

Schnelle hochauflösende optische Spektralanalyse

Kai-Uwe Lauterbach, Ronny Henker, Markus Junker und Thomas Schneider
Hochschule für Telekommunikation Leipzig (FH), Leipzig, Deutschland
Max J. Ammann und Andreas T. Schwarzbacher
Dublin Institute of Technology, Dublin, Irland

Kurzfassung

Wir präsentieren eine technisch einfach und kostengünstig zu realisierende Methode zur schnellen und gleichzeitig hochauflösenden Messung optischer Spektren. Diese Messmethode basiert auf der schmalbandigen Verstärkung der stimulierten Brillouin Streuung. Dabei erreichen wir mit unserem "proof-of-concept" Versuchsaufbau eine Messzeit von 10 ms über einen Frequenzbereich von 130 GHz, bei einer Auflösebandbreite von 23 MHz.

1 Einleitung

Die messtechnische Ermittlung optischer Spektren ist eine der wichtigsten Analysemethoden in optischen Netzen. Die Intensität spektraler Anteile eines optischen Signals bestimmt z. B. das Auftreten nichtlinearer Effekte in optischen Übertragungsmedien. Die maximal übertragbare Datenrate in WDM / DWDM Systemen ist von den Nichtlinearitäten der Glasfaser und somit von der spektralen Leistungsdichteverteilung des Signals abhängig. Somit ist es von entscheidender Bedeutung für die effiziente Nutzung vorhandener optischer Übertragungswege das optische Spektrum messtechnisch ermitteln zu können.

Bei optischen Spektralanalysatoren gibt es zwei wichtige technische Kriterien - zum einen die Messzeit zur Aufnahme eines Spektrums und zum anderen die Auflösebandbreite der gemessenen Signale. Ziel ist es immer die Messzeit zu verringern und die Auflösebandbreite zu reduzieren. Bei der hier vorgestellten Messmethode liegt der Fokus auf der Reduzierung der Messzeit bei gleichzeitig kleiner Auflösebandbreite. Wir stellen ein Messverfahren vor, welches das Potential hat, sehr einfach die Messzeit weiter zu reduzieren.

Die Wellenlänge und Linienbreite optischer Signale kann mit Hilfe von optischen Spektralanalysatoren (OSA) gemessen werden. Die Messzeit eines handelsüblichen OSA mit Gittermonochromator liegt für einen Wellenlängenbereich von 1nm im Bereich von 70 ms. Ein Wellenlängenbereich von 1nm bei 1550 nm entspricht 130 GHz. Moderne OSA verfügen über eine Auflösebandbreite von 0,01 nm. Bei einer Wellenlänge von 1550 nm entspricht das einer Bandbreite von 1,25 GHz. Spektrale Anteile unterhalb dieses Bereichs können mit einem OSA nicht dargestellt werden.

Weiterhin besteht die Möglichkeit der selbst-heterodynen Überlagerung [1]. Dabei wird das optische Signal durch eine Selbstüberlagerung mit einer in der Phase verschobene Kopie des selbigen Signals in das elektrische Frequenzband gemischt. Das so entstandene optische Signal kann mit einer PIN-

Photodiode und einem elektrischen Spektralanalysator gemessen werden.

Eine weitere Möglichkeit ist das heterodyne Messverfahren, bei dem das optische Spektrum mittels Lokaloszillator und einer PIN-Photodiode in das elektrische Frequenzband verschoben wird.

Bei den heterodynen Überlagerungsmethoden ist in jedem Fall immer eine PIN-Photodiode und ein elektrischer Spektralanalysator notwendig um das Spektrum darzustellen. Der maximal darstellbare Wellenlängenbereich richtet sich nach der Bandbreite der PIN-Photodiode und des elektrischen Spektralanalysators. Derzeit sind PIN-Photodioden und elektrische Spektralanalysatoren bis 110 GHz Bandbreite verfügbar. Für hohe Bandbreiten steigen die Kosten für ein solches Messverfahren sehr schnell. Bei den heterodynen Messverfahren ist die Messgeschwindigkeit des verwendeten elektrischen Spektralanalysators ausschlaggebend. Für eine Auflösebandbreite von 3 MHz liegt die Messzeit für einen Frequenzbereich von 25 GHz im Bereich von 200 ms. Für einen Frequenzbereich von 130 GHz liegt somit die Messzeit bei rund 1 s.

In [2] und [3] wird eine neue Messmethode zur Ermittlung optischer Spektren vorgestellt. Diese basiert auf der sehr schmalbandigen Verstärkung des Brillouin Effekts und ermöglicht Auflösebandbreiten von 10 MHz [2] bzw. 23 MHz [3]. Bei dem in [2] beschriebenen Messverfahren wird eine verstimmbare Laserquelle zur Erzeugung der Brillouin Verstärkung genutzt. Mit dieser ist eine Messzeit von 12,5 ms für einen Wellenlängenbereich von 1 nm erreichbar. Die verstimmbare Laserquelle in [3] besteht aus einem Mach-Zehnder Modulator und einem Hochfrequenzgenerator. Die erreichbare Messzeit richtet sich nach der erreichbaren Durchlaufzeit des Hochfrequenzgenerators. Hierbei erreicht man Messzeiten wie bei den heterodynen Messverfahren, da bei beiden ein Hochfrequenzgenerator für die Messung der Wellenlänge eingesetzt wird.

Bei dem hier vorgestellten Messverfahren wird als verstimmbare Laserquelle eine konventionelle DFB-Laserdiode verwendet, welche über den Injektions-

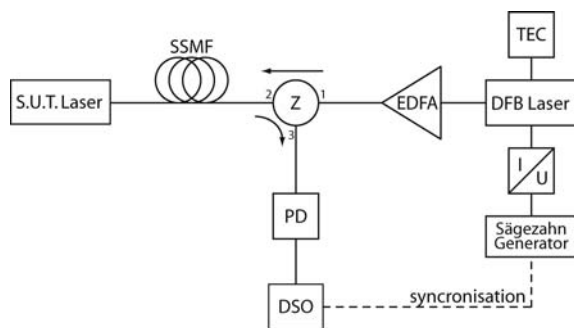
strom in der Wellenlänge verändert wird. Durch die direkte Modulation der Laserdiode mit einem Sägezahnsignal ist eine Verringerung der Messzeit möglich. Die von uns erreichte Messzeit beträgt derzeit 10 ms/nm. Gleichzeitig sind jedoch Grenzen bezüglich des maximal erreichbaren Messbereichs gegeben. Mit der von uns verwendeten Laserdiode konnte ein maximaler Messbereich von 1 nm erreicht werden. Die minimal erreichbare Auflösebandbreite bei diesen Messverfahren ist von der spektralen Breite der Brillouin Verstärkung abhängig [4].

2 Experiment

2.1 Versuchsaufbau

Bild 1 zeigt den Versuchsaufbau zur schnellen hochauflösenden optischen Spektrumanalyse. Der Versuchsaufbau besteht aus Standardkomponenten der optischen Nachrichtentechnik.

Von der linken Seite wird das zu untersuchende unbekannte Spektrum (S.U.T. Laser) in den Eingang der Standard Single Mode Faser (SSMF) eingekoppelt. Von der anderen Seite wird in den Ausgang der selben SSMF die Pumpwelle über einen Zirkulator (Z) eingespeist. Alle Signale am Ausgang der Faser werden über den Zirkulator in eine Photodiode (PD) eingekoppelt. Die elektrische Ausgangsspannung der Photodiode wird mit einem Digitalen Speicher Oszilloskop (DSO) dargestellt.



DFB Laser: Distributed Feedback Laser
 DSO: Digitales Speicher Oszilloskop
 EDFA: Erbium dotierter Faserverstärker
 I/U: Spannungs-Strom Wandler
 PD: Photodetektor

S.U.T. Laser: signal-under-test Laser
 SSMF: Standard Single Mode Faser
 TEC: Temperaturcontroller
 Z: Zirkulator

Bild 1 Versuchsaufbau

Zur Erzeugung einer in der Wellenlänge verschiebbaren Pumpwelle nutzen wir eine DFB Laserdiode bei einer Wellenlänge von 1538 nm. Die Wellenlänge dieses Pumplasers kann über den Injektionsstrom um 1nm verschoben werden, dies entspricht einer Frequenzänderung von 130 GHz bei 1538 nm. Die kontinuierliche Änderung des Injektionsstroms erfolgt mit einem Sägezahngenerator und einem Spannung-Strom Wandler. Der hier verwendete Aufbau ist vergleichbar mit einer verstimmbaren Laserquelle, aber technisch wesentlich einfacher und daher kostengünstiger zu

realisieren. Die Start- und Stopwellenlänge wird über die Anfangs- und Endspannung des Sägezahnsignals eingestellt. Der Zusammenhang zwischen der Sägezahnspannung und der durch die Laserdiode emittierte Wellenlänge wird durch den in Bild 2 dargestellten Funktionsgraphen beschrieben. Es besteht kein linearer Zusammenhang zwischen diesen beiden Größen. Dies ist bei der Darstellung der Spektren zu berücksichtigen.

Bei der in diesem Experiment verwendeten DFB Laserdiode (Anritsu, GB5A016) kann der Injektionsstrom im Bereich von 11 mA (Schwellwert) bis 150 mA (Maximalwert) verändert werden. Der Bereich der optischen Ausgangsleistung liegt hierfür zwischen -1,85 dBm und 14,9 dBm. Zur Erzeugung einer konstanten Pumpleistung über den gesamten Wellenlängenbereich wird dem Pumplaser ein EDFA nachgeschaltet. Dieser regelt die variable Eingangsleistung auf eine konstante Ausgangsleistung.

Die in die Faser eingestreurte Pumpwelle erzeugt in entgegengesetzter Ausbreitungsrichtung einen sehr schmalbandigen Brillouin Gewinn. Zwischen der Pumpwellenlänge und dem Maximum des Brillouin Gewinns besteht ein konstanter Wellenlängenunterschied je nach verwendetem Ausbreitungsmedium. Durch die Verschiebung der Pumpwellenlänge wird ebenfalls der Brillouin Gewinn in der Wellenlänge verschoben. Die Leistung der Pumpwelle wird unterhalb des Brillouin Schwellwertes eingestellt.

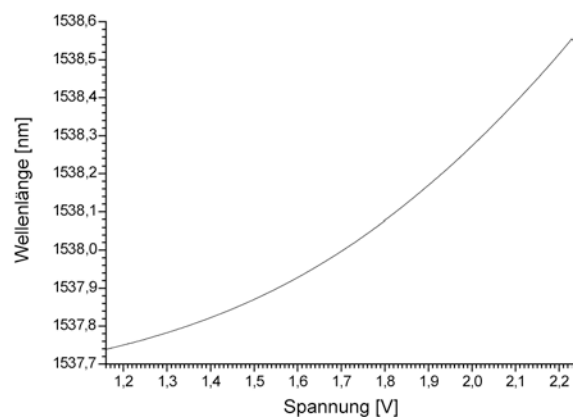


Bild 2 Zusammenhang Spannung/Wellenlänge

Liegt kein Teil des zu untersuchenden Emissionsspektrums im Bereich des Brillouin Gewinns ist die Ausgangsspannung der Photodiode annähernd Null. Befindet sich ein Teil des unbekannten Spektrums im Bereich des Brillouin Gewinns wird dieser verstärkt und die Photodiode liefert eine Ausgangsspannung. Die Ausgangsspannung der Photodiode wird mit einem DSO aufgezeichnet welches mit dem Sägezahngenerator synchronisiert ist. Somit ist es möglich das optische Amplitudenspektrum eines unbekannten Signals messtechnisch zu ermitteln. Die Darstellung auf dem DSO zeigt den prinzipiellen Verlauf des Amplitudenspektrums. Eine Kalibrierung des Messer-

gebnisses hinsichtlich Amplitude und Frequenz erfolgt in der Auswertung der Ergebnisse.

Die Periodendauer des Sägezahnsignals ist gleich der Messzeit der Versuchsanordnung. Diese wird begrenzt durch die minimal erreichbare Regelzeit der Ausgangsleistung des EDFA. In dem von uns durchgeführten Experiment konnte eine Messzeit von 10 ms für einen Wellenlängenbereich von 1 nm erreicht werden. Für eine geringere Messzeit als 10 ms regelt der EDFA die Leistung der Pumpwelle auf keinen konstanten Wert. Dies führt zu einer Verringerung der Brillouin Verstärkung und somit zu einer Verringerung des Messdynamikumfangs.

In diesem Experiment wurde die Auflösung des DSO auf 250 kSample/s eingestellt. Damit ergibt sich ein Frequenzabstand zwischen zwei Abtastpunkten von rund 1 MHz bei einem Messbereichsumfang von 130 GHz. Der Frequenzabstand zwischen zwei Abtastpunkten muss geringer sein als die Auflösungsbandbreite des Messverfahrens.

2.2 Ergebnisse

Bild 3 und 4 zeigt jeweils ein Messergebnis an einer extern phasenmodulierten Laserdiode. Bei dem in Bild 3 abgebildeten Messergebnis wurde der Phasenmodulator mit einem 3,2 GHz Sinussignal betrieben.

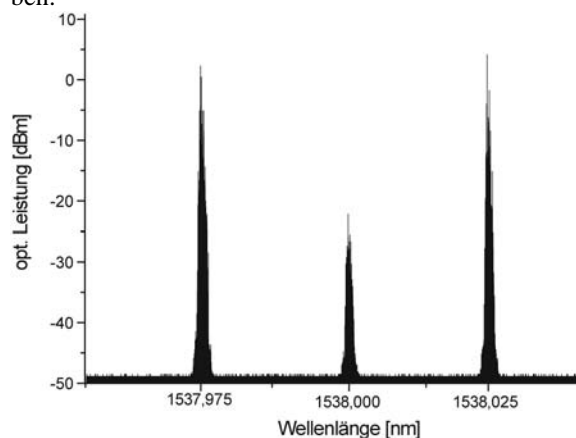


Bild 3 Messergebnis 3,2 GHz Sinussignal

Bild 4 zeigt ein optisches Modulationsspektrum eines 3,2 GBit/s NRZ (non return to zero) PRBS (pseudo random binary sequence) Signals bei einer Wellenlänge von 1538 nm.

3 Diskussion

Die bisher erzielte Messgeschwindigkeit wird im Wesentlichen von der Regelgeschwindigkeit des EDFA begrenzt. Der in diesem Experiment eingesetzte EDFA begrenzt die Messzeit derzeit auf minimal 10 ms. Eine Möglichkeit dem entgegenzusteuern ist die Regelgeschwindigkeit des EDFA zu erhöhen. Die andere Möglichkeit zur Verringerung der Messzeit besteht darin den EDFA nicht mit in den Ver-

darin den EDFA nicht mit in den Versuchsaufbau zu integrieren. Für diesen Fall würde über den gesamten Wellenlängenbereich keine konstante Pumpleistung zur Verfügung stehen und die Brillouin Verstärkung ist nicht konstant. Somit ist die Brillouin Verstärkung wellenlängenabhängig und für die erhaltenen Messwerte bedarf es einer nachträglichen Korrektur. Mit der bisher erreichten Messzeit von 10 ms/nm ist die Messgeschwindigkeit bei dem vorgestellten Verfahren höher als die in [2] und wesentlich höher als die bei heterodynem Messverfahren.

Ein weiterer begrenzender Faktor für die Messgeschwindigkeit ist der eingesetzte Spannungs-Strom Wandler. Der bei diesem Experiment verwendete Wandler hat eine maximale Betriebsfrequenz von 150 MHz. Dies entspricht einer minimalen Messzeit von 6,7 ns für den Wellenlängenbereich von 1 nm. Durch einen möglichen Verzicht auf den EDFA im Versuchsaufbau ist die erreichbare Messgeschwindigkeit um ein vielfaches höher als bei den bisherigen Ergebnissen.

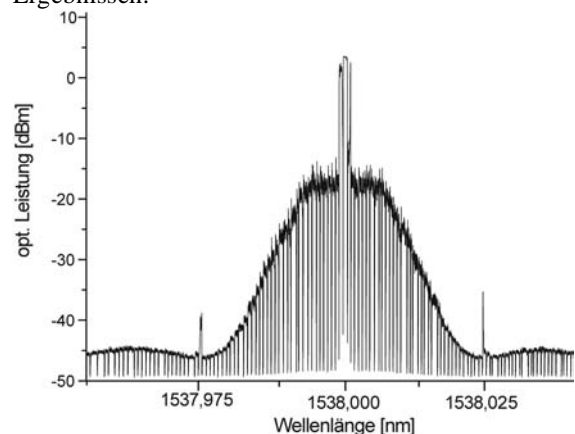


Bild 4 Messergebnis 3,2 Gbit/s PRBS

Die Auflösungsbandbreite ist abhängig vom physikalischen Medium in dem der Prozess der Brillouin Verstärkung stattfindet. Als Medium verwenden wir eine 50 km SSMF, welche eine 3 dB Brillouin Verstärkungsbandbreite von 23 MHz hat. Die Auflösungsbandbreite dieses Messverfahrens entspricht der Brillouin Verstärkungsbandbreite. Eine Verringerung der Auflösungsbandbreite kann mit anderen Fasertypen realisiert werden. Die Fasertypen AllWave (ITU-T G.652) oder TrueWave (ITU-T G.655) weisen Verstärkungsbandbreiten von 11,4 MHz bzw. 12,4 MHz auf [4]. Ferner ist es möglich die Verstärkungsbandbreite durch eine Änderung der Umgebungstemperatur zu verringern. Für eine steigende Umgebungstemperatur um 75 K konnten wir eine um 27% reduzierte Verstärkungsbandbreite messtechnisch ermitteln.

Durch den nichtlinearen Zusammenhang zwischen der Sägezahnspannung und der Wellenlänge der Laserdiode ist eine Kalibrierung der erhaltenen Messwerte auf der Wellenlängen- bzw. Frequenzachse notwendig. Des Weiteren besteht eine nichtlineare Funktion

zwischen dem gemessenen Amplitudenwert am Ausgang der Photodiode und der tatsächlichen Leistung. Der Grund dafür liegt an der Tatsache das für unterschiedliche Eingangsleistungen die Brillouin Verstärkung nicht konstant ist. Dieser Zusammenhang macht eine Kalibrierung der gemessenen Leistungswerte notwendig. Beide Kalibrierungen werden in der nachträglichen Auswertung der Ergebnisse vorgenommen. Eine direkte Kalibrierung ist möglich, in dem man die erhaltenen Messwerte mittels Rechner korrigiert und zur Anzeige bringt.

4 Fazit

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass das hier beschriebene Verfahren eine sehr preiswerte Variante zur Ermittlung optischer Spektren darstellt. Für Wellenlängenbereiche von 1 nm konnte eine Messzeit von 10 ms erreicht werden. Die Möglichkeit die Messzeit um ein vielfaches - auf 6,7 ns - zu verringern ist gegeben. Die bisher erzielte Auflösebandbreite von 23 MHz liegt weit unterhalb von optischen Spektrumanalysatoren mit Gittermonochromator und ist durch Verwendung einer AllWave Faser auf einen Wert von 11,4 MHz reduzierbar.

Abschließend möchten wir J. Klinger für die fachliche und der Deutsche Telekom AG für die finanzielle Unterstützung danken.

5 Literatur

- [1] J. A. Constable and I. H. White, "Laser linewidth measurement using a Mach-Zehnder interferometer and an optical amplifier", *Electron. Lett.* Vol. 30, No.2, pp. 140-141, 1994.
- [2] J. M. Subias Domingo, J. Pelayo, F. Villuendas, "Very High Resolution Optical Spectrometry by Stimulated Brillouin Scattering", *Phot. Tech. Let.* Vol. 17, No.2, pp. 855-857, 2005.
- [3] Th. Schneider, "Wavelength and line width measurement of optical sources with femtometre resolution" *Electron. Lett.* Vol. 41, No.22, pp.1234-1235, 2005.
- [4] A. Yeniay, J.M. Delavaux, and J. Toulouse, "Spontaneous and stimulated Brillouin scattering gain spectra in optical fibers", *J. Lightw. Technol.*, Vol.20, No.8, pp. 1425-1432, 2002.