

## Streszczenie

Niniejsza 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. Niestety brak możliwości oszacowania jakości (niepewności oraz stabilności) dystrybuowanego sygnału referencyjnego uniemożliwił (jak dotąd) powszechny rozwój tego typu połączeń. Niniejsza praca miała na celu identyfikację oraz ocenę ilościową zjawisk wpływających na degradację transferu czasu i częstotliwości.

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. Wykazano także, iż głównym czynnikiem wpływającym na czułość termiczną danego modułu jest jego „długość optyczna” (długość użytego światłowodu).

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.

17.12.2021

Krzysztof Turowski

## Abstract

This dissertation presents investigations of factors determining stability and uncertainty of distribution of time and frequency reference signals in Dense Wavelength Division Multiplexing (DWDM) optical networks. It analyses the transfer of reference signals in unmodified structure of DWDM system, i.e. transmitted in part of optical spectrum, multiplexed with data signals and transmitted in opposite directions using pair of optical fibres. Unfortunately, the lack of possibility to estimate the accuracy (uncertainty and stability) of the distributed reference signal has prevented (so far) a widespread development of this type of transmission. The present work aimed to identify and quantify the phenomena affecting the degradation of time and frequency transfer.

Investigations of an optical signal differential propagation time fluctuation in a pair of fibres brought a non-obvious conclusion that it is correlated with overall propagation time delay changes in the fibre. This allowed the estimation of the transfer reference signal quality (based on the knowledge of general changes in propagation time) as well as its prediction (based on the analysis of cable temperature variations). Soil deployed and air fibre optic cables were tested, showing significant differences in transmission stability in both types of cable.

Due to the fact that the oppositely transmitted signals of time and frequency also pass through physically different modules of DWDM devices, individual types of such modules were analysed separately, evaluating their thermal sensitivity (change of optical signal propagation delay as a function of temperature). The study investigates the key modules being part of the two most widely and currently deployed generations of DWDM systems. The first one is optimized for transmission of non-coherent signals (using light intensity modulation), the second one is dedicated for transmission of coherent signals. The dissertation presents comparison of time and frequency signal transfer quality in both types of DWDM systems, indicating the key modules from the point of view of signal quality degradation. It was also shown that the main factor affecting the thermal sensitivity of a given module is its "optical length" (length of the optical fibre used inside module).

According to the conducted measurements and analyses, a differential propagation delay correction method was proposed based on information (temperature measurements) typically recorded in DWDM network management systems. This method is based on the analysis of delay changes induced in modules characterised by the highest thermal sensitivity (this mean chromatic dispersion compensators modules). Despite the fact that factory-installed temperature sensors of low accuracy were used, a significant (several times) improvement in the stability of transmitted reference signals was achieved. The effectiveness of the correction was verified in three different routes, set up in an operational DWDM network.

The research was also used to develop a model for estimating the accuracy of reference signal distribution in DWDM system of any type and using any optical fibre line (soil deployed and/or air fibres). The proposed method of selecting individual model parameters allows both the use of typical data and data dedicated to a given type of line or device. It also makes it possible to gradually supplement the model parameters with dedicated data (in order to improve the estimation precision), which significantly facilitates its practical use. The proposed modelling method has been verified by measurements carried out in an operational DWDM network and supplemented by several examples aimed at highlighting the influence of individual system elements on the accuracy of transmitted reference signals. The presented model provides a significant support in assessing the suitability of a given connection for the implementation of a distribution system with specific quality requirements.

17.12.2021  
Krzysztof Turca