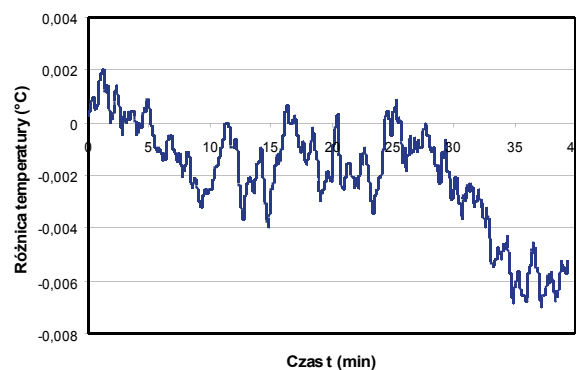


Rys. 6. Skorygowane wyniki pomiaru
Fig. 6. Corrected results of measurements

Aby zorientować się w szumach układu wykonano także serię badań przy wyłączonej płytce grzejnej. Szumy układu (rys. 7) (w stałej temperaturze) nie przekraczały $0,01^\circ\text{C}$, co przy odległości 1m daje pomiar z niepewnością ok. $0,01\mu\text{m}$

4. Wnioski

Na podstawie przedstawionych wyników można stwierdzić, że ultradźwiękowa metoda pomiaru temperatury może przynieść poprawę dokładności pomiarów interferencyjnych, zwłaszcza przeprowadzanych poza laboratoriami ze stabilizacją czynników środowiskowych (temperatura i wilgotność). Ze względu na stosowaną metodę pomiaru, gdzie wynikiem jest średnia wartość



Rys 7. Szumy układu
Fig. 7. Noise of measurement

temperatury na odcinku pomiarowym, metoda nadaje się szczególnie do pomiarów poza specjalistycznymi laboratoriami pomiarowymi. Jako „czujnik” pomiarowy stosowane jest powietrze, którego temperatura nas interesuje. Eliminuje to błąd pomiaru wynikający z przewodności cieplnej czujnika i czasu koniecznego na jego nagrzanie.

W prezentowanych badaniach nie została uwzględniona wilgotność powietrza co powoduje dodatkowy błąd. Jak widać we wzorze występuje wilgotność względna – jest ona zależna od chwilowej temperatury powietrza oraz od zawartości pary wodnej w nim. Zawartość pary wodnej jest stała, o ile nie istnieją źródła wilgoci (np. człowiek) lub elementy pochłaniające.

W prezentowanym układzie odległość pomiędzy torem ultradźwiękowym a interferencyjnym wynosiła ok. 25mm co także nie jest bez znaczenia dla uzyskiwanych wyników. Ideałem byłoby umieszczenie toru ultradźwiękowego pomiędzy wiązkami biegnącymi pomiędzy kostką światłodziącą a zwierciadłem ruchomym.

Pomiar ultradźwiękowy jest – w przeciwieństwie do pomiaru interferencyjnego - pomiarem wrażliwym na ruchy powietrza. W przyszłości należy więc wyeliminować tę wrażliwość (np. drugim torem równoległym) aby nie było konieczności osłaniania toru pomiarowego.

5. Literatura

- [1] Instrukcja interferometru ZLM 500 firmy ZEISS 1999
- [2] Edlen B. The refractive index of air, Metrologia 1966 vol 2 71-80
- [3] Bonsch G. Potulski E. Measurement of the refractive index of air and comparison with modified Edlen's formulae Metrologia 1998 vol. 35 pp 133-139
- [4] Korpelainen V. and Lassila A., Acoustic method for determination of the effective temperature and refractive index of air in accurate length interferometry, Optical Engineering 43 (2004), p. 2400-2409
- [5] Lassila A., Korpelainen V., An acoustic method for determination of the effective temperature and refractive index of air, in Proc. SPIE, 5190, 2003, pp 316-326.
- [6] Obraz J., Ultradźwięki w technice pomiarowej, WNT Warszawa 1983