

Albin CZUBLA¹, Janusz KONOPKA¹, Marcin GÓRNIK¹, Waldemar ADAMOWICZ², Janusz STRUŚ², Józef ROMSICKI³, Marcin LIPIŃSKI⁴, Przemysław KREHLIK⁴, Łukasz ŚLIWCZYŃSKI⁴, Andrzej WOLCZKO⁴

¹UL. ELEKTORALNA 2, 00-950 WARSZAWA P-10 (GŁÓWNY URZĄD MIAR)

²UL. OBRZEŻNA 7, 02-691 WARSZAWA; ³UL. ŚW. BARBARY 2, 00-686 WARSZAWA (TELEKOMUNIKACJA POLSKA S.A.)

⁴AL. MICKIEWICZA 30, 30-059 KRAKÓW (AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA)

Dwukierunkowa transmisja sygnałów czasu poprzez światłowód

dr Albin CZUBLA

Kierownik Laboratorium Czasu i Częstotliwości Zakładu Metrologii Elektrycznej Głównego Urzędu Miar. Zajmuje się metrologią czasu i częstotliwości w zakresie prowadzenia atomowych skal czasu, analizy stabilności sygnałów czasu i częstotliwości, precyzyjnego transferu czasu, niepewności pomiaru.



e-mail: timegum@gum.gov.pl

mgr inż. Janusz KONOPKA

Główny metrolog w Laboratorium Czasu i Częstotliwości Zakładu Metrologii Elektrycznej Głównego Urzędu Miar. Opiekun Państwowego Wzorca Jednostek Miar Czasu i Częstotliwości i autor jego dokumentacji.



e-mail: timegum@gum.gov.pl

inż. Marcin GÓRNIK

Metrolog w Laboratorium Czasu i Częstotliwości Zakładu Metrologii Elektrycznej Głównego Urzędu Miar. Zajmuje się nadzorowaniem systemów pomiarowych i urządzeń Państwowego Wzorca Jednostek Miar Czasu i Częstotliwości oraz tworzy oprogramowanie pomiarowe.



e-mail: timegum@gum.gov.pl

dr Waldemar ADAMOWICZ

Pracuje w laboratorium pomiarowym czasu i częstotliwości Centrum Badawczo-Rozwojowego Telekomunikacji Polskiej S.A. Zajmuje się metrologią czasu i częstotliwości oraz zagadnieniami synchronizacji sieci i serwerami NTP.



e-mail: waldek.adamowicz@telekomunikacja.pl

mgr inż. Janusz STRUŚ

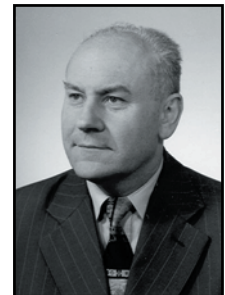
Pracuje w laboratorium pomiarowym czasu i częstotliwości Centrum Badawczo-Rozwojowego Telekomunikacji Polskiej S.A. Zajmuje się metrologią czasu i częstotliwości oraz zagadnieniami synchronizacji sieci i serwerami NTP.



e-mail: janusz.strus@telekomunikacja.pl

Józef ROMSICKI

Pracuje w Dziale Eksploatacji Sieci, w Pionie Sieci Telekomunikacji Polskiej S.A. Zajmuje się utrzymaniem częstotliwości i czasu w sieci telekomunikacyjnej.



e-mail: jozef.romsicki@telekomunikacja.pl

dr hab. inż. Marcin LIPIŃSKI

Dyplom mgr inż. uzyskał na Wydziale Elektroniki Politechniki Wrocławskiej w 1971 roku. Po 5-letniej pracy w przemyśle, gdzie był konstruktorem elektronicznej aparatury używanej w technice jądrowej, od 1976 roku jest pracownikiem Katedry Elektroniki AGH. Od wielu lat specjalizuje się w szybkiej elektronice dedykowanej dla światłowodowej transmisji specyficznych sygnałów.



e-mail: mlipinsk@agh.edu.pl

dr inż. Przemysław KREHLIK

Jest absolwentem wydziału Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Elektroniki AGH a obecnie adiunktem w Katedrze Elektroniki AGH. Jego zainteresowania naukowe związane są z transmisją światłowodową oraz szybkimi układami elektronicznymi, w szczególności układami modulacji bezpośredniej laserów i układami detekcji sygnałów optycznych.



e-mail: krehlik@agh.edu.pl

dr inż. Łukasz ŚLIWCZYŃSKI

Jest absolwentem wydziału Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Elektroniki AGH a obecnie adiunktem w Katedrze Elektroniki AGH. Jego zainteresowania naukowe obejmują zagadnienia związane ze światłowodową transmisją danych, laserowymi układami nadawczymi oraz odbiornikami światłowodowymi. W czasie swojej pracy zawodowej brał udział w projektach kilku systemów światłowodowych przeznaczonych m. in. dla studiów telewizyjnych.



e-mail: sliwczyn@agh.edu.pl

dr Andrzej WOLCZKO

Dyplom mgr inż. uzyskał na Wydziale Elektroniki Politechniki Wrocławskiej w 1970 roku ze specjalnością metrologia. Od 1974 roku jest pracownikiem Katedry Elektroniki AGH. Od wielu lat specjalizuje się w układach szybkiej elektroniki stosowanych w urządzeniach transmisji światłowodowej



e-mail: awolczko@agh.edu.pl

Streszczenie

W niniejszym artykule szczegółowo opisano eksperymentalny system do precyzyjnej dwukierunkowej transmisji sygnałów czasu poprzez światłowód oraz przedstawiono najnowsze wyniki pomiarów prowadzonych w tym zakresie przez Główny Urząd Miar, Telekomunikację Polską S.A. i Akademię Górniczo-Hutniczą. Rozważania prowadzone są pod kątem zastosowania w metrologii czasu i częstotliwości.

Słowa kluczowe: transfer czasu, światłowody, czas i częstotliwość

Two-directional time signal transfer over optical fibre

Abstract

In this paper an experimental system of two-directional transmission of time signals over optical fibre was described in detail as well as the newest results of measurements performed within this range by GUM, TP S.A. and AGH. These considerations are conducted in context of time and frequency metrology.

Keywords: time transfer, optical fiber, time and frequency

1. Wprowadzenie

Zastosowanie technologii światłowodowej do transmisji sygnałów czasu i częstotliwości otwiera nowe możliwości w metrologii czasu i częstotliwości, m.in. pozwala na przesyłanie wzorcowych sygnałów na odległość co najmniej do kilkudziesięciu kilometrów przy zachowaniu wysokiej dokładności i jakości metrologicznej odbieranych sygnałów i umożliwia prowadzenie porównań o charakterze bezpośrednim w przypadku odległych przestrzennie zegarów atomowych. Dodatkowe korzyści niesie użycie cyrkulatorów (optycznych sprzęgaczy kierunkowych), dzięki którym możliwa jest jednoczesna dwukierunkowa transmisja sygnałów przez to samo włókno optyczne. W przypadku zastosowania światłowódów do transmisji sygnałów czasu unika się bądź minimalizuje wpływ wielu czynników, które typowo zakłócają transmisję sygnałów drogą radiową, np. takich jak: niejednorodność propagacji sygnałów w atmosferze, nakładanie się i odbicia sygnałów, czy wahania dobowe właściwości fizycznych atmosfery.

Przeprowadzenie badań w Polsce w tym zakresie stało się możliwe dzięki zestawieniu w 2004 r. łącza światłowodowego pomiędzy Laboratorium Czasu i Częstotliwości Głównego Urzędu Miar (GUM) a pomieszczeniem Zegara Głównego Odniesienia Telekomunikacji Polskiej S.A. (TP S.A.) – oba laboratoria odległe są o ok. 3 km i mieszczą się na terenie Warszawy. Łącze to zostało wyposażone w specjalizowane przetworniki elektryczno-optyczne, skonstruowane przez Akademię Górniczo-Hutniczą (AGH), do transferu wzorcowych sygnałów czasu i częstotliwości. Precyzja wykonania i bardzo dobre charakterystyki metrologiczne tych przetworników pozwalają utrzymać wysoką stabilność przesyłanych sygnałów i zachować poprawność ich pracy przy linii światłowodowej wydłużonej nawet do kilkudziesięciu kilometrów [1, 2]. Pierwsze badania, dotyczące już bezpośrednio transmisji poprzez światłowód wzorcowych sygnałów czasu (impulsowych sygnałów sekundowych 1pps – 1 pulse per second), obejmowały zestawienie odpowiednich układów pomiarowych i porównanie wyników uzyskanych metodą porównań bezpośrednich atomowych wzorców czasu i częstotliwości przy transmisji sygnałów 1pps poprzez światłowód na odcinku ok. 3 km, przy lokalnej transmisji bez użycia światłowodu oraz metodą obserwacji jednoczesnych satelitów systemu GPS (metoda GPS CV – GPS Common-View) [3]. Obecnie, ze względu na bardzo dobre wyniki dotychczasowych badań i potwierdzenie możliwości zastosowania cyrkulatorów, prowadzone są prace nad

dwukierunkową precyzyjną transmisją sygnałów czasu poprzez światłowód. Najnowsze wyniki tych prac prezentowane są w niniejszym referacie.

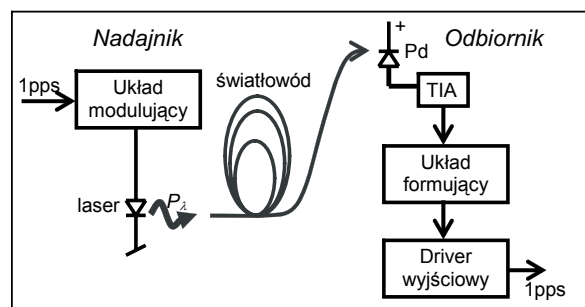
Podobne prace, ale przy wykorzystaniu struktury SDH światłowodowych sieci telekomunikacyjnych i zastosowaniu dużo bardziej skomplikowanych układów, prowadzone są również w kilku ośrodkach na całym świecie i uzyskiwane tam wyniki są zbliżone do prezentowanych w niniejszym referacie [np. 4-6].

2. Przetworniki elektryczno-optyczne

Specjalizowane przetworniki elektryczno-optyczne, skonstruowane do precyzyjnej transmisji napięciowych sygnałów impulsowych poprzez włókno optyczne, są urządzeniami zawierającymi układy ultraszybkich komparatorów, które normalizują poziom sygnału wejściowego i formują odpowiednio strome zbocza sygnału wykorzystywanego następnie do bezpośredniej modulacji lasera półprzewodnikowego pracującego na wejściu toru światłowodowego. Transmisja sygnału przez włókno optyczne odbywa się w formie analogowych periodycznych impulsowych sygnałów optycznych. Dla zapewnienia najkorzystniejszych warunków pracy laserów w modułach nadawczych, lasery nadawcze utrzymywane są w stanie ciągłej pracy aktywnej.

W modułach odbiorczych poziom mocy optycznej w detektorze dobrany jest zgrubnie w zależności od długości i tłumienia światłowodu. W układzie przedwzmacniającym dokonuje się konwersja prądu fotodetektora na napięcie. Dodatkowo na podstawie detekcji poziomu sygnału w układzie odbiorczym precyzyjnie modyfikowana jest wartość napięcia progowego, optymalizując w ten sposób próg komparacji. Na wyjście elektryczne modułu podawany jest sygnał znormalizowany w czasie i amplitudzie [2].

Uproszczony schemat blokowy budowy modułu nadawczego i odbiorczego przedstawia rys. 1.



Rys. 1. Schemat blokowy budowy modułu nadawczego i odbiorczego. (TIA – wzmacniacz transimpedancyjny, Pd – fotodetektor)

Fig. 1. Block diagram of construction of transmitter and receiver modules. (TIA – transimpedance amplifier, Pd – photodetector)

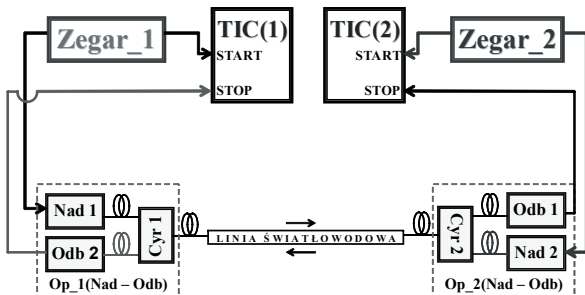
Przetworniki te pracują obecnie na długości fali ok. 1310 nm, którą charakteryzuje minimum dyspersji chromatycznej światłowodu. Do transmisji sygnałów na większe odległości rozważane jest wykorzystanie długości fali ok. 1550 nm. Wejścia i wyjścia sygnałów elektrycznych 1pps w formie gniazd BNC dopasowane są do impedancji wejściowej 50 Ω, natomiast wejścia i wyjścia sygnałów optycznych są typu SC-APC.

Łączny czas propagacji sygnału (opóźnienie) pomiędzy wejściem elektrycznym i wyjściem optycznym nadajnika oraz pomiędzy wejściem optycznym i wyjściem elektrycznym odbiornika cechuje się bardzo dużą stałością i dla każdej pary nadajnik-odbiornik wynosi ok. 18 ns. Szum fazy sygnału wnoszony przez parę tych urządzeń nie przekracza 8 ps na poziomie odchylenia standardowego eksperymentalnego, przy serii 100 pomiarów wykonywanych co 1 s. Ocena długoterminowej stabilności czasu propagacji sygnału przez te przetworniki oraz wpływu temperatury i innych czynników

wymaga przeprowadzenia dalszych badań, przy czym źródłem największych zmian w opóźnieniu całego toru jest linia światłowodowa łącząca wejścia optyczne tych przetworników. Z tego względu celowe jest rozważanie dwukierunkowej transmisji sygnałów czasu poprzez światłowód, dzięki czemu eliminuje się lub przynajmniej minimalizuje się wpływ zmian opóźnienia linii światłowodowej.

3. System dwukierunkowej transmisji sygnałów czasu

Rozważany w niniejszej pracy system do dwukierunkowej transmisji sygnałów czasu poprzez światłowód tworzą: dwa komplety przetworników elektryczno-optycznych sygnałów sekundowych 1 pps (dwie pary nadajnik-odbiornik), dwa cyrkulatory oraz dwa precyzyjne czasomierze cyfrowe, tzw. mierniki przedziałów czasu (TIC – time interval counter) – rys. 2.



Rys. 2. Schemat systemu dwukierunkowej transmisji sygnałów czasu
Fig. 2. Diagram of the system of two-directional time transfer

Linia światłowodowa włączona jest pomiędzy gniazda *Line* cyrkulatorów, które separują sygnał optyczny na część wchodzącą z nadajnika w linię światłowodową (gniazdo *Tx*) i część wychodzącą z linii światłowodowej do odbiornika (gniazdo *Rx*). Dzięki zastosowaniu cyrkulatorów, transmisja sygnałów 1 pps w linii światłowodowej odbywa się jednocześnie w dwu kierunkach. Źródło porównywanych impulsowych sygnałów 1 pps stanowią zegary atomowe (atomowe wzorce czasu i częstotliwości). Przy użyciu precyzyjnych czasomierzy cyfrowych wykonywane są serie jednoczesnych lub prawie jednoczesnych pomiarów przedziałów czasu pomiędzy sygnałem 1 pps z lokalnego zegara a sygnałem 1 pps z zegara odseparowanego przestrzennie, którego sygnał sekundowy jest dostarczany na miejsce pomiaru za pośrednictwem światłowodu.

Zasada pomiaru dwudrogowego w systemie przedstawionym na rys. 2. polega na tym, że, przy wykonywaniu serii jednoczesnych lub prawie jednoczesnych pomiarów w systemach pomiarowych na obu końcach linii światłowodowej, połowa różnicy wskazań czasomierzy pomniejszona o połowę różnicy opóźnień wnoszonych przez urządzenia i przewody na obu końcach systemu (Op_1 i Op_2) jest równa różnicy wskazań $z_1 - z_2$ porównywanych zegarów (1):

$$z_1 - z_2 = \frac{TIC(1) - TIC(2)}{2} - \frac{Op_1 - Op_2}{2} \quad (1)$$

Opóźnienia wnoszone przez urządzenia i przewody „końcowe” są łatwe do zmierzenia i zwykle wystarczająco stabilne w czasie ze względu na utrzymywanie stabilnych warunków środowiskowych w laboratoriach. Natomiast opóźnienie linii światłowodowej, zmieniające się zwykle w szerszym zakresie ze względu na zmienność warunków, w jakich przebiega światłowód, oraz większą wrażliwość linii światłowodowej o dużej długości na wpływ czynników zewnętrznych, jest w ten sposób eliminowane. Dominującym efektem jest tu dryft temperaturowy grupowego współczynnika załamania materiału, z którego wykonany jest światłowód. Bieżącą wartość opóźnienia linii światłowodowej

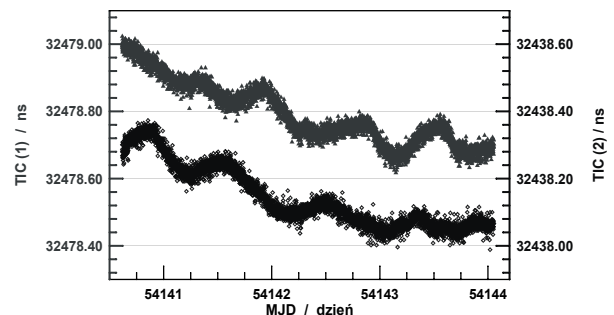
Op_{Line} można wyznaczyć jako połowę sumy wskazań obu czasomierzy pomniejszoną o połowę sumy opóźnień wnoszonych przez urządzenia i przewody końcowe (2):

$$Op_{Line} = \frac{TIC(1) + TIC(2)}{2} - \frac{Op_1 + Op_2}{2} \quad (2)$$

W metrologii czasu i częstotliwości tego rodzaju systemy z dwukierunkową transmisją sygnałów czasu stosuje się przykładowo w metodzie TWSTFT (Two-Way Satellite Time and Frequency Transfer) przy porównaniach skal czasu i atomowych wzorców czasu i częstotliwości z wykorzystaniem geostacjonarnych satelitów radiotelekomunikacyjnych i specjalizowanych modemów – przetworników sygnałów elektrycznych na sygnały radiowe i odwrotnie [www.bipm.org]. Pewna analogia występuje również przy synchronizacji systemów teleinformatycznych do serwerów czasu za pomocą protokołu NTP [www.ntp.org].

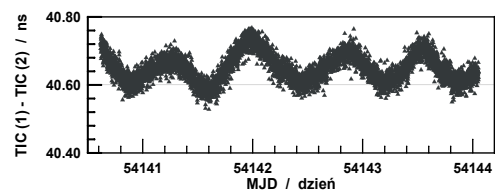
4. Wyniki pomiarów

W układzie eksperymentalnym systemu dwukierunkowej transmisji sygnałów czasu przez światłowód, oba końce linii światłowodowej umieszczono w tym samym laboratorium a sygnały 1 pps podawano z tego samego źródła. W ten sposób wyeliminowano szum zegarów. Jako linię światłowodową użyto aktualnie eksploatowanego w sieci telekomunikacyjnej, fizycznie położonego pod powierzchnią ziemi, kabla światłowodowego o łącznej długości ok. 6 km. Pomiary przedziałów czasu wykonywano za pomocą dwu jednakowych częstościomierzy-czasomierzy cyfrowych typu SR 620 – obecnie najlepszych na rynku przyrządów do pomiaru przedziałów czasu, sterowanych z jednego komputera w ramach tego samego programu, co pozwoliło na uzyskanie praktycznej jednoczesności wykonywania pomiarów. Dane pomiarowe zapisywane były automatycznie co 1 s w okresie od 9 do 20 lutego 2007 r.. Na rys. 3. i 4. przedstawiono przykładowe wyniki pomiarów.



Rys. 3. Zmiany wskazań czasomierzy cyfrowych TIC(1) („trójkąty”) i TIC(2) („romby”) w układzie dwukierunkowej transmisji sygnałów czasu poprzez światłowód w okresie 3 pierwszych dni pomiarów.

Fig. 3. Changes of time interval counter indications TIC(1) (“triangles”) and TIC(2) (“diamonds”) in two-directional time transfer over optical fiber within first 3 days of measurement.

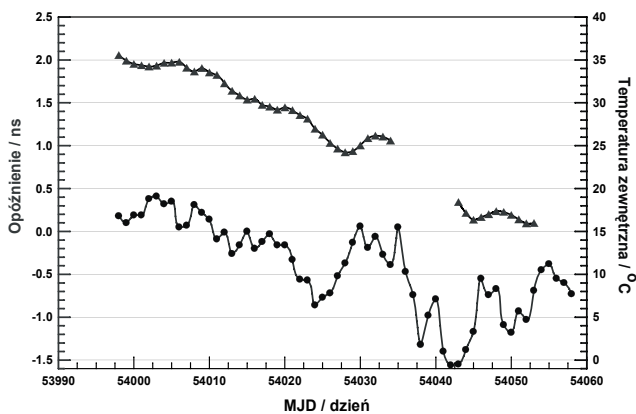


Rys. 4. Różnica wskazań czasomierzy cyfrowych TIC(1) i TIC(2) dla danych pomiarowych prezentowanych na rys. 3.

Fig. 4. Difference of time interval counter indications TIC(1) and TIC(2) for measurement data shown in fig. 3.

W ciągu 10 dni ciągłych pomiarów zaobserwowano zmianę wartości mierzonych przedziałów czasu na poziomie ok. 0,45 ns, przy czym faza zmian wskazań obu czasomierzy jest w przybliżeniu zgodna. Podobnego rzędu są maksymalne zmiany różnicy wskazań czasomierzy w tym okresie – ok. 0,36 ns, ale wartość tej różnicy utrzymuje się w pobliżu stałej wartości. Ponieważ we wzorze (1) uwzględniana jest połowa różnicy wskazań czasomierzy, zatem efektywny wpływ zmian tej różnicy wynosi maksymalnie ok. 0,18 ns.

Na zakres zmian wartości mierzonych przedziałów czasu w tym układzie pomiarowym największy wpływ mają dobowe i sezonowe (roczne) wahania temperatury gleby na głębokości położenia światłowodu – ok. 1 m. Wraz z większymi zmianami temperatury zewnętrznej, wartości te również będą ulegały zmianom. Potwierdzeniem występowania tego efektu są przykładowo wyniki pomiarów przy jednokierunkowej transmisji sygnałów czasu poprzez światłowód przeprowadzone na tej samej linii światłowodowej na przełomie września i października 2006 r. (Rys. 5.), gdzie zmiany opóźnienia linii światłowodowej sięgały już 2 ns [3].



Rys. 5. Wpływ zmiany temperatury zewnętrznej („kropki”) na zmiany opóźnienia linii światłowodowej (długości ok. 6 km). Zauważalna jest bezwładność zmian opóźnienia („trójkąty”) światłowodu (położony pod powierzchnią ziemi) w stosunku do zmian temperatury zewnętrznej powietrza.

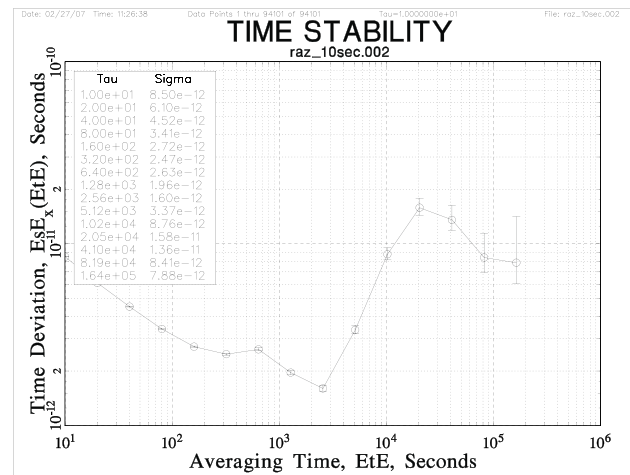
Fig. 5. Influence of outside temperature („dots”) on changes in delay of optical fiber line (about 6 km of length). It is visible the inertia of changes in delay („triangles”) of optical fiber (situated under ground) with relation to changes in outside temperature.

Natomiast zakres zmian różnicy wskazań czasomierzy zależy jedynie od warunków lokalnych na „końcach” systemu i można przyjąć, że, przy jednakowej stałej całorocznej stabilizacji warunków środowiskowych w laboratorium, zaobserwowany dotychczas zakres zmian tej różnicy nie zmieni się znacząco.

Analiza odchylenia Allana w dziedzinie czasu (TDev – Time Deviation) z wyników pomiarów przy dwukierunkowej transmisji sygnałów czasu poprzez światłowód – przedstawiona na rys. 6., pozwala oszacować minimalny poziom szumu metody poniżej 3 ps przy okresie uśredniania ok. od 100 s do 1 h. Wzrost szumu do kilkunastu pikosekund przy dłuższych okresach uśredniania (powyżej kilku godzin) ma najprawdopodobniej związek z szumem wnoszonym przez czasomierze – efekt wolnozmiennych zmian różnicy opóźnień między wejściami pomiarowymi i czynników systematycznych w pomiarze przedziału czasu. Poprzez zastosowanie pomiarów różnicowych przedziału czasu (analogicznie jak przy pomiarze opóźnienia kabli) można wyeliminować lub przynajmniej zmniejszyć udział szumu czasomierzy w wypadkowym szumie metody. Dalsza szczegółowa analiza udziału poszczególnych elementów systemu i wpływu czynników zewnętrznych na końcowy szum metody wymaga prowadzenia szerszych i bardziej długotrwałych pomiarów.

Obecnie przy dwukierunkowej transmisji sygnałów czasu poprzez światłowód wykonywane są, w trybie pomiarów ciągłych, pomiary różnicowe co 900 s. Pozwoli to w najbliższym

okresie zweryfikować, czy zaobserwowany efekt wystąpienia podwyższonego szumu przy czasie uśredniania powyżej kilku godzin ma związek ze zmianami zachodzącymi w torze optycznym, czy ze zmianami zachodzącymi w zastosowanym czasomierzu cyfrowym przy pomiarze przedziału czasu.



Rys. 6. Wykres odchylenia Allana w dziedzinie czasu w układzie dwukierunkowej transmisji sygnałów czasu poprzez światłowód.

Fig. 6. Plot of Allan deviation in time domain for the system of two-directional time transfer over optical fiber.

5. Podsumowanie

Przedstawiony w niniejszym artykule eksperymentalny system dwukierunkowej transmisji sygnałów czasu poprzez światłowód potwierdza możliwość wykorzystania tego typu systemu do porównań atomowych wzorców czasu i częstotliwości pomiędzy laboratoriami połączonymi liniami światłowodowymi. Pozwala to podnieść niezawodność zdalnych porównań atomowych wzorców czasu i częstotliwości oraz lokalnie uniezależnić się od mniej dokładnych i wymagających prowadzenia dłuższych sesji pomiarów przy wykorzystaniu metod satelitarnych. W kontekście budowanych obecnie wzorców optycznych, zapotrzebowanie na tego typu systemu w najbliższym czasie powinno być coraz większe.

6. Literatura

- [1] J. Struś, W. Adamowicz: Raport z pomiarów: LGIP/170/05. Dokument Telekomunikacji Polskiej S.A., Warszawa, 2005.
- [2] P. Krehlik, M. Lipiński, Ł. Śliwczyński, A. Wolczko: Światłowodowy system transmisji wzorcowych sygnałów czasu i częstotliwości. Poznańskie Warsztaty Telekomunikacyjne, Poznań, grudzień 2005.
- [3] A. Czubla, J. Konopka, M. Górnik, W. Adamowicz, J. Struś, T. Pawszak, J. Romsicki, M. Lipiński, P. Krehlik, J. Śliwczyński, A. Wolczko: Comparison of precise time transfer with usage of multi-channel GPS CV receivers and optical fibers over distance of about 3 km. 38th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Systems and Time Applications Meeting, Reston USA, grudzień 2006.
- [4] M. Kihara and A. Imaoka: SDH-based time and frequency transfer system. 9th European Frequency and Time Forum, Besançon Francja, marzec 1995, str. 317-322.
- [5] S. R. Jefferts, M. A. Weiss, J. Levine, S. Dilla, T. E. Parker: Two-Way Time Transfer Through SDH And SONET Systems. 10th European Frequency and Time Forum, Brighton UK, marzec 1996, str. 461-464.
- [6] R. Emardson, P. O. Hedekvist, M. Nilsson, S.C. Ebenhag, K. Jaldehag, P. Jarlemark, J. Johansson, L. Pendrill, C. Rieck, P. Löthberg, and H. Nilsson: Time and Frequency Transfer in an Asynchronous TCP/IP over SDH-network Utilizing Passive Listening. Proceedings of the IEEE, 2005, str. 908-913.