

J. Kołodziej, P. Krehlik, M. Lipiński, Ł. Śliwczyński
Akademia Górniczo-Hutnicza, AGH
Kraków,
mlipinsk@agh.edu.pl

A. Czubla
Główny Urząd Miar, GUM
Warszawa,
a.czubla@gum.gov.pl

A. Binczewski, W. Bogacki, P. Ostapowicz, M. Stroiński,
K. Turza
Poznańskie Centrum Superkomputerowo-Sieciowe, PCSS
Poznań,
wojbor@man.poznan.pl

P. Dunst, D. Lemański, J. Nawrocki, P. Nogaś
Centrum Badan Kosmicznych PAN, CBK
Borowiec,
nawrocki@cbk.poznan.pl

W. Adamowicz, J. Igalson, T. Pawszak, J. Pieczerak
Orange Poland, TPSA
Warszawa,
Janusz.Pieczerak@orange.com

OGÓLNOPOLSKI SYSTEM DYSTRYBUCJI ATOMOWYCH WZORCÓW CZASU I CZĘSTOTLIWOŚCI

Streszczenie: Systemem dystrybucji ultraprecyzyjnych sygnałów czasu i częstotliwości w światłowodowych sieciach telekomunikacyjnych jest realizowany w ramach projektu OPTIME. Celem projektu jest opracowanie rozwiązań dla stworzenia ogólnopolskiej struktury dystrybucji atomowych wzorców czasu i częstotliwości, wykorzystując referencyjne laboratoria (wyposażone w wzorce atomowe), sieci dystrybucyjne (oparte przede wszystkim o połączenia światłowodowe) oraz lokalne repozytoria czasu, z dokładnością dostosowaną do potrzeb różnych grup użytkowników.

1. WSTĘP

Projekt OPTIME zakłada stworzenie ultraprecyzyjnego systemu transferu czasu i częstotliwości z wykorzystaniem telekomunikacyjnych łączy światłowodowych. W odróżnieniu od obecnie powszechnie stosowanych systemów opartych o łączność satelitarną, łącze światłowodowe daje możliwość porównywania zegarów w czasie rzeczywistym bez utraty jakości przesyłanego sygnału. Wydaje się dziś, że światłowodowe metody transferu czasu i częstotliwości są jedynymi, które zdołają zagwarantować dokładności porównywalne do nowo tworzonych i dopiero projektowanych wzorców. W projekcie OPTIME zakłada się zbudowanie zarówno szkieletu sieci dla użytkowników wymagających bardzo dokładnych sygnałów (radioastronomowie, fizycy, metrologowie itd.), oraz znalezienia metod udostępniania tych sygnałów, z mniejszą dokładnością (w zależności od potrzeb), dla różnych grup użytkowników.

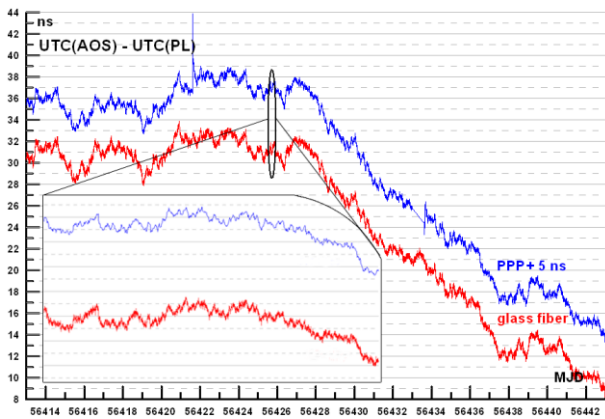
Rozwój projektu ma też na celu upowszechnienie dostępności super dokładnych źródeł czasu i częstotliwości wśród użytkowników, dla których zakup własnego wzorca jest nieprzekraczalną barierą. Ponadto użytkownicy tych systemów będą zwolnieni z konieczności posiadania odpowiedniej kadry, oraz szerokiej wiedzy na temat utrzymania wzorców. To właśnie problemy poprawnej synchronizacji do światowych lub krajowych skal odniesienia, bieżące utrzymanie i kontrola dryfu wzorca, są częstymi, pozafinansowymi barierami.

2. ISTNIEJĄCE POŁĄCZENIE PILOTAŻOWE

Pomysł projektu OPTIME powstał jako naturalna konsekwencja doświadczeń zdobytych podczas ponadrocznej, ciągłej eksploatacji 421,4 kilometrowego połączenia światłowodowego pomiędzy Głównym Urzędem Miar (GUM) w Warszawie i Obserwatorium Astrogeodynamicznym Centrum Badań Kosmicznych PAN (CBK) w Borowcu pod Poznaniem. Po kilku udanych eksperymentach laboratoryjnych z dalekosiężnym, światłowodowym transferem czasu i częstotliwości, 27 stycznia 2012 uruchomiono połączenie pomiędzy GUM i CBK. Od tego dnia, link jest w ciągłe eksploatowany i umożliwił serię eksperymentów porównujących skale czasowe UTC (PL) i UTC (AOS). [1].

Urządzenia do transmisji sygnałów czasu oraz częstotliwości zostały opracowane przez partnera projektu (AGH) i działają z wykorzystaniem pojedynczego, dedykowanego włókna światłowodowego oraz specjalnie skonstruowanych wzmacniaczy dwukierunkowych. Budowa urządzeń transmisyjnych została już opisana w kilku publikacjach naukowych. Zastosowane w systemie rozwiązanie aktywnej stabilizacji pętli opóźnienia propagacji w łączy światłowodowym opisane zostało w [2], przy czym metodę wspólnego przekazywania czasu i częstotliwości przedstawiono w [3]. Problem rozszerzenia zasięgu łącza omówiono szczegółowo w [4] i [5].

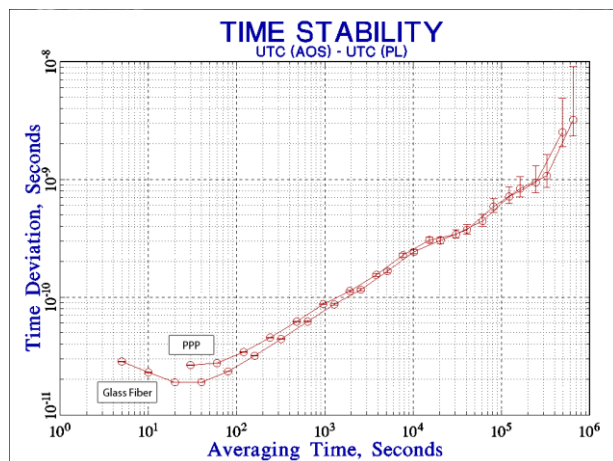
Na rys. 1 przedstawione są wyniki z ponadrocznego ciągłego porównania skali czasu UTC (PL) i UTC (AOS) w odniesieniu do innych metod opartych o transmisję GPS. Na rysunku 1 przedstawione są wyniki porównania wzorców z wykorzystaniem metody odniesienia GPS PPP. Dla lepszej przejrzystości wykresu krzywa dla łącza światłowodowego jest przesunięta o -15ns.



Rys. 1. Resultat porównania skal UTC(AOS) oraz UTC(PL) z wyk.: łącza optycznego (czerwony) i metody PPP (niebieski)

Na rys. 2 zaprezentowane jest porównanie dokładności metody światłowodowego transferu czasu w stosunku do metody satelitarnej PPP (obecnie jednej z najbardziej dokładnych używanych do porównań czasu laboratoriów narodowych). Jak wynika z przeprowadzonych pomiarów krótkookresowa precyzja porównań zegarów UTC (AOS) oraz UTC (PL), z wykorzystaniem łącza światłowodowego, sięga 10 pikosekund i jest osiągnięta w czasie rzeczywistym - w trakcie pomiaru. Jest to niemożliwe do osiągnięcia żadną inną aktualnie używaną metodą transferu czasu. Porównywalne, nieco gorsze wyniki (sigma ~15 ps) pozwala uzyskać transfer z wykorzystaniem satelitarnych systemów nawigacyjnych (GPS, GLONASS, Galileo). Są one jednak uzyskiwane w wyniku post-processingu - najwcześniej po okresie kilku dni od przeprowadzenia pomiarów. Ponadto bardzo problematyczna jest kalibracja tych urządzeń.

Pierwsze eksperymenty pokazują, że użycie telekomunikacyjnych łączy światłowodowych może zrewolucjonizować podejście oraz system tworzenia narodowych i międzynarodowych skal czasu.



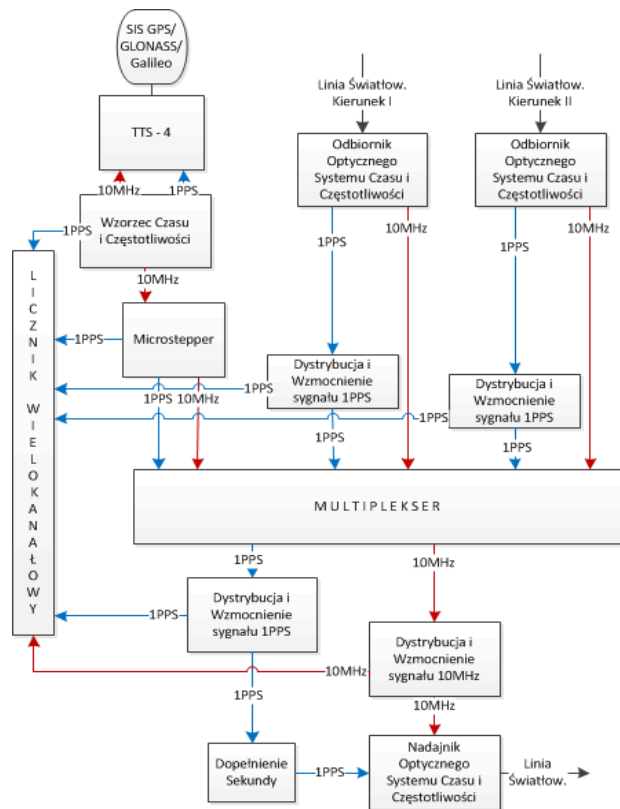
Rys. 2. Analiza stabilności TDEV

Eksploatacja systemu pilotażowego dostarczyła wielu cennych informacji statystycznych, opisujących łącze pod względem jego zachowania przy zmianach parametrów urządzeń, wyzwalanych warunkami środowiskowymi. Informacje te umożliwią zbudowanie jeszcze doskonalszych urządzeń, nie wymagających manualnej korekty parametrów linii. Ponadto doświadczenie

to pokazało z jakimi praktycznymi problemami można się spotkać w trakcie eksploatacji tego typu systemu dystrybucji wzorca czasu i częstotliwości. Dało to między innymi odpowiedzi na pytania w jaki sposób muszą być zarządzane urządzenia, szczególnie dla prawidłowej detekcji stanów anormalnych oraz ilości i czasie niedostępności łącza wynikających z różnego rodzaju awarii. To właśnie ten ostatni parametr był przyczynkiem do rozważenia koncepcji budowy lokalnych repozytoriów, czyli węzłów wykrywających awarie w sposób automatyczny i gwarantujących podtrzymanie dostarczanych sygnałów, o odpowiedniej jakości w czasie awarii – niedostępności łącza.

3. KONCEPCJA SYSTEMU OPTIME

Sieć OPTIME to zbiór kilku elementów składających się na kompleksowy system niezawodnej dystrybucji sygnałów czasu/sekundy (1PPS) i częstotliwości (10MHz). Pierwszym jego elementem są laboratoria referencyjne wyposażone w zegary - wzorce czasu. Każde z tych laboratoriów może zapewnić sygnały czasu i częstotliwości w całym systemie z odpowiednią, bardzo wysoką dokładnością i stabilnością. W praktyce bardzo pożądane jest, aby wzorcami czasu były masery wodorowe, na bieżąco kontrolowane i korygowane według algorytmów opracowywanych przez wykwalifikowane zespoły ekspertów. Te laboratoria referencyjne muszą znajdować się w wiodących ośrodkach, gwarantujących wysoką niezawodność i stabilność dostarczanych sygnałów. Parametry całego systemu są ściśle zależne od dokładności tych laboratoriach.



Rys. 3. Schemat repozytorium

Drugim elementem systemu są lokalne repozytoria. Mogą one być wyposażone w tańsze wzorce umożliwia-

jące „podtrzymanie” dystrybucji sygnału na czas awarii – utraty sygnału odniesienia. Obecnie trwają prace nad opracowaniem takiej struktury repozytorium, aby zagwarantować automatyczne wykrycie awarii w sieci oraz jak najbardziej płynne przełączenie na źródło zapasowe. Dla umożliwienia prawidłowego przełączenia niezbędna jest także synchronizacja zegarów repozytoriów do laboratoriów referencyjnych. Koncepcja repozytorium przedstawiona została na rysunku nr. 3

Doświadczenia z ponadrocznego działania linii pilotażowej umożliwiły zidentyfikowanie źródeł poszczególnych awarii, średniego czasu ich trwania oraz wpływu na działanie systemu. Okazało się, że szybkie wykrycie i identyfikacja źródła problemu jest w sieci transmisji czasu i częstotliwości zadaniem nietrywialnym i wymagającym nieszablonowych rozwiązań. Znaczny ciężar identyfikacji problemów systemu jest przerzucony właśnie na repozytoria. Rozwiązanie to zwiększa niezawodność systemu i minimalizuje skutki potencjalnych awarii dla użytkowników końcowych.

Innym ważnym elementem systemu jest sieć dystrybucji. Szkielet sieci OPTIME wykorzystuje łącza światłowodowe operatorów TP SA. i PCSS - sieci PIONIER. Wszystkie laboratoria referencyjne, lokalne repozytoria i użytkownicy wymagający największej precyzji odbieranych sygnałów, będą podłączeni bezpośrednio do dystrybucyjnej sieci światłowodowej. Jednakże, w architekturze OPTIME będzie miejsce dla realizacji połączeń umożliwiających wykorzystanie alternatywnych systemów transmisyjnych, w tym sieci IP, dla użytkowników o mniejszych wymaganiach na dokładność sygnałów.

W ramach projektu planuje się także zaoferować usługę dystrybucji czasu z lokalnego repozytorium, z którego będzie dostarczany sygnał IPPS do użytkownika za pośrednictwem łącza światłowodowego krótkiej odległości. Powiązanie tego sygnału z ogólnie dostępnymi zapytaniami NTP (poprzez sieć IP) umożliwi uzyskanie sygnału czasu z dokładnością ok 5 μ s. Sposób ten umożliwi wyeliminowanie wpływu niesymetrii połączeń w sieci IP na dokładność synchronizacji czasu.

W celu podniesienia jakości usługi dystrybucji czasu i częstotliwości, oraz zagwarantowania jej właściwej funkcjonalności, niezbędne jest wdrożenie narzędzi monitoringu i zarządzania wszystkimi urządzeniami systemu. W odróżnieniu od typowych sieci telekomunikacyjnych, praktycznie nie istnieją takie narzędzia ani nawet standardy lub wytyczne. W związku z tym w ramach projektu planowane jest stworzenie własnego systemu korzystającego z standardów sprawdzonych w sieciach telekomunikacyjnych i adaptowanych do specyficznych wymagań przesyłu czasu i częstotliwości. Jest niezwykle istotne bardzo szybkie wykrywanie wszelkich anomalii w działaniu sieci jak i poszczególnych urządzeń. Innym istotnym aspektem warstwy zarządzania jest zapewnienie wiarygodności otrzymywanych sygnałów, szczególnie w bardzo precyzyjnych pomiarach oraz systemach finansowych i bezpieczeństwa. Często zafałszowany (nieodpowiedni impuls) jest większym problemem niż jego całkowity brak. Dlatego też monitoring systemu oraz możliwość jego integracji z aplikacjami użytkowników w celu bardzo szybkiej informacji o po-

tencjalnych błędach transmisji, wydaje się być wręcz krytyczna.

W ramach projektu OPTIME opracowywana jest także koncepcja ogólnopolskiej architektury, systemu połączeń dystrybucji czasu i częstotliwości. W ramach tego przeprowadzono analizę zapotrzebowania na taką usługę. W tabeli 1 przedstawiono pierwsze oszacowanie potencjalnych potrzeb z podziałem na grupy użytkowników oraz ich wymagania na dokładność sygnałów oraz konieczność ich synchronizacji z czasem urzędowym.

Tab. 1. Potencjalne zapotrzebowanie na sygnały czasu i częstotliwości

Użytkownicy	Synch.	Stab. Częst.	Czas Legalny	Ilość pot. użytkowników
NUAKA				
Lab. T&F	1ns	1.00E-15	NIE	100
Lab. Opt. Astro	1ns	1.00E-14	NIE	100
Lab. Fizyczne	10 ns	1.00E-17	NIE	100
PRZEMYSŁ				
Telekomunikacja	< 3 μ s	1.00E-12	TAK	100 M
Tech. mobilne	< 3 μ s	1.00E-12	TAK	100 M
Transport.	1 ms	1 μ s/dzień	TAK	100 K
BEZPIECZEŃSTWO				
Bank/Finanse.	1-20 ms	-	TAK	10 K
Przesył Danych	-	-	TAK	100 K
Kryptografia	1 μ s	-	TAK	100 K

4. PIERWSZE POŁĄCZENIE W RAMACH SIECI OPTIME

W pierwszym etapie, projekt OPTIME planuje realizację połączenia dwóch referencyjnych laboratoriów (AOS oraz GUM) linku dystrybucyjnego do użytkowników naukowych w Toruniu. Cały system będzie obejmował ponad 700 km długości sieci światłowodowej (patrz rys. 4).



Rys. 4. Połączenia w sieci OPTIME

Wdrożenie połączenia z Toruniem wprowadzi nową jakość w przeprowadzanych eksperymentach z dziedziny fizyki atomowej, molekularnej optycznej i astronomii.

Ponadto planowane jest także wdrożenie repozytoriów lokalnych (w Poznaniu oraz Toruniu) i przeprowadzenie serii testów w celu weryfikacji założeń ich praktycznej funkcjonalności.

Całość eksperymentów przeprowadzonych w tym zakresie jest istotnym elementem do prawidłowej realizacji następnego kroku jakim jest wdrożenie ogólnopolskiej siatki połączeń dystrybucji czasu i częstotliwości.

5. PRZYSŁOŚĆ PROJEKTU OPTIME

Projekt OPTIME jest demonstracją ogromnego potencjału jaki niesie wykorzystanie telekomunikacyjnych sieci światłowodowych dla celów realizacji dystrybucji sygnałów czasu i częstotliwości. Wykorzystanie sieci telekomunikacyjnych umożliwi podniesienie jakości działania oraz dokładności laboratoriów czasu. Globalne użycie tych metod w sposób znaczący ułatwi realizację krajowych oraz międzynarodowych skal czasu skracając do minimum czas po jakim wyniki porównań są publikowane. W projekcie zakłada się także poszukiwania metod transmisji sygnałów czasu i częstotliwości w powszechnych systemach telekomunikacyjnych, a także ogólnodostępnych sieciach Ethernet. Nie wyklucza się tu także wykorzystania i optymalizacji istniejących rozwiązań w tym zakresie. Możliwość przeniesienia funkcjonalności systemu OPTIME do powszechnego środowiska sieci telekomunikacyjnych dałaby ogromny potencjał rozwoju tych usług. Jednak wydaje się dzisiaj, że ze względu na specyfikę tych sieci zawsze będą się one charakteryzować mniejszą dokładnością od realizowanego w ramach projektu OPTIME połączenia za pomocą dedykowanego systemu oraz wydzielonego włókna światłowodowego.

PODZIĘKOWANIA

Projekt OPTIME jest współfinansowany ze środków Narodowe Centrum Badań i Rozwoju z Polski do Programu Badań Stosowanych.

SPIS LITERATURY

- [1] Ł. Śliwczyński, P. Krehlik, A. Czubla, Ł. Buczek and M. Lipiński, “Dissemination of time and RF frequency via a stabilized fibre optic link over a distance of 420 km”, *Metrologia* 50, 133-145, 2013.
- [2] Ł. Śliwczyński, P. Krehlik, Ł. Buczek and M. Lipiński, “Active propagation delay stabilization for fiber-optic frequency distribution using controlled electronic delay lines”, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 60, pp. 1480-1488, 2011
- [3] P. Krehlik, Ł. Śliwczyński, Ł. Buczek and M. Lipiński, “Fiber optic joint time and frequency transfer with active stabilization of the propagation delay”, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 61, pp. 2844–51, 2012.
- [4] Ł. Śliwczyński, P. Krehlik, Ł. Buczek, M. Lipiński, “Frequency transfer in electronically stabilized fiber optic link exploiting bidirectional optical

amplifiers”, *IEEE Trans. Instr. Meas.*, vol. 61, no. 9, pp. 2573-2580, 2012.

- [5] Ł. Śliwczyński, J. Kołodziej, “*Bidirectional Optical Amplification in Long-Distance Two-Way Fiber-Optic Time and Frequency Transfer Systems*” *IEEE Trans. Instr. Meas.*, vol. 62, pp. 253-262, 2013.