



AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE

Autoreferat rozprawy doktorskiej

*Dystrybucja ultraprecyzyjnych sygnałów czasu
i częstotliwości w sieci optycznej DWDM*

Autor: mgr inż. Krzysztof Turza

Promotor rozprawy: dr hab. inż. Przemysław Krehlik, prof. uczelni

Praca wykonana: w *Poznańskim Centrum Superkomputerowo-Sieciowym
afiliowanym przy Instytucie Chemii Bioorganicznej PAN*

Kraków, 2022

1 WPROWADZENIE

Zaprezentowana rozprawa prezentuje badania czynników determinujących stabilność i niepewność dystrybucji referencyjnych sygnałów czasu i częstotliwości w optycznych sieciach DWDM (ang. *Dense Wavelength Division Multiplexing*). Analizowano w niej transfer sygnałów referencyjnych w niezmodyfikowanej strukturze systemu DWDM tj. przesyłanych w części pasma optycznego, multipleksowanych z sygnałami danych oraz transmitowanych w przeciwnych kierunkach z wykorzystaniem pary włókien światłowodowych. Brak możliwości oszacowania jakości (niepewności oraz stabilności) dystrybuowanego sygnału referencyjnego uniemożliwia (jak dotąd) powszechny rozwój tego typu połączeń. Niniejsza praca miała na celu identyfikację oraz ocenę ilościową zjawisk wpływających na degradację transferu czasu i częstotliwości i w konsekwencji wypracowanie metod wiarygodnego szacowania parametrów jakościowych dystrybucji sygnałów czasu i częstotliwości w sieciach DWDM.

Badania fluktuacji różnicowego czasu propagacji sygnału optycznego w parze włókien światłowodowych przyniosły nieoczywisty wniosek, iż jest on skorelowany z ogólnymi zmianami opóźnienia czasu propagacji w światłowodzie. Umożliwiło to ocenę jakości transferu sygnałów referencyjnych (na podstawie znajomości ogólnych zmian czasu propagacji) jak i jego predykcję (na podstawie analizy zmian temperatury kabla). Badaniom poddano zarówno światłowody doziemne jak i napowietrzne, wskazując na znaczące różnice stabilności transmisji w obu typach kabli.

Ze względu na fakt, iż przeciwsobnie przesyłane sygnały czasu i częstotliwości przechodzą także przez fizycznie różne moduły urządzeń DWDM, osobnej analizie poddano poszczególne typy takich modułów, oceniając ich czułość termiczną (zmianę opóźnienia propagacji sygnału optycznego w funkcji temperatury). Badaniom poddano kluczowe elementy wchodzące w skład dwóch najpowszechniej stosowanych obecnie generacji systemów DWDM. Pierwszy z nich jest optymalizowany dla transmisji sygnałów niekoherentnych (wykorzystujących modulację intensywności światła), drugi dedykowany dla transmisji sygnałów koherentnych. W pracy przedstawiono porównanie jakości transferu sygnałów czasu i częstotliwości w obu typach systemów DWDM, wskazując moduły kluczowe z punktu widzenia degradacji jakości przesyłanych sygnałów.

Na podstawie przeprowadzonych pomiarów oraz analiz zaproponowano metodę korekcji różnicowego czasu propagacji bazującą na informacjach (pomiarach temperatury) standardowo rejestrowanych w systemach zarządzania urządzeniami DWDM. Metoda ta bazuje na analizie zmian opóźnienia indukowanych w modułach charakteryzujących się największą czułością termiczną (tj. kompensatorach dyspersji chromatycznej). Pomimo wykorzystania fabrycznie montowanych sensorów temperatury o niewielkiej dokładności, udało się osiągnąć znaczącą (kilkukrotną) poprawę stabilności przesyłanych sygnałów referencyjnych. Efektywność korekcji zweryfikowano w trzech różnych trasach, zestawionych w operacyjnie działającej sieci DWDM.

Wykonane badania posłużyły także do opracowania modelu szacowania jakości dystrybucji sygnałów referencyjnych w systemie DWDM dowolnego typu, oraz wykorzystującego dowolną linię światłowodową (doziemną i/lub napowietrzną). Zaproponowany sposób doboru poszczególnych parametrów modelu umożliwia zarówno użycie danych typowych jak i dedykowanych dla danego typu linii lub urządzenia. Umożliwia także sukcesywne uzupełnianie parametrów modelu danymi szczegółowymi (w celu poprawy wierności szacowania), co w znaczący sposób ułatwia jego praktyczne użycie. Zaproponowany sposób modelowania zweryfikowano pomiarami wykonanymi w operacyjnie działającej sieci DWDM oraz uzupełniono kilkoma przykładami mającymi na celu uwypuklenie wpływu poszczególnych elementów systemu na jakość przesyłanych sygnałów referencyjnych. Przedstawiony

model stanowi znaczące ułatwienie w ocenie przydatności danego połączenia dla realizacji systemu dystrybucji o określonych wymaganiach jakościowych.

2 CELE PRACY

Celem ogólnym pracy było przeprowadzenie wszechstronnych badania czynników determinujących osiągalną stabilność i niepewność dystrybucji referencyjnych sygnałów czasu i częstotliwości w optycznych sieciach DWDM. Cel ten obejmuje także ilościowe określenie jakości dystrybucji w tych sieciach, oraz propozycje rozwiązań zmierzających do jej poprawy.

Cele szczegółowe zdefiniowane zostały w następujący sposób:

- Opracowanie metody korekcji fluktuacji różnicowego czasu propagacji w optycznej sieci DWDM w oparciu o informacje dostępne z poziomu sytemu zarządzania systemem DWDM.
- Opracowanie modelu szacowania stabilności transferu czasu i częstotliwości na podstawie znajomości typu użytych komponentów DWDM oraz rodzaju linii światłowodowej, który będzie mógł być wykorzystany jako jedno z głównych kryteriów wyboru optymalnej ścieżki optycznej.

3 TEZY PRACY

W dysertacji postawione zostały trzy **tezy**:

1. Optyczne sieci telekomunikacyjne, stosujące technikę zwielokrotnienia falowego DWDM umożliwiają dystrybucję sygnałów: częstotliwości ze stabilnością na poziomie 10^{-16} oraz czasu ze stabilnością na poziomie 100 ps, czyli adekwatną do jakości nowoczesnych wzorców atomowych.
2. Stabilność dystrybucji częstotliwości oraz czasu w sieci optycznej DWDM można znacząco poprawić poprzez kompensację różnicowych fluktuacji czasu propagacji, z wykorzystaniem informacji (zmian temperatury modułów) dostępnych w standardowym systemie zarządzania siecią.
3. Wyznaczenie niestabilności i niepewności dystrybuowanych sygnałów częstotliwości oraz czasu możliwe jest na podstawie dedykowanego modelu uwzględniającego budowę węzłów sieciowych oraz rodzaje linii światłowodowych.

4 NAJWAŻNIEJSZE WYNIKI PRACY

W pracy przedstawiono wyniki badań oraz analizy czynników determinujących osiąganą jakość dystrybucji sygnałów czasu i częstotliwości w sieciach DWDM. Szczegółowej analizie poddane zostały zarówno kable światłowodowe jak i urządzenia sieciowe. W obu przypadkach wykazano, że fluktuacje

temperatury mogą powodować znaczące zmiany różnicowego czasu propagacji sygnału przesyłanego w przeciwnych kierunkach, co jest główną przyczyną pogorszenia stabilności i zwiększenia niepewności dystrybuowanych sygnałów referencyjnych. Przeprowadzone badania wykazały, iż wpływ urządzeń (poszczególnych modułów) DWDM na stabilność transmitowanych sygnałów jest kluczowy dla krótkich i średnich czasów uśrednienia (obserwacji), natomiast wpływ fluktuacji asymetrii czasu propagacji w kablach światłowodowych dominuje dla długich uśrednień.

Badania zmian różnicowego czasu propagacji sygnału z wykorzystaniem pary włókien w kablach światłowodowych przyniosły nieoczywisty wniosek, iż wartość ta jest ściśle skorelowana z ogólnymi zmianami czasu propagacji sygnału optycznego w światłowodzie, a spowodowanymi zmianami jego temperatury. Na podstawie własnych pomiarów oraz analizy wyników innych zespołów badawczych zawartych w dostępnej literaturze (które jednak nie dostrzegły wcześniej wspomnianego związku), należy przypuszczać, iż asymetryczna zmienność opóźnienia dwóch włókien światłowodowych, rzędu od kilku dziesiątych procenta do kilku procent w stosunku do ogólnych zmian opóźnienia, jest charakterystyczna dla większości obecnie produkowanych kabli światłowodowych. Ilościowe określenie tego zjawiska pozwoliło z kolei na oszacowanie jego wpływu na jakość (niestabilność i niepewność) transferu sygnałów referencyjnych oraz opracowanie odpowiedniego modelu bazującego na zmianach temperatury światłowodu. „Przewidywalność” zmian opóźnienia różnicowego daje nadzieję na przyszły rozwój metod redukujących wpływ tego zjawiska.

Przeprowadzone badania wykazały także dużą dysproporcję w jakości transferu sygnału referencyjnego z wykorzystaniem kabli doziemnych, a napowietrznych. Zastosowanie tych pierwszych umożliwia osiągnięcie długookresowej stabilności transferu częstotliwości na poziomie 10^{-16} (czyli takiej jak założono w tezie pierwszej), nawet dla bardzo długich linii światłowodowych (rzędu 1000 km). Osiągnięcie długookresowej (rocznej) stabilności dystrybucji sygnałów czasu na poziomie założonym w pierwszej tezie (100 ps) jest realne jedynie dla stosunkowo krótkich doziemnych linii światłowodowych (rzędu 100 km). Niestety, w przypadku zastosowania kabli napowietrznych, duża dynamika zmian ich temperatury powoduje znaczące pogorszenie stabilności dystrybucji zarówno czasu jaki i częstotliwości, także dla stosunkowo krótkich okresów uśrednień. Użycie linii tego typu powoduje, iż osiągnięcie parametrów stabilności sygnałów czasu na poziomie 100 ps i częstotliwości na poziomie 10^{-16} jest możliwe jedynie dla krótkich połączeń rzędu 100 km. Dodatkowo, osiągnięcie stabilności transferu częstotliwości na wspomnianym poziomie jest możliwe wyłącznie przy założeniu bardzo długiego (co najmniej kilkunastodniowego) czasu uśredniania. Wykorzystanie sieci bazujących na liniach napowietrznych do transmisji utraprecyzyjnych sygnałów referencyjnych na duże odległości jest ograniczone do stosunkowo krótkich połączeń. Należy także w tym miejscu podkreślić, iż w obu typach linii długość połączenia negatywnie wpływa na jakość dystrybuowanych sygnałów czasu i częstotliwości.

Drugą grupą elementów wpływających na jakość transmitowanych sygnałów czasu i częstotliwości w systemach DWDM są zastosowane urządzenia/moduły tego systemu. Ze względu na fakt, iż sygnały transmitowane w przeciwnych kierunkach przechodzą przez fizycznie rozdzielone moduły optyczne, także fluktuacje ich temperatury oddziałują na zmianę różnicowego czasu propagacji, a w konsekwencji na jakość dystrybucji sygnałów referencyjnych. W niniejszej pracy poddano analizie dwie powszechnie stosowane generacje urządzeń DWDM: pierwszą optymalizowaną dla transmisji sygnałów niekoherentnych oraz drugą dedykowaną wyłącznie dla sygnałów koherentnych. W przypadku pierwszej z wymienionych generacji urządzeń łączny wpływ wszystkich

używanych modułów optycznych jest niemal całkowicie zdominowany przez kompensatory dyspersji chromatycznej (DCF).

W systemach DWDM nie zawierających kompensatorów dyspersji oraz bazujących na doziemnych liniach światłowodowych, wpływ zmiany różnicowego czasu propagacji w urządzeniach jest zauważalny nawet do kilku tysięcy sekund czasu uśredniania (dla dłuższych czasów zaczyna dominować linia światłowodowa). Zastosowanie linii napowietrznych sprawia iż jej wpływ na stabilność dystrybucji sygnałów referencyjnych dominuje nad urządzeniami już od kilkudziesięciu sekund czasu uśredniania. W tym miejscu należy podkreślić, iż moduły urządzeń omawianych w zaprezentowanej dysertacji (za wyjątkiem kompensatorów DCF) są wykorzystywane w obydwu generacjach sieci DWDM. W pracy przedstawiono wyniki testów czułości termicznej najczęściej spotykanych modułów (wzmacniaczy, przełączników optycznych oraz filtrów) wchodzących w skład poszczególnych urządzeń DWDM. Wśród nich kluczowe okazały się te, zawierające moduł wzmacniacza EDFA. Wykazują one zauważalnie większą czułość termiczną, co wynika bezpośrednio z ich konstrukcji – konieczności użycia stosunkowo długiego włókna światłowodowego. Pozostałe moduły mają niewielki wpływ na stabilność różnicowego czasu propagacji, a co za tym idzie także na jakość dystrybuowanych sygnałów wzorcowych. Nie zauważono negatywnego wpływu na stabilność transmisji takich elementów jak pompy Ramana czy przestrajalne filtry WSS. W drodze eksperymentów potwierdzono, iż kluczowym parametrem wpływającym na czułość termiczną danej karty, a co za tym idzie na stabilność transferu sygnałów referencyjnych, jest jej długość optyczna, którą można łatwo wyznaczyć na podstawie pomiaru wprowadzanego przez nią opóźnienia. To z kolei pozwala na proste scharakteryzowanie dowolnej karty, dowolnego producenta.

Podsumowując powyższe w kontekście pierwszej przedstawionej tezy, osiągnięcie stabilności dystrybucji sygnałów czasu i częstotliwości adekwatnej do jakości nowoczesnych wzorców atomowych jest ściśle uzależnione do typu użytej linii światłowodowej oraz rodzaju użytych urządzeń DWDM. Stosując doziemne linie światłowodowe oraz system DWDM nie zawierający kompensatorów dyspersji (DCF), możliwe jest osiągnięcie (zakładanej w pierwszej tezie) stabilności transferu częstotliwości na poziomie 10^{-16} , nawet dla bardzo długich połączeń (rzędu 1000 km). Zastosowanie systemu DWDM zawierającego kompensatory dyspersji znacznie wydłuża czas uśredniania niezbędny do osiągnięcia zakładanego poziomu stabilności (zazwyczaj jest on nie krótszy niż kilka dni) dla podobnej długości linii światłowodowej (rzędu 1000 km). Zastosowanie linii napowietrznej (niezależnie od typu użytych urządzeń DWDM) znacząco ogranicza zasięg systemu dystrybucji. Uzyskanie zakładanej stabilności częstotliwości jest możliwe tylko dla stosunkowo krótkich połączeń (poniżej 100 km). Niestety, w przypadku transferu znaczników czasu, osiągnięcie zakładanej stabilności długookresowej (dla rocznego czasu obserwacji) na poziomie 100 ps jest możliwe jedynie dla połączeń krótszych niż 100 km, niezależnie od typu użytego światłowodu czy generacji systemu DWDM. Niemniej nadal zastosowanie linii doziemnej oraz urządzeń nie zawierających kompensatorów DCF znacząco poprawia średniookresową stabilność dystrybuowanych sygnałów czasu. Przyczyną tak niewielkich długości połączeń możliwych do uzyskania, przy przyjętym w tezie pierwszej maksymalnym poziomie niestabilności dystrybucji znaczników czasu, jest fakt, iż w transferze tego typu istotna jest nieskompensowana i zakumulowana (łączna w całym okresie obserwacji) zmiana opóźnienia przesyłanych sygnałów. Jest to odmienna sytuacja niż w przypadku dystrybucji częstotliwości, na której jakość wpływ ma szybkość zmian nieskompensowanego opóźnienia, a nie jego łączna (zakumulowana w czasie) wartość.

Ze względu na dużą dysproporcję stabilności przesyłanych sygnałów w dwóch różnych typach systemów DWDM, podjęto próbę korekty negatywnego wpływu modułów różnicujących oba systemy – to jest światłowodowych kompensatorów dyspersji chromatycznej (DCF), bazując na standardowo dostępnych informacjach (temperaturach zmierzonych fabrycznie wbudowanymi czujnikami) w systemie zarządzania siecią. W niniejszej pracy przedstawiono efektywność takiej korekty na podstawie przetwarzania zarejestrowanych wartości (fluktuacji temperatury modułów DCF oraz fazy odbieranego sygnału), w trzech alternatywnych trasach DWDM. Zaproponowana metoda korekty umożliwiła kilkukrotną poprawę stabilności transmitowanych sygnałów. Wynik ten należy uznać za znaczący mając na uwadze fakt, że został on uzyskany z wykorzystaniem wyłącznie fabrycznie montowanych czujników o niskiej dokładności. Użycie tych czujników było jednak jednym z podstawowych założeń, ponieważ umożliwia szerokie wykorzystanie zaproponowanej metody korekcji. Zastosowanie dedykowanych, bardzo dokładnych sensorów temperatury poprawiłoby dokładność korekty ale jednocześnie znacząco zwiększyłoby koszty takiego rozwiązania. Ponieważ typowe opóźnienie pozyskiwanych danych (z systemu zarządzania) nie przekracza w praktyce kilku sekund, a równocześnie jak wykazano w niniejszej pracy, szybkie próbkowanie (częściej niż co 60 sekund) temperatur modułów DCF nie jest niezbędne, w związku z tym wydaje się, iż możliwa będzie implementacja (w przyszłości) sprzętowej korekty wpływu modułów DCF na dystrybuowane sygnały referencyjne w czasie rzeczywistym. **Uzyskane rezultaty stanowią pozytywną odpowiedź na drugą tezę niniejszej rozprawy – znacząca poprawa stabilności dystrybucji częstotliwości oraz czasu w sieci optycznej DWDM jest możliwa z wykorzystaniem standardowo dostępnych informacji o temperaturach poszczególnych modułów DCF, na podstawie danych uzyskanych z systemu zarządzania siecią (zmierzonych fabrycznie montowanymi czujnikami). Niestety, dokładność danych pomiarowych (temperatury) nie jest wystarczająca aby korekta ta była możliwa także dla pozostałych modułów występujących w obu typach systemów DWDM.**

Istotną część pracy stanowi omówienie zaproponowanego sposobu modelowania niestabilności i niepewności dystrybuowanych sygnałów częstotliwości i czasu, uwzględniającego zarówno budowę węzłów sieciowych jak i rodzaj zastosowanej linii światłowodowej. Dzięki zastosowaniu analizy widmowej możliwe było opracowanie użytecznego modelu bazującego na danych – zmianach temperatury, pochodzących z różnych źródeł i zebranych w różny sposób (pomiarów bezpośrednie i pośrednie oszacowania zmian temperatury). Wyznaczono parametry modelu dla obydwu typów analizowanych kabli światłowodowych (doziemnych i napowietrznych) oraz najczęściej spotykanych typów kart/modułów optycznych systemu DWDM. Tak utworzona baza parametrów modelu umożliwia wykorzystanie ich w oszacowaniu jakości transferu dla dowolnego połączenia lądowego (przebiegającego w umiarkowanej strefie klimatycznej) wykorzystującego sieć DWDM. Oszacowanie bazujące na typowych wartościach parametrów może stanowić pierwsze przybliżenie przydatności danego linku dla osiągnięcia określonego celu metrologicznego. Oczywiście użycie dedykowanych parametrów dla poszczególnych węzłów DWDM oraz kabli światłowodowych, przebiegających w różnych strefach klimatycznych, umożliwia wykonanie wierniejszej symulacji odwzorowującej jakość dystrybuowanego sygnału. To w konsekwencji pozwala także na odnalezienie kluczowych węzłów lub fragmentów linii światłowodowej – przyczyniających się do znaczących i nietypowych fluktuacji opóźnienia różnicowego (wpływających bezpośrednio i w sposób znaczący na niestabilność transmitowanego sygnału referencyjnego). Należy w tym miejscu także zwrócić uwagę, że zaproponowany sposób symulacji umożliwia częściowe lub stopniowe zastępowanie poszczególnych, typowych parametrów modelu wartościami szczegółowymi. Możliwość selektywnego

uszczegóławiania modelu w sposób znaczący ułatwia korzystanie z niego osobom posiadającym jedynie dane częściowe. Dane takie (mimo, iż niepełne) mogą w sposób istotny poprawić wierność otrzymywanych wyników, szczególnie gdy uwzględnione zostaną na przykład nietypowe zmiany temperatury w poszczególnych węzłach lub liniach światłowodowych. Zastosowanie modelowania przedstawionego w niniejszej pracy umożliwia także szybkie oszacowanie parametrów jakości transferu czasu i częstotliwości w danej relacji, bez konieczności wykonywania wielomiesięcznych pomiarów testowych (charakteryzujących dane połączenie) i wymagających kosztownej aparatury pomiarowej. Dzięki temu możliwe jest szybkie określenie realności implementacji danego systemu transferu (z wykorzystaniem konkretnego połączenia w sieci DWDM) z punktu widzenia założonych wymagań jakościowych. Ze względu na to, iż w sieciach DWDM powszechnie stosuje się połączenia nadmiarowe (zapasowe), dlatego opracowany model może w znaczący sposób pomóc w wyborze najkorzystniejszej (z punktu widzenia jakości przesyłanych sygnałów referencyjnych) trasy. **Uzyskane wyniki pozwalają na pozytywną odpowiedź na trzecią tezę postawioną w niniejszej pracy, iż wyznaczenie niestabilności i niepewności dystrybuowanych sygnałów częstotliwości oraz czasu możliwe jest na podstawie dedykowanego modelu uwzględniającego budowę węzłów sieciowych oraz rodzaju linii światłowodowej.**

5 WAŻNIEJSZE PUBLIKACJE

1. **K. Turza**, P. Krehlik, and Ł. Śliwczyński, „*Long Haul Time and Frequency Distribution in Different DWDM Systems*”, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, vol. 65, no. 7, Art. no. 7, Jul. 2018, doi: 10.1109/TUFFC.2018.2827178.
2. K. Szymaniec, R.J. Hendricks, **K. Turza**, B. Nagórny, P. Dunst, J. Nawrocki, P. Krehlik, Ł. Śliwczyński, A. Czubla, „*Operation of caesium fountain frequency standards with remote hydrogen maser references*”. Metrologia 55, 782, (2018).
3. **K. Turza**, P. Krehlik, and Ł. Śliwczyński, „*Compensation of the fluctuations of differential delay for frequency transfer in DWDM networks*”, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, vol. 66, no. 4, Art. no. 4, 2019, doi: 10.1109/TUFFC.2019.2890993.
4. **K. Turza**, P. Krehlik, and Ł. Śliwczyński, „*Stability Limitations of Optical Frequency Transfer in Telecommunication DWDM Networks*”, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, vol. 67, no. 5, Art. no. 5, May 2020, doi: 10.1109/TUFFC.2019.2957176.
5. **K. Turza**, A. Binczewski, W. Bogacki, P. Krehlik, Ł. Śliwczyński, „*Time and frequency transfer in modern DWDM telecommunication networks*”, 2017 Joint Conference of the European Frequency and Time Forum and IEEE International Frequency Control Symposium ((EFTF/IFC), pp. 368-370, (2017).