

# 1 Gb/s Übertragung von optisch erzeugten Millimeterwellen für Radio Over Fibre Anwendungen

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

## Kurzfassung

Wir präsentieren eine einfache Methode zur Erzeugung und Modulation von hochfrequenten Signalen mit Hilfe des nichtlinearen Effekts der stimulierten Brillouin Streuung (SBS). Das vorgestellte Verfahren nutzt zum einen die positiven Eigenschaften der SBS aus und ist gleichzeitig unabhängig von der Brillouin Verstärkungsbandbreite. Es beruht auf der heterodynem Überlagerung zweier Frequenzkomponenten in einem Photodetektor. Das Verfahren ist extrem flexibel in der Generierung der elektrischen Trägerfrequenz und vor allem in der Modulationsbandbreite. Es wird ein 32 GHz Trägersignal mit einer Leistung von -40 dBm und einer Linienbreite von 300 Hz gezeigt. Weiterhin wird die fehlerfreie Übertragung des modulierten Trägers demonstriert. Dabei wird ein 1 Gb/s Signal über eine 50 km lange SSMF gesendet, in einer Photodiode detektiert und ins Basisband gemischt. Es werden Augendiagramme bei einer Datenrate von 1 Gb/s analysiert und eine Funkübertragung bei 32 GHz diskutiert.

## 1 Einleitung

Die steigende Nachfrage nach höheren Datenraten bei steigender Flexibilität bietet ein großes Potenzial für Radio Over Fibre (Funk über Glasfaser) Systeme [1]. Sie bestehen aus einem Zusammenspiel von optischen Zugangsnetzen und der Überbrückung der „letzten 100 m“ durch eine hochfrequente Funkverbindung. Optische Lichtwellenleiter besitzen zum einen eine geringe Dämpfung und eine hohe übertragbare Datenrate. Zum anderen ist die Frequenzbelegung der Funkfrequenzen in dem vorgesehenen Millimeterwellenbereich sehr gering. Eine hohe atmosphärische Dämpfung der Signale führt aufgrund des hohen Pfadverlustes zur Verwendung von Pikoellen. Auf der anderen Seite erlaubt die hohe Dämpfung auch eine Wiederverwendung von Trägerfrequenzen in Nachbarclustern. In der Vergangenheit wurden verschiedene Radio Over Fibre Systeme mit Übertragungsraten im Gigabit/s Bereich vorgestellt. So wurde im 60 GHz Band eine Datenrate von 1.25 Gb/s beschrieben [2]. Weiterhin wurde in [3] eine 3 Gb/s Funkverbindung bei 120 GHz vorgestellt. In [4] wurde kürzlich eine Übertragungsrate von 10 Gb/s bei einer Trägerfrequenz von 125 GHz präsentiert.

Es gibt verschiedene Verfahren zur optischen Erzeugung von Trägerfrequenzen im Bereich von 30-300 GHz. Die meisten beruhen auf der Methode der heterodynem Überlagerung von zwei phasenkorrelierten Signalen in einem Photodetektor. Zur Erzeugung dieser Signale kann man die optische Modenkopplung (Mode Locking), die Injektionskopplung (Injection Locking), die Phasenkopplung (Phase Locking) oder

die Frequenzvervielfachung durch externe Modulation anwenden. Die vorgestellten Verfahren sind sehr komplex, empfindlich gegenüber Umwelteinflüssen oder benötigen einen Frequenzgenerator im Millimeterwellenbereich. Diese Eigenschaften begrenzen auch die Applikationsmöglichkeiten der Methoden.

Verfahren die zur Generierung von mm-Wellen auf dem nicht-linearen Effekt der stimulierten Brillouin Streuung (SBS) beruhen, sind sehr flexibel und weisen ein geringes Phasenrauschen auf [5], [6]. Yao nutze SBS zur Verstärkung eines gedämpften Seitenbandes [7] um ein 5,4 GHz Signal zu erzeugen. In [8] wurde das obere und untere Seitenband durch zwei unabhängige Brillouingewinne verstärkt. Andererseits sind Verfahren, die auf Brillouinverstärkung basieren durch die schmale natürliche Verstärkungsbandbreite von einigen 10 MHz stark begrenzt [9]. Durch eine Bandbreitenerweiterung kann zwar Übertragungsrate erhöht werden, jedoch würde die Komplexität des Systems steigen [10].

Dieser Artikel beschreibt die Realisierung einer einfachen Methode zur hochbitratigen Datenübertragung für ein Radio Over Fibre Downlink System. Es basiert auf der Modulation des optischen Trägers mit Daten [11].

Eine ähnliche Idee wurde in [12] kurz beschrieben. Sie beruht auf der Frequenzkammerzeugung durch Phasenmodulation. Jedoch werden in [12] keine Untersuchungen bezüglich der Modulierbarkeit und der Trägersignalgüte unternommen. Das hier vorgestellte Verfahren beruht auf der Frequenzkammerzeugung durch Amplitudenmodulation. Durch eine Arbeitspunkteinstellung können unerwünschte Frequenz-

komponenten teilweise unterdrückt werden, was Störeinflüsse unterbindet. Die Methode ist sehr einfach und flexibel und kann unabhängig von der Brillouin Gewinnbandbreite angewendet werden.

## 2 Stimulierte Brillouin Streuung

Die Brillouinstreuung ist ein Ergebnis der Wechselwirkung einer Lichtwelle mit dem Material eines Wellenleiters [13]. Wegen der relativ hohen Lichtintensitäten (hohe optische Leistung über kleinem Leiterquerschnitt) kommt es zu thermischen elastischen Bewegungen der Moleküle in der Glasfaser, welche sich mit Schallgeschwindigkeit ausbreiten.

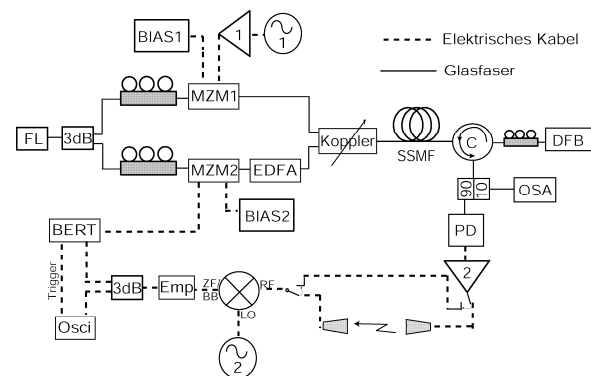
Diese periodischen Gitterschwingungen bewirken wiederum eine Brechzahlmodulation des Materials, die eine Streuung der einfallenden Welle hervorruft. Die Dichtemodulation propagiert mit einer relativen Geschwindigkeit zur einfallenden Welle, was eine Frequenzverschiebung der gestreuten Welle (Stokeswelle) aufgrund des Doppler Effektes zur Folge hat. In einer Standard Single Mode Faser (SSMF) bei einer Wellenlänge von 1550 nm ist die Stokeswelle um ca. 11 GHz in der Frequenz nach unten verschoben [14]. Wenn die Ursache der Dichtmodulation in der Lichtwelle selbst liegt, bezeichnet man die Streuung als stimuliert (SBS: Stimulated Brillouin Scattering), wobei ein Großteil der Leistung an die gestreute Welle übertragen wird. Andernfalls wird sie als spontan bezeichnet.

Wird die optische Leistung in einer Glasfaser sukzessiv erhöht, gelangt man an einen Punkt, an dem die überschüssige Energie an die Stokeswelle übergeht. Die Leistung der Pumpwelle stagniert und die der Stokeswelle steigt weiter. Dieser Punkt wird Brillouin Schwellwert genannt [14]. Stimulierte Brillouin Streuung ist der nichtlineare Effekt mit dem geringsten Schwellwert. In SSMF mit Längen von einigen 10 km reichen wenige Milliwatt aus, um in den sogenannten Brillouinschwellwertbereich zu gelangen. Betreibt man ein Brillouinverstärkungssystem unter diesem Schwellwert, so wird die Stokeswelle nicht durch das Rauschen in der Faser angeregt, sondern durch das zu verstärkende Signal [13]. Weiterhin werden dadurch Anwendungen wie Spektroskopie im Femtometerbereich [15], einstellbare Filter oder Kanalselektoren in Dense Wavelength Division Multiplex (DWDM) Systemen [16] oder als Demodulatoren in WDM Systemen [17], [18] möglich.

Die relativ hohe Rauschzahl eines Brillouinverstärkers [19] stellt jedoch eine Anwendungsbegrenzung dar. Andererseits kann man sagen: Betreibt man den Brillouinverstärker im Sättigungsbereich und das System bei minimaler Verstimmung, unterm Brillouinschwellwert und benutzt hohe Signalleistungen, kann man das spontane Emissionsrauschen stark minimieren [20].

## 3 Experiment

Der experimentelle Aufbau wird im Folgenden beschrieben und ist in **Bild 1** schematisch dargestellt. Die Hälfte des Lichtes eines Faserlasers (FL: Wellenlänge: 1550 nm, Linienbreite: < 1 kHz; Leistung: 16.5 mW) wird durch einen 10 Gb/s Mach Zehnder Modulator (MZM1) in ihrer Intensität moduliert. Das elektrische Eingangssignal am Modulator ist sinusförmig, hat eine Frequenz von 6,4 GHz und eine Leistung von 35 dBm. Durch eine definiert angelegte Biasspannung arbeitet der MZM im unteren quadratischen Arbeitspunkt und erzeugt somit Seitenbänder

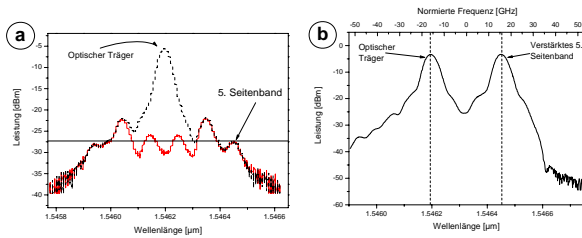


**Bild 1** Experimenteller Aufbau; FL: Faser Laser; MZM: Mach-Zehnder Modulator; EDFA: Erbium Doped Fiber Amplifier; BERT: Bit Fehlerraten Tester; DFB: Distributed Feedback Laser Diode; PD: Photo Detektor; OSA: Optischer Spektrum Analysator; REC: Empfängereinheit.

ungerader Ordnung während der optische Träger unterdrückt wird. Durch die Arbeitspunkteinstellung und den hohen Modulationsgrad können im beschriebenen Aufbau Seitenbänder bis zur 7. Ordnung erzeugt werden.

Die anderen 50% des emittierten Lichts des Faserlasers werden durch einen weiteren MZM (MZM2) mit Daten moduliert. Das angelegte Signal entspricht einer Pseudo-Random Bit Sequenz mit einer Wortlänge von  $1 \cdot 10^{23} - 1$  Bit (PRBS 23) und einer Datenrate von 1 Gb/s. Der modulierte optische Träger und der generierte Frequenzkamm werden über einen einstellbaren Koppler in eine 50,45 km lange SSMF gesendet. Das Spektrum am Eingang der Faser ist in **Bild 2** a zu sehen. Die gestrichelte Linie entspricht dem optischen Träger während die durchgezogene Linie den Frequenzkamm am Ausgang des Modulators darstellt.

Das Emissionsspektrum der Distributed Feedback Laserdiode (DFB) besitzt eine Bandbreite von 3 MHz und hat eine Leistung von 4,1 mW. Es wird als Pumpsignal für den selektiven Brillouinverstärkungsprozess genutzt und über einen Zirkulator in entgegengesetzter Richtung in die gleiche SSMF eingekoppelt. Die Pumpwelle erzeugt einen 28 MHz breiten Brillouingewinn. Dieser wird in seiner Wel-

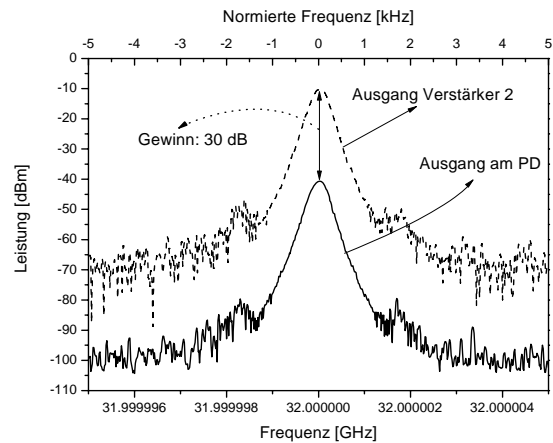


**Bild 2** a: Optisches Spektrum am Fasereingang: Frequenzkamm ohne optischen Träger (durchgezogene Linie) und mit optischen Träger (gestrichelte Linie); b: Optisches Spektrum am Zirkulator Ausgang.

lenlänge so eingestellt, dass er exakt mit der Wellenlänge des zu verstärkenden Seitenbandes übereinstimmt. Dieser Prozess wird über eine Temperaturregelung der DFB Laserdiode realisiert. Dadurch, dass das Verstärkungssystem unter dem Brillouinschwellwert betrieben wird, besitzt das verstärkte Ausgangssignal die gleichen Eigenschaften wie das Ursprungssignal (mit erhöhter Leistung). Mit Hilfe des hier beschriebenen Aufbaus wurde eine Verstärkung des rechten 5. Seitenbandes von  $-35.68$  dBm auf  $-3.37$  dBm erzielt.

Der modulierte optische Träger wird durch einen Erbium dotierten Faserverstärker (EDFA) auf eine Leistung verstärkt, die knapp unter dem Brillouinschwellwert liegt. Der EDF-verstärkte optische Träger und das SBS verstärkte Seitenband werden über den Zirkulator ausgekoppelt. Alle unerwünschten Frequenzkomponenten werden durch die natürliche Dämpfung der Glasfaser unterdrückt. Das optische Signal am Ausgang des Zirkulators ist in **Bild 2** b gezeigt. Dadurch, dass beide Komponenten aus einer optischen Quelle stammen, sind ihre Phasen am Eingang des Photodetektors (PD) nahezu korreliert. Der Frequenzabstand wird durch die Modulationsfrequenz des MZM1 und die Ordnung des verwendeten Seitenbandes bestimmt. In der vorgenommenen Untersuchung wurden beispielhaft eine Grundfrequenz von  $6,4$  GHz und das 5. Seitenband gewählt. Dadurch erhält man einen Abstand von  $32$  GHz zwischen dem Träger und dem Seitenband.

Das eigentliche Millimeterwellensignal  $f_{mm}$  wird durch die heterodyne Überlagerung der beiden Komponenten im PD generiert. Die optische Eingangsleistung beträgt  $-1$  dBm. Durch seine Trägheit ist der Photodetektor lediglich in der Lage, die Mischfrequenz  $f_{mn} = n \cdot f_{MZM}$  zu detektieren. Der Parameter  $n$  entspricht der Ordnung des Seitenbandes und  $f_{MZM}$  der Modulationsfrequenz des MZM (MZM1). Der elektrische Träger wird durch einen breitbandigen Verstärker um  $30$  dB verstärkt und anschließend durch einen externen Mischer in das Frequenzspektrum des elektrischen Spektrums Analysators (ESA) gemischt. Das erzeugte Millimeterwellensignal ist in **Bild 3** dargestellt.

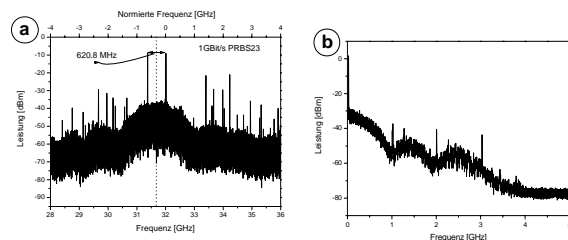


**Bild 3** Spektrum des  $32$  GHz Trägersignals vor (durchgezogene Linie) und nach (gestrichelte Linie) der elektrischen Verstärkung.

## 4 Ergebnisse

Wie in **Bild 3** abgebildet, zeigt die Untersuchung des Millimeterwellenträgers bei  $32$  GHz eine hohe spektrale Reinheit mit einer Linienbreite (full width at half maximum) von  $300$  Hz. Es wird angenommen, dass die tatsächliche Bandbreite niedriger ist, da die Messungen durch die Auflösungsbandbreite (RBW= $300$  Hz) des ESAs begrenzt ist. Die gemessene Leistung am Ausgang der Photodiode beträgt  $-40$  dBm. Der geringe Leistungspegel liegt an der ineffizienten optisch-elektrischen Konversion der Photodiode. Durch die zwischengeschaltete Verstärkerstufe konnte die Leistung auf  $-10$  dBm erhöht werden (**Bild 3** gestrichelte Linie).

Die Anwendung anderer Verfahren zur Frequenzkammerzeugung (z. B. Phasenmodulation) kann auch zu einer Erhöhung der Ordnung der generierten Seitenbänder führen. Dadurch kann die Aufwärtskonversion erhöht werden und das Verfahren wird noch effektiver. Der Brillouingewinn lässt sich durch Temperatur,- und Injektionsstromtuning auf jede beliebige Wellenlänge einstellen. Die verwendete DFB Laserdiode hat eine Durchstimmbarkeit von ca.  $1$  nm ( $=124,4$  GHz). Durch diese Variabilität ist das Verfah-



**Bild 4** a: Spektrum des  $1$  Gb/s modulierten  $32$  GHz Trägersignals. Das Signal ist an der ESA LO ( $310,4$  MHz) gespiegelt. b: Spektrum des  $1$  Gb/s Signals im Basisband.

ren sehr flexibel in der Erzeugung von Frequenzen und wird nach unserer Sicht nur durch die Bandbreite des PD begrenzt.

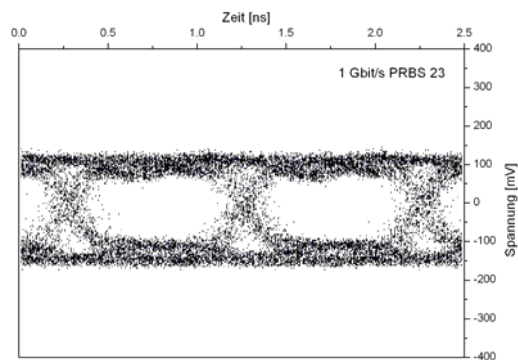
Nach erfolgter Modulation des optischen Trägers mit dem beschriebenen Signal (1 Gb/s PRBS 23) wird das Datensignal mit dem SBS verstärkten 5. Seitenband im PD heterodyn überlagert. Das konvertierte und verstärkte RF Spektrum bei 32 GHz ist in **Bild 4** a gezeigt. Durch die Anwendung eines externen Mischers ist die Darstellung auf einem ESA möglich. Es ist zu erkennen, dass das Spektrum an der LO Frequenz des ESAs (310,4 MHz) gespiegelt wird. Diese Signalstörung ist lediglich ein Anzeigefehler. Das Signal an sich ist davon unbeeinflusst.

Die Konvertierung ins Basisband wurde ebenfalls über einen externen Mischer realisiert (siehe **Bild 1**). Dieser wurde mit einer LO von 16 GHz betrieben. Die Konversionsverluste werden durch eine Empfangereinheit kompensiert. Sie agiert als Verstärker, besitzt eine Bandbreite von 3.21 GHz und hat ein Gewinnmaximum von 40 dB.

Das empfangene Signal im Basisband ist exemplarisch für eine Modulationsrate von 1 Gb/s in **Bild 4 b** dargestellt.

## 5 Modulation

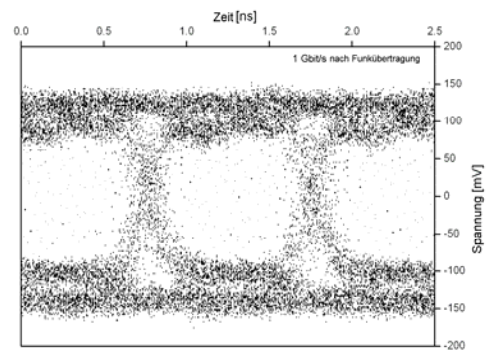
Die erfolgreiche fehlerfreie Übertragung des 1 Gb/s Signals ist in **Bild 5** dargestellt. Das Datensignal wurde über eine 50 km lange SSMF bei einer Trägerfre-



**Bild 5** Augendiagramm des 1 Gb/s PRBS 23 Signals (back to back) aufgenommen am Oszilloskop.

quenz von 32 GHz übertragen. Bei einer optischen Eingangsleistung am PD von -1 dBm beträgt die Spitze-Spitze Spannung am Oszilloskop 250 mV. Wie in der Abbildung zu erkennen ist, ist das Auge ohne signifikante Störungen in der Augenmitte klar geöffnet. Eine Q-Faktor Analyse ergab einen Wert von 6,2 was einer BER von  $287 \cdot 10^{-12}$  entspricht. Diese Untersuchung bestätigt die Bitfehlerratenmessung. Um eine Funkverbindung zu realisieren wurde das Radiosignal über 2 pyramidenförmige Hornantennen (Sender und Empfänger) gesendet. Wie in **Bild 6** zu erkennen ist, nimmt das Rauschen des Auges zu, obwohl die Sig-

nalleistung gleich bleibt. Dieser Effekt kann durch die Verstärkung der Empfangereinheit erklärt werden. Die Signalleistung wird auf den gleichen Wert verstärkt wie im „back to back“ Fall ( $V_{pk-pk}=250$  mV).



**Bild 6** Augendiagramm des 1 Gb/s PRBS 23 Signals (nach Funkübertragung) aufgenommen am Oszilloskop.

Auf der anderen Seite erhöht sich das Rauschen. Dadurch verringert sich der Signal zu Rauschabstand und das Signal wird gestört. Eine Funkverbindung wurde erfolgreich realisiert.

## 6 Zusammenfassung

In diesem Artikel wurde ein Verfahren zur Millimeterwellenerzeugung untersucht. Weiterhin wurde die einfache Implementation und Realisierung eines Modulationaufbaus beschrieben. Das Verfahren beruht auf der lokalen Trennung vom optischen Träger und eines erzeugten Frequenzkammes. Der modulierte optische Träger und ein SBS verstärktes Seitenband propagieren unabhängig voneinander in einer 50,45 km langen SSMF welche zum einen als Übertragungsmedium aber auch als Brillouin Gewinnmedium agiert. Dadurch, dass das Modulationssignal unabhängig von der Brillouin Verstärkungsbandbreite ist, sehen wir keinerlei Einschränkungen des Verfahrens durch die Eigenschaften der SBS.

Die Wellenlänge des erzeugten Seitenbandes und die des Brillouingewinns kann beliebig variiert werden. Aus diesem Grund ist die Methode sehr flexibel in ihrer erzeugbaren Frequenz. Sie wird lediglich durch die Bandbreite des Photodetektors limitiert.

Die Modulation des optischen Trägers wurde durch einen Mach-Zehnder Intensitätsmodulator realisiert. Es wurde ein 1 Gb/s Signal fehlerfrei über eine 50,45 km lange SSMF übertragen und erfolgreich gezeigt, dass eine Funkübertragung des Datensignals bei 32 GHz möglich ist. Bei der Freiraumübertragung wurde das Experiment durch fehlende HF Verstärker im Übertragungsband begrenzt.

## 7 Danksagung

Die Autoren bedanken sich für die Unterstützung durch Jens Klinger und Steffen Neidhardt von der Hochschule für Telekommunikation, Leipzig. Weiterhin sagen wir Dank an Christian G. Schäffer und Ignacio G. Insua von der Technischen Universität Dresden für die freundliche Leihgabe von Laborgeräten. Die Arbeit wurde finanziell durch die Deutsche Telekom AG unterstützt.

## 8 Literatur

- [1] Zhensheng J., Jianjun Y., Gee-Kung C., "A full-duplex radio-over fiber system based on optical carrier suppression and reuse," *IEEE Photon. Techn. Lett.*, Vol. 18, No. 16, Aug. 2006, pp. 1726–1728
- [2] Ohata K., Maruhashi K., Ito, S. Kishimoto, Ikui-na K., Hashiguchi T., Takahashi N., et al., "Wireless 1.25Gb/s Transceiver Module at 60 GHz Band," in *Tech. Dig. International Solid State Circuits Conference 2002*, 2002, pp. 298–299
- [3] Hirata A., Harada M., Nagatsuma T., "120-GHz wireless link using photonic techniques for generation, modulation, and emission of millimeter-wave signals," *IEEE J. Lightw. Techn.*, Vol. 21, No. 10, Oct. 2003, pp. 2145–2153
- [4] Hirata A., Kosugi T., Takahashi H., Yamaguchi R., Nakajima F., et al., "120-GHz-Band Millimeter-Wave Photonic Wireless Link for 10-Gb/s Data Transmission," *IEEE Trans. Microw. Th. Techn.*, Vol. 54, No. 5, May 2006, pp. 1937–1944
- [5] Junker M., Ammann M. J., Schwarzbacher A. T., Klinger J., Lauterbach K.-U., Schneider Th., "A Comparative Test of Brillouin Amplification and Erbium Doped Fiber Amplification for the Generation of Millimeter Waves with Low Phase Noise Properties," *IEEE Trans. Microw. Th. Techn.*, Vol. 54, No. 4, June 2006, pp. 1576–1581
- [6] Schneider Th., Junker M., Lauterbach K.-U., "Theoretical and experimental investigation of Brillouin scattering for the generation of millimeter waves," *J. Opt. Soc. Am. B*, Vol. 23, June 2006, pp. 1012–1019
- [7] Yao X. S., "Brillouin Selective Sideband Amplification of Microwave Photonic Signals," *IEEE Phot. Techn. Lett.*, Vol. 10, No. 1, Jan. 1998, pp. 138–140
- [8] Schneider T., Junker M., Hannover D., "Generation of millimeter-wave signals by stimulated Brillouin scattering for radio over fibre systems," *Electron. Lett.*, Vol. 40, No. 23, Nov. 2004, pp. 1500–1501
- [9] Shen Y., Zhang X., Chen K., "Optical single sideband Modulation of 11-GHz RoF system using stimulated Brillouin scattering," *IEEE Photon. Techn. Lett.*, Vol. 17, No. 6, June 2005, pp. 1277–1279
- [10] Junker M., Schneider Th., Lauterbach K.-U., Ammann M. J., Schwarzbacher A. T., "Flexible Brillouin Bandwidth Broadening for an Amplification, Filtering or Millimeter Wave Generation Systems," *Optical Amplifiers and Their Applications Topical Meeting (The Optical Society of America, Washington, DC)*, June 2006, JWB42
- [11] Park C. S., Lee C. G., Park C.-S., "Photonic Frequency Upconversion Based on Stimulated Brillouin Scattering," *IEEE Phot. Techn. Lett.*, Vol. 19, No. 10, May 2007, pp. 777–779
- [12] Yao X. S., "Phase-to-Amplitude Modulation Conversion Using Brillouin Selective Sideband Amplification," *IEEE Phot. Techn. Lett.*, Vol. 10, No. 2, Feb. 1998, pp. 264–266
- [13] Schneider T., *Nonlinear Optics in Telecommunications*. Springer, Berlin Heidelberg New York, 2004, pp. 267–296
- [14] Voges, E., Petermann K., *Optische Kommunikationstechnik*. Springer, Berlin Heidelberg, 2002
- [15] Schneider Th., "Wavelength and line width measurement of optical sources with femtometre resolution," *Electr. Lett.*, Vol. 41, No. 22, 2005, pp. 1234–1235
- [16] Chraplyvy A. R., Tkach R. W., "Narrowband tunable optical filter for channel selection in densely packed WDM systems," *Electr. Lett.*, Vol. 22, 1986, pp. 1084–1085
- [17] Tkach R. W., Chraplyvy A. R., Derosier R. M., Shang H. Z., "Optical demodulation and amplification of FSK signals using AlGaAs lasers," *Electr. Lett.*, Vol. 24, No 5, Mar. 1988, pp. 260–262
- [18] Tkach R. W., Chraplyvy A. R., Derosier R. M., "Performance of a WDM network based on stimulated Brillouin scattering," *Photon. Techn. Lett.*, Vol. 1, No. 5, May 1989, pp. 111–113
- [19] Loayssa A., Benito D., Garde M. J., "Applications of optical carrier Brillouin processing to microwave photonics," *Opt. Fiber Techn.: Materials, Devices and Systems*, Vol. 8, No. 1, Jan. 2002, pp. 24–42
- [20] Ferreira M. F., Rocha J. F., Pinto J. L., "Analysis of the gain and noise characteristics of fibre Brillouin amplifiers," *Opt. Quant. Electr.*, Vol. 26, 1994, pp. 35–44