

Krajowa światłowodowa sieć dystrybucji wzorcowych sygnałów czasu i częstotliwości i jej znaczenie dla rozwoju metrologii

Albin Czubla (Główny Urząd Miar),

Jerzy Nawrocki (Obserwatorium Astrogeodynamiczne Centrum Badań Kosmicznych PAN),

Przemysław Krehlik (Akademia Górniczo-Hutnicza),

Artur Binczewski (Poznańskie Centrum Superkomputerowo-Sieciowe),

Janusz Pieczerek (Orange Polska S.A.),

Michał Zawada, Roman Ciuryło (Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu, Instytut Fizyki),

Eugeniusz Pazderski (Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu, Obserwatorium Astronomiczne),

Tomasz Olszak (Politechnika Warszawska, Wydział Geodezji i Kartografii)

Światłowodowa sieć dystrybucji wzorcowych sygnałów czasu i częstotliwości tworzona jest w Polsce już od 2004 r., poprzez tworzenie lokalnych połączeń światłowodowych pomiędzy GUM a innymi instytucjami w obrębie aglomeracji warszawskiej, posiadającym atomowe wzorce czasu i częstotliwości. W 2012 r. uruchomiono permanentne łącze światłowodowe o długości 420 km pomiędzy GUM a AOS (Obserwatorium Astrogeodynamiczne CBK PAN) w Borowcu k. Poznania, które następnie, dzięki projektowi OPTIME, zostało zmodernizowane i rozszerzone o łącze światłowodowe o długości ok. 330 km pomiędzy AOS a KL FAMO (Krajowe Laboratorium Fizyki Atomowej, Molekularnej i Optycznej) przy UMK w Toruniu, posiadające dwa zegary optyczne na atomach strontu, oraz dodatkowe łącze z KL FAMO do OA UMK (Obserwatorium Astronomiczne UMK w Piwnicach k. Torunia), prowadzącego obserwacje radioastronomiczne [1].

Sieć została utworzona w oparciu o włókna światłowodowe udostępnione przez Orange Polska S.A. i PCSS (Poznańskie Centrum Superkomputerowo-Sieciowe) oraz przetworniki elektryczno-optyczne, dwukierunkowe wzmacniacze optyczne i systemy z elektroniczną stabilizacją czasu propagacji sygnału, opracowane i rozwijane przez AGH (Akademia Górniczo-Hutnicza) [2]. Zastosowane techniki światłowodowe pozwalają w bardzo krótkim czasie uśrednienia osiągnąć precyzję (stabilność) porównywalnych lub dystrybuowanych wzorcowych sygnałów czasu i częstotliwości. Wyjątkową na skalę światową cechą tej sieci jest permanentne połączenie światłowodowe dwóch laboratoriów UTC(k), tj. GUM realizującego UTC(PL) i AOS realizującego UTC(AOS), jednocześnie znacznie odległych od siebie (o ok.

270 km). Dane z porównań światłowodowych UTC(PL) i UTC(AOS) gromadzone są w sposób ciągły na serwerze BIPM (Międzynarodowego Biura Miar) od kwietnia 2013 r. Istotne jest również dostarczanie przez tę sieć wzorcowych skalibrowanych sygnałów częstotliwości dla potrzeb fizyki molekularnej i optycznej oraz radioastronomii. Sieć światłowodowa z podobnego rodzaju zastosowaniami tworzona jest jeszcze we Włoszech (LIFT) i Francji (REFIMEVE). W stosunkowo krótkim czasie uzyskano znaczący wpływ tej sieci na rozwój metrologii czasu i częstotliwości oraz dziedzin, w których pomiar zależy od precyzyjnej częstotliwości, zarówno na arenie krajowej, jak i międzynarodowej. Przewiduje się również jej zastosowanie do przeprowadzania bardzo dokładnych obserwacji geodezyjnych.

W 2013 r. na łączu światłowodowym GUM-AOS przeprowadzony został eksperyment weryfikujący dokładność kalibracji łącz GNSS do transferu czasu. Kalibracja dokonywana była za pomocą systemu kalibracyjnego BIPM, uzyskano zgodność wyników z dokonaną niezależnie kalibracją poprzez łącze światłowodowe na poziomie <1 ns [3]. Równocześnie łącze światłowodowe GUM-AOS stało się odniesieniem (test bed) do weryfikacji rozwijanych przez różne ośrodki na całym świecie satelitarnych metod transferu czasu. BIPM wykorzystuje to łącze także do oceny skuteczności nowej metody obliczeniowej Integer PPP do transferu czasu, redukującej w metodzie GPS PPP nieciągłości, gdzie potwierdzono przez porównanie z pomiarami światłowodowymi redukcję szumu: z ok. 200 ps w metodzie GPS PPP do ok. 60 ps w metodzie GPS I-PPP [4]. Analogicznie NIST (National Institute of Standards and Technology) wykorzystuje łącze światłowodowe GUM-AOS do

walidacji rozwijanej nowej metody obliczeniowej redukcji przesunięć fazy RRS (revised RINEX-shift) w obserwacjach RINEX wykorzystywanych do transferu czasu [5].

KL FAMO, w oparciu o dostarczony poprzez sieć światłowodową z AOS sygnał częstotliwości z masera wodorowego, bezpośrednio kontrolowany i sterowany względem skali czasu UTC, wyznaczyło absolutną wartość częstotliwości obserwowanego przejścia zegarowego w atomach strontu ^{88}Sr w dwóch niezależnych pracujących w KL FAMO zegarach optycznych [6]. Uzyskano najdokładniejszy na świecie wynik bezpośredniego pomiaru tego przejścia, pozostający w zgodzie z wcześniejszymi pracami i przewidywaniami innych zespołów. Porównano również stabilność wzorców optycznych w KL FAMO w odniesieniu do sygnału z masera wodorowego AOS.

Sygnał dostarczany do KL FAMO z AOS jest również używany w optycznej spektroskopii absorpcyjnej wzmocnionej wnęką słabych przejść cząsteczkowych [7]. Umożliwiło to, po raz pierwszy na świecie w bezpośrednim odniesieniu do wzorca sekundy, pomiar częstotliwości przejść w cząsteczce CO nową techniką, w której na obu osiach widma mierzona jest jedynie częstotliwość [8]. Rozwijanie tej technologii ma znaczenie zarówno dla zastosowań w badaniach atmosfery, efektu cieplarnianego oraz zmian klimatycznych poprzez tworzenie nowej generacji spektroskopowych baz danych o sub-procentowej dokładności, jak i dla podstawowych badań oddziaływań fundamentalnych oraz testowania elektrodynamiki kwantowej w cząsteczkach.

Sygnał częstotliwości dostarczony z AOS do OA UMK w Piwnicach k. Torunia jest wykorzystywany w obserwacjach VLBI (Very Long Base Interferometry), co ułatwia synchronizację pomiarów, zwiększa ich precyzję i w praktyce minimalizuje dryft częstotliwości.

Istniejąca sieć światłowodowa, z perspektywą wykorzystania w przyszłości sygnałów częstotliwości lokalnie synchronizowanych do optycznych wzorców częstotliwości i fontann cezowych, pozwala wyznaczyć niezwykle użyteczną z punktu widzenia geodezji, jedną z tzw. naturalnych współrzędnych punktu na powierzchni Ziemi – wartość różnicy potencjału przyspieszenia siły ciężkości. Potencjał ten jest wykorzystywany w definicji wysokości. Permanentne pomiary z wykorzystaniem zegarów optycznych i sieci światłowodowej mogą być również stosowane do monitoringu przemieszczeń, w znaczeniu zmiany

potencjału, co daje, wraz z metodami geometrycznymi, możliwość wyznaczenia parametrów deformacyjnych Ziemi [9].

Wymienione powyżej przykłady wykorzystania zbudowanej w Polsce i nadal rozwijanej światłowodowej sieci dystrybucji wzorcowych sygnałów czasu i częstotliwości, potwierdzają ich bardzo istotną rolę dla rozwoju metrologii, w tym dla zachowania spójności pomiarowej w prowadzonych w ośrodkach naukowych pomiarach o wysokiej precyzji i, dzięki zastosowaniu tej sieci, również wysokiej dokładności. Pozwala to na większą kontrolę prowadzonych eksperymentów oraz porównanie nie tylko jakościowe, ale i ilościowe. Otwiera to też nowe możliwości dla rozwoju geodezji i technik stosowanych do precyzyjnego transferu czasu. Tego rodzaju sieć staje się niezastąpionym narzędziem we współczesnej metrologii czasu i częstotliwości oraz przenosi niektóre pomiary od razu na najwyższy światowy poziom.

Literatura

- [1] www.optime.org.pl
- [2] Krehlik P., Śliwczyński Ł., Buczek Ł., Kołodziej J., Lipiński M., *ELSTAB – fiber optic time and frequency distribution technology – a general characterization and fundamental limits*. IEEE Trans. on UFFC. PP (2015). DOI: 10.1109/TUFFC.2015.2502547.
- [3] Jiang Z., Czubla A., Nawrocki J., Lewandowski W., Arias E. F., *Comparing a GPS time link calibration with an optical fibre self-calibration with 200 ps accuracy*, Metrologia 52 (2015), 384-391.
- [4] Petit G., Kanj A., Loyer S., Delporte J., Mercier F., Perosanz F., *1×10^{-16} frequency transfer by GPS PPP with integer ambiguity resolution*, Metrologia 52 (2015), 301-309.
- [5] Yao J., Skakun I., Jiang Z., Levine J., *A detailed comparison of two continuous GPS carrier-phase time transfer techniques*, Metrologia 52 (2015), 666-676.
- [6] Morzyński P. i in., *Absolute measurement of the $^1\text{S}_0 - ^3\text{P}_0$ clock transition in neutral ^{88}Sr over the 330 km-long stabilized fibre optic link*, Scientific Reports 5 (2015), 17495 doi:10.1038/srep17495.
- [7] Cygan A. i in., *Absolute molecular transitions frequencies measured by three cavity-enhanced spectroscopy techniques*, Journal of Chemical Physics (praca wysłana do druku).
- [8] Cygan A. i in., *One-dimensional frequency-based Spectroscopy*, Optics Express 23 (2015), 14472-14486.
- [9] Vestøl O. i in., *Review of current and near-future levelling technology – a study project within the NKG working group of Geoid and Height Systems*, Lantmäterirapport 2014:2.