

Mariusz WIŚNIEWSKI, Dariusz CZUŁEK, Robert SZUMSKI
Główny Urząd Miar
Samodzielne Laboratorium Długości

PODSUMOWANIE PROJEKTU EMRP IND53 LUMINAR LARGE VOLUME METROLOGY IN INDUSTRY

W ramach międzynarodowego projektu LUMINAR opracowano szereg prototypowych przyrządów pomiarowych do pomiarów w dużych objętościach (LVM), nowych sposobów i oprogramowania do kompensacji wpływu czynników atmosferycznych oraz zniekształceń termicznych. Zbudowane przyrządy pomiarowe zostały pomyślnie przetestowane i zademonstrowane w laboratoriach i zakładach przemysłowych.

Słowa kluczowe: metrologia dużych objętości, pomiary, modelowanie, współczynnik załamania światła w powietrzu

SUMMARY OF THE EMRP IND53 LUMINAR PROJECT LARGE VOLUME METROLOGY IN INDUSTRY

As part of the international LUMINAR project, a number of prototype measuring instruments for large volume metrology (LVM), new methods and software to compensate for atmospheric factors and thermal distortions were developed. Measuring instruments have been successfully tested and demonstrated in laboratories and industrial plants.

Keywords: large volume metrology, measurements, modeling, refractive index

1. WSTĘP

W wielu branżach przemysłowych o wysokiej wartości oraz obiektach naukowych występują duże obiekty, urządzenia czy instalacje, które aby mogły działać poprawnie wymagają kontroli położenia, wymiarów lub kształtu kluczowych komponentów na poziomie dziesiątek mikrometrów przeprowadzanych w dużych objętościach rzędu setek m³, często w warunkach dalekich od laboratoryjnych. Zwiększenie dokładności pomiarów daje znaczne korzyści, takie jak: lepsza dokładność wykonania skrzydła samolotu czy kadłuba zmniejsza ilość wymaganego nadmiaru materiału, zmniejszając masę i spalanie paliwa, i umożliwia uzyskanie większej aerodynamiczności; lepsza spójność pomiarowa zapewnia kompatybilne wymiary komponentów pochodzących od wielu producentów. We wszystkich tych scenariuszach pomiar nie jest wykonywany w laboratorium, ale w hali produkcyjnej, in situ, w niekontrolowanych środowiskach, co utrudnia.

Wymagania dotyczące dokładności pomiarów wykonywanych w halach produkcyjnych, w niekontrolowanych środowiskach wskazane przez potencjalnych użytkowników końcowych wymagały rozwiązań kilku problemów: kompensacji rozszerzalności cieplnej konstrukcji; kompensacji błędów spowodowanych przez załamanie światła w powietrzu, które wpływa na wszystkie optyczne przyrządy pomiarowe stosowane w LVM; zapewnienie spójności pomiarowej z układem SI dla bezwzględnych systemów pomiaru odległości stosowanych w środowiskach przemysłowych; możliwości mierzenia więcej niż jednej pozycji jednocześnie przy dużej szybkości przesyłania danych; umiejętności posługiwania się precyzyjną metrologią w trudnych warunkach; dostępności rygorystycznej oceny niepewności w celu uniknięcia błędnych decyzji podczas produkcji.

2. WYNIKI DZIAŁANIA PROJEKTU

W projekcie LUMINAR [1] uczestniczyły National Physical Laboratory (NPL), Conservatoire national des arts et métiers (CNAM), Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica (INRIM), Główny Urząd Miar (GUM), The University of Bath, University College London (UCL), Karlsruhe Institute of Technology (KIT), Airbus Operations Limited, The University of Sheffield, SIOS Messtechnik GmbH. Każdy z partnerów projektu skoncentrował się na dziedzinie, w której ma najszerszą wiedzę, dzięki czemu możliwe było opracowanie równolegle wielu produktów w krótkim czasie. Badania przeprowadzone przez różne zespoły dostarczyły szeroki zakres wyników, które spełniają wszystkie naukowe cele projektu badawczego.

2.1. Innowacyjne systemy pomiarowe

Pierwszym celem projektu było opracowanie innowacyjnych systemów pomiarowych, które wypełniają lukę między fotogrametrią a laser trackerami, pracując w objętości $10\text{ m} \times 10\text{ m} \times 5\text{ m}$ z docelową niepewnością pomiaru $50\text{ }\mu\text{m}$. Opracowano cztery systemy pomiarowe:

1) Prototypowy system opracowany przez INRIM oparty na przecinających się płaszczyznach (InPlanT), który wykorzystuje dwie osie liniowe. Zapewniło to powtarzalność $45\text{ }\mu\text{m}$ w przemysłowej kampanii testowej na miejscu z wykorzystaniem krótkich wersji dwóch osi pomiarowych symulujących obszar $10\text{ m} \times 10\text{ m}$.

2) Prototypowy system podobny do wideogrametrii, ale wykorzystujący sferyczne cele i laserowe oświetlenie przez obiektyw. Zostało to przetestowane w środowisku laboratoryjnym i uzyskało niepewność pomiaru $100\text{ }\mu\text{m}$ w zakresie 3 m .

3) System z NPL oparty na skanowaniu częstotliwościowym interferometrii rozbieżnej wiązki, który wykazał niepewność pomiaru $50\text{ }\mu\text{m}$ na małych (1 m^3) objętościach [2,3].

4) System o dłuższym zasięgu, ponownie wykorzystujący interferometrię ze skanowaniem częstotliwościowym (FSI), który wykazano w 10-metrowych zakresach w środowisku laboratoryjnym i przemysłowym. Testy wykazały osiągnięcie niepewności pomiaru na poziomie $50\text{ }\mu\text{m}$.

2.2. Wyznaczanie odległość bezwzględnej

Drugim celem projektu było opracowanie nowatorskich przyrządów do pomiarów odległości bezwzględnej, ze spójnością pomiarową z SI, działających w zakresie dziesiątek metrów. Opracowane zostały dwa nowe systemy pomiarowe oraz ulepszono obiekt testowy:

1) Przenośny telemetr opracowany przez CNAM, oparty na tanich podzespołach działających przy długości fali 1550 nm , które mogą mierzyć w zakresie 50 m , z rozdzielczością i niepewnością pomiaru około $2\text{ }\mu\text{m}$, tolerancją na przerwanie wiązki i łatwą obsługą.

2) Interferometr śledzący z bezwzględnym wyznaczaniem odległości w oparciu o interferometrię o wielu długościach fal, opracowany przez PTB, uzyskujący bezwzględny pomiar odległości z odchyleniami standardowymi $60\text{ }\mu\text{m}$ na długości ścieżki 40 m (w trybie IFM urządzenie działa przy około $1\text{ }\mu\text{m} + 0,1\text{ }\mu\text{m} / \text{m}$ niepewności).

3) 50 m komparator interferencyjny GUM został ulepszony o dodatkowe czujniki temperatury, ciśnienia i wilgotności wraz z obwodami grzewczymi, do symulowania środowiska przemysłowego, aby umożliwić testowanie przyrządów zbudowanych w ramach projektu na skompensowanym interferometrze laserowym.

2.3. Pomiar i kompensacja współczynnika załamania światła

Trzecim celem projektu było opracowanie metody kompensacji współczynników załamania światła w powietrzu w środowisku przemysłowym, z dokładnością 10^{-7} dla objętości około $10 \text{ m} \times 10 \text{ m} \times 5 \text{ m}$. Trzy podejścia zostały pomyślnie opracowane i przetestowane:

1) Przenośny telemetr z CNAM, wyposażony w drugą długość fali równą 785 nm, umożliwiającą osiągnięcie niepewności pomiaru $500 \mu\text{m}$ z kompensacją współczynnika załamania światła w zakresie 50 m.

2) Interferometr śledzący z PTB, miał dodatkowy zestaw długości fal i pomimo pewnych problemów optycznych wykazał zgodność z konwencjonalnym pomiarem współczynnika załamania w zakresie 5×10^{-7} [4].

3) W UCL opracowano szereg narzędzi do fotogrametrii (obrazowanie wielospektralne, cyfrowa kamera aksonometryczna, analiza refrakcji w MathCad, oprogramowanie do regulacji objętościowego refrakcji wiązki) i połączono je w system, który może wykonywać fotogrametryczną analizę obrazów z modelowaniem refrakcji i niestabilnością sygnału w szerokim zakresie.

2.4. Kompensacja efektów termicznych dla mierzonych obiektów

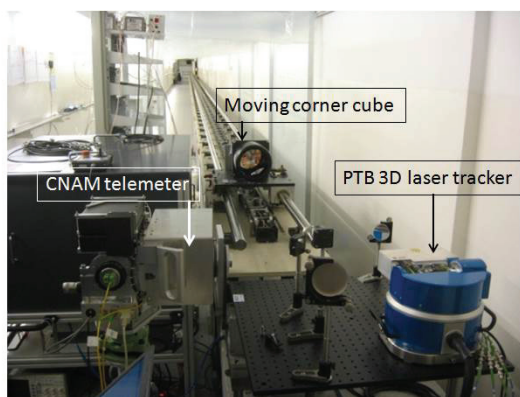
Czwartym celem projektu było opracowanie modelowania by przewidywać zachowanie zespołów wieloskładnikowych (do 5 m) w środowiskach nieidealnych (z odchyleniem temperatury o 5°C). Cel został osiągnięty przez Uniwersytet w Bath dzięki dwóm kluczowym pracom:

1) Opracowano i wdrożono hybrydowy program kompensacji termicznej. W tym schemacie dane z podzbioru pomiarów wymiarowych przekazywane są z powrotem do analizy modelu elementów skończonych wraz z danymi temperatury, aby iteracyjnie poprawić dokładność symulacji FEA. Model można następnie wykorzystać do kompensacji termicznej całego zespołu lub konstrukcji.

2) Zaprojektowany komponent lub zespół, typowy dla przemysłu lotniczego, został zaprojektowany jako instrument i wykorzystywany jako pierwszy etap techniki hybrydowej w środowisku laboratoryjnym. Technika ta osiągnęła dokładność lepszą niż teoria ekspansji liniowej i była lepsza niż pomiary śledzone za pomocą pojedynczych czujników laserowych.

2.5. Testowanie i demonstracja możliwości systemów pomiarowych

Piątym celem projektu była weryfikacja i demonstracja możliwości opracowanych nowych technologii i zbudowanych instrumentów. Pomiary wykonane zostały w laboratoriach uczestników projektu, oraz rzeczywistych środowiskach przemysłowych. Zaprezentowano praktyczne możliwości uzyskania spójności pomiarowej dla metrologii dużych objętości w środowiskach przemysłowych.



Rys. 1. View of the 50 m long GUM bench with PTB and CNAM devices aligned for measurements

Przeprowadzone zostały trzy kampanie pomiarowe:

1) Przeprowadzono porównanie wyników uzyskiwanych przez instrumenty opracowane przez PTB i CNAM na zmodernizowanym stanowisku pomiarowym GUM. Umożliwiło to sprawdzenie ostatecznej niepewności pomiaru nowych instrumentów (Rys. 1).

2) System FSI opracowany przez NPL zostało przetestowany na ścianie referencyjnej PTB, co pozwoliło na ustalenie niepewności pomiaru dla tej metody w dobrym środowisku.

3) Testy przemysłowe wszystkich opracowanych instrumentów odbyły się w Airbus, Filton w Wielkiej Brytanii w środowisku fabrycznym. Obejmowały pomiary na 45-metrowej przekątnej budynku (maksymalny zasięg dostępny w pomieszczeniu) i na 12-metrowej platformie testowej. Wszystkie instrumenty, które zostały dostarczone do Airbusa, były w stanie wykonać zadowalające pomiary w miejscu, w którym występowały duże gradienty temperatury, wibracje i hałas akustyczny.

3. PODSUMOWANIE

Projekt spełnił wszystkie techniczne i naukowe cele oraz przekroczył planowaną liczbę publikacji, prezentacji konferencyjnych i warsztatów. Ponadto badania zaowocowały pięcioma zgłoszeniami patentowymi. Przeprowadzone badania pozwoliły na stworzenie 10 całkowicie nowych przyrządów lub technik pomiarowych. Wyniki projektów zostały zaprezentowane społeczności użytkowników końcowych. Kilka wyników projektu jest już wykorzystywanych przez partnerów projektu. Wyniki projektu są rozwijane w ramach nowej współpracy badawczej. Niektóre produkty projektu będą rozwijane przez firmy metrologiczne i staną się w produktami dostępnymi komercyjnie.

LITERATURA

1. Strona WWW projektu LUMINAR: www.emrp-luminar.eu.
2. Hughes E. B., Warden M. S.: A novel co-ordinate measurement system based on frequency scanning interferometry, *Journal of the CMSC*, ISSN 2328-6067 (2013).
3. Warden M S, Precision of frequency scanning interferometry distance measurements in the presence of noise, *Applied Optics*, 53 580-558 (2014).
4. Meiners-Hagen K., Meyer T., Prellinger G., Pöschle W., Dontsov D., Pollinger F.: Overcoming the refractivity limit in manufacturing environment, *Optics Express*, 24 (21) 24092-24101 (2016)