

Minimierung der Gruppengeschwindigkeits-Dispersion in faserbasierenden Slow-Light-Systemen

Andrzej Wiatrek, Ronny Henker, Kai-Uwe Lauterbach, Markus Junker und Thomas Schneider
Hochschule für Telekommunikation Leipzig (FH), Leipzig, Deutschland

Kurzfassung

Dieser Beitrag untersucht verschiedene Ansätze zur Vergrößerung der Bandbreite von SBS basierten Slow-Light-Systemen mit Blick auf eine geringe Verzerrung der optischen Pulse und eine maximale effektive zeitliche Verzögerung. Auf Grundlage der analytischen Systembeschreibung wird mit Hilfe einer Simulation der Verlauf des Gruppenbrechungsindex und der GVD analysiert und optimiert.

1 Einführung

Die Manipulation der Gruppengeschwindigkeit optischer Pulse eröffnet vielversprechende Möglichkeiten für den Einsatz in photonischen Netzen, z. B. für die Realisierung optischer Puffer, die Synchronisation verschiedener Datenströme und die Signalverarbeitung. Bisher werden diese Aufgaben von elektronischen Systemen übernommen. Diese begrenzen einerseits die maximale Übertragungsbandbreite und andererseits folgen aus der optisch-elektrisch-optischen Wandlung zusätzliche Bitfehler, längere Verarbeitungszeiten und ein höherer Energieverbrauch. Faserbasierende Slow- und Fast-Light-Systeme bieten die Möglichkeit, die Gruppengeschwindigkeit optischer Pulse direkt in der Glasfaser zu beeinflussen.

Das untersuchte Slow-Light-System basiert auf dem nichtlinearen optischen Effekt der stimulierten Brillouin-Streuung (SBS). In einem solchen System erzeugt eine Pumpwelle mit der Mittenfrequenz ω_p durch Brillouin-Streuung eine Stokes-Gewinn-Bandbreite mit der Mittenfrequenz $\omega_p - \omega_B$ und eine Anti-Stokes-Verlust- bzw. Absorptions-Bandbreite mit der Mittenfrequenz $\omega_p + \omega_B$. Die Frequenz ω_B wird als Brillouin-Verschiebungsfrequenz oder auch Brillouin-Shift bezeichnet. Gewinn- bzw. Verlust-Bandbreite und Brillouin-Shift sind von der Umgebungstemperatur, von mechanischer Beanspruchung und vom Fasertyp abhängig. Neben der Verstärkung bzw. Absorption kommt es innerhalb der entstehenden Bandbreiten zu einer Änderung des Gruppenbrechungsindex, was letztendlich zu einer Beeinflussung der Gruppengeschwindigkeit führt.

Der Effekt der SBS hat für Slow-Light-Systeme mehrere Vorteile:

- Die Brillouin-Streuung tritt im gesamten Transparenzbereich einer Faser und in jedem Fasertyp auf.
- Das System kann innerhalb der existierenden Netzinfrastruktur implementiert werden.
- Zur Erreichung relativ hoher Zeitverzögerungen sind geringe Pumpleistungen notwendig. Dazu kann die Verzögerungszeit direkt über

die Leistung der Pumpwelle eingestellt werden.

Nachteilig wirkt sich die verfügbare natürliche Bandbreite von etwa 30 bis 50 MHz gegenüber den aktuell benötigten Signalbandbreiten aus. Des Weiteren ist der Verzögerungsprozess meistens an eine Verstärkung der Pulse gekoppelt und es kommt mit ansteigender zeitlicher Verzögerung zu einer Verzerrung der Signale durch Gruppengeschwindigkeits-Dispersion (GVD).

2 Theorie

Die allgemeine Transferfunktion eines Pulses in einem optischen Medium lässt sich mit:

$$H(\omega) = \exp(-j \cdot k(\omega) \cdot z) \quad (1)$$

angeben, wobei $k(\omega)$ der Wellenzahlvektor und z die Faserlänge ist. Das Pulsspektrum besteht aus mehreren Frequenzanteilen. Der resultierende Wellenzahlvektor ist damit abhängig von der Frequenz und kann in einer Taylor-Reihe approximiert werden [1]:

$$k(\omega) = \sum_{i=0}^{\infty} \frac{k_i(\omega - \omega_0)}{i!}. \quad (2)$$

Die Frequenz ω_0 entspricht der Mittenfrequenz des Pulses und die verschiedenen k_i berechnen sich mit:

$$k_i = \left[\frac{d^i k}{d\omega^i} \right]_{\omega=\omega_0}. \quad (3)$$

Die erste Ableitung des Wellenzahlvektors entspricht der reziproken Gruppengeschwindigkeit und die zweite Ableitung führt zur GVD [1]. Sind die zweite und höhere Ableitungen gleich null, wird der Puls verzögert, gedämpft oder verstärkt und seine Phase ändert sich. Die Pulsform selbst bleibt aber erhalten.

Im Fall eines SBS-basierten Slow-Light-Systems setzt sich der Wellenzahlvektor aus einem Linearterm und einer Funktion $g(\omega)$ zusammen, die den Einfluss

der Brillouin-Streuung in Abhängigkeit der Frequenz beschreibt.

$$k(\omega) = \frac{n_0}{c_0} \omega + g(\omega) \quad (4)$$

Dabei ist n_0 der lineare Brechungsindex des Fasermaterials und c_0 die Vakuum-Lichtgeschwindigkeit. Ausgehend von der Transferfunktion in Glg. (1) ist der Imaginärteil von $k(\omega)$ Ursache für eine Verstärkung bzw. Dämpfung des Pulses. Der Realteil ist verantwortlich für eine Phasenänderung. Glg. (4) zeigt, dass nur die Funktion $g(\omega)$ zu einer Änderung der Gruppengeschwindigkeit und damit auch zur GVD führen kann.

Aus dem Zusammenhang zwischen k_l und reziproker Gruppengeschwindigkeit lässt sich auf eine Proportionalität zwischen dem Realteil der ersten Ableitung des Wellenzahlvektors und dem Gruppenbrechungsindex schließen. Ein hoher Gruppenbrechungsindex führt zu großen Zeitverzögerungen. Ein breiter flacher Verlauf ist notwendig für eine geringe Verzerrung, da in diesem Fall die höheren Ableitungen des Wellenzahlvektors minimal werden [2, 3].

3 Simulation

3.1 Unverbreiteter Fall

Als Vergleichskonfiguration für den Einfluss einer Verbreiterung des Gewinnspektrums auf die GVD wird ein einzelner Lorentz-förmiger Stokes-Gewinn mit zwei Anti-Stokes-Verlusten an seinen Flanken überlagert. Durch die zusätzlichen Verluste können zeitliche Verzögerung und Verstärkung teilweise entkoppelt werden. Das heißt, dass die Verzögerungszeit durch die Absorption mit beeinflusst werden kann und nicht mehr durch Sättigungseffekte der SBS begrenzt wird [4].

Der Einfluss der SBS auf den Wellenzahlvektor ergibt sich zu:

$$g(\omega) = \frac{g}{z} \cdot \frac{\gamma}{(\omega - \omega_0) + j\gamma} - \frac{g_{LOSS}}{z} \cdot \frac{\gamma_{LOSS}}{[\omega - (\omega_0 \pm \delta_{LOSS})] + j\gamma_{LOSS}} \quad (5)$$

Dabei stehen g und g_{LOSS} für die jeweilige Brillouin-Verstärkung in der Linienmitte und γ und γ_{LOSS} für die halben Halbwertsbreiten der einzelnen Lorentz-Kurven. Der Abstand zwischen den Verlustspektren beträgt $2\delta_{LOSS}$. In **Bild 1** sind diese so positioniert, dass die Halbwertsbandbreite des Gruppenbrechungsindex maximal wird ($\delta_{LOSS} = 1,9\gamma_{LOSS}$).

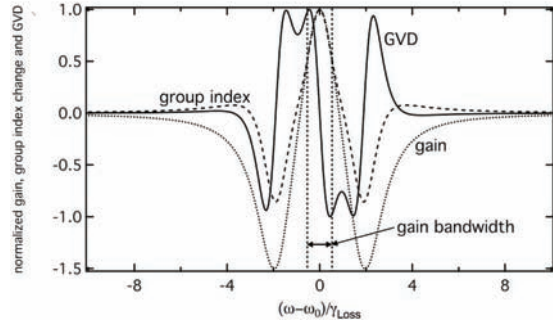


Bild 1 Normierter Gewinnverlauf, Gruppenbrechungsindex und GVD

Die Darstellung zeigt, dass innerhalb der Gewinnbandbreite die größtmögliche Änderung der GVD zu verzeichnen ist. Damit ist auch für Pulse innerhalb des Gewinnspektrums eine Verzerrung zu erwarten.

3.2 Überlagerung mehrerer Lorentz-Gewinnspektren

Die erste untersuchte Möglichkeit der Verbreiterung des Brillouin-Gewinnspektrums ist die Überlagerung mehrerer Lorentz-Gewinne. Die Erweiterung zur in [5] eingeführten Methode besteht im Hinzufügen zweier Anti-Stokes-Verlustspektren an den Flanken des entstehenden Gesamtgewinns, was auch hier zu einer Entkopplung von zeitlicher Verzögerung und Verstärkung führt.

Der Einfluss der SBS lässt sich im Fall von drei überlagerten Gewinnspektren mit folgendem Ausdruck beschreiben:

$$g(\omega) = \frac{g}{z} \cdot \frac{\gamma}{(\omega - \omega_0) + j\gamma} + \frac{g}{z} \cdot \frac{\gamma}{[\omega - (\omega_0 \pm \delta)] + j\gamma} - \frac{g_{LOSS}}{z} \cdot \frac{\gamma_{LOSS}}{[\omega - (\omega_0 \pm \delta_{LOSS})] + j\gamma_{LOSS}} \quad (6)$$

Der zweite Term in Glg. (6) steht für die zusätzlich überlagerten Lorentz-förmigen Stokes-Gewinne, die einen Abstand von 2δ zu einander haben. Für die Darstellung in **Bild 2** ist der Abstand der Stokes-Gewinne mit Rücksicht auf einen besonders flachen linearen Verlauf der GVD innerhalb der Verstärkungsbandbreite festgelegt ($\delta = \gamma/\sqrt{2}$). Größere Werte führen zu stark ausgebildeten Nichtlinearitäten innerhalb der Gewinnbandbreite. Der Abstand der Verlustspektren dient wiederum der Maximierung der Halbwertsbandbreite des Gruppenbrechungsindex ($\delta_{LOSS} = 2,6\gamma_{LOSS}$). Gegenüber der Vergleichskonfiguration hat sich die Gewinn-Bandbreite verdoppelt. Für größere Werte sind mehr Lorentz-Gewinne notwendig.

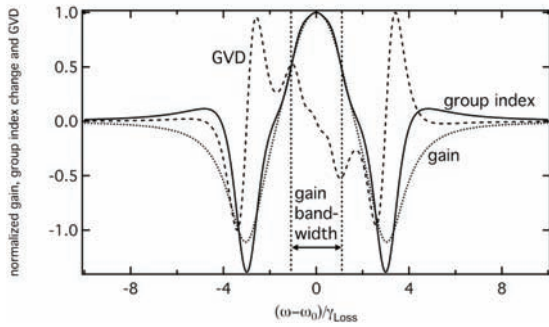


Bild 2 Normierter Gewinnverlauf, Gruppenbrechungsindex und GVD

Die Änderung der GVD innerhalb der Gewinnbandbreite ist nach der Verbreiterung etwa halb so groß wie die maximale Änderung im untersuchten Frequenzbereich (Bild 2).

3.3 Verbreitertes Gauß-Gewinnspektrum

Die Lorentz-Form des Brillouin-Gewinns gilt genau genommen nur bei quasi-monochromatischen Pumpwellen. Wird deren Spektrum viel breiter als die natürliche Brillouin-Bandbreite, so ist das entstehende Gewinnspektrum fast identisch zum Pumpspektrum.

Im Fall eines so verbreiterten Gewinnspektrums mit zwei überlagerten Verlustspektren lässt sich der Einfluss der SBS in Glg. (4) wie folgt beschreiben [4, 6]:

$$g(\omega) = \frac{g}{jz} \cdot \exp\left[-\left(\frac{\omega - \omega_0}{\gamma_G}\right)^2\right] \cdot \operatorname{erfc}\left(-j \frac{\omega - \omega_0}{\gamma_G}\right) - \frac{g_{LOSS}}{z} \cdot \frac{\gamma_{LOSS}}{[\omega - (\omega_0 \pm \delta_{LOSS})] + j\gamma_{LOSS}}, \quad (7)$$

wobei $\operatorname{erfc}()$ die komplementäre Error-Funktion beschreibt und γ_g der 1/e-Bandbreite des Gauß-Spektrums entspricht. Für die Simulation wird dieser Wert auf $3\gamma_{LOSS}$ eingestellt.

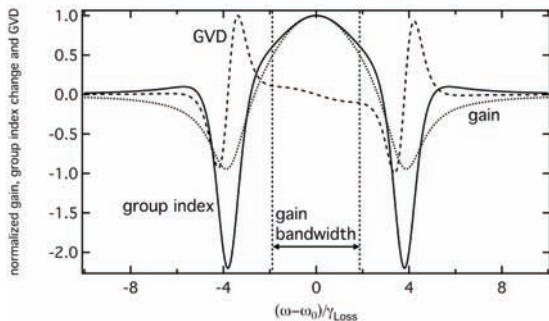


Bild 3 Normierter Gewinnverlauf, Gruppenbrechungsindex und GVD

Die maximale Halbwertsbandbreite des Gruppenbrechungsindex wird bei einem Abstand der Verluste von $\delta_{LOSS} = 3,9\gamma_{LOSS}$ erreicht. Die Gewinnbandbreite ent-

spricht in diesem Fall etwa dem vierfachen der Vergleichskonfiguration (siehe Bild 3). Die Darstellung zeigt, dass der Gruppenbrechungsindex in dieser Konfiguration flacher verläuft als der Gewinn. Die GVD ist innerhalb der Gewinnbandbreite fast linear und ändert sich nur geringfügig.

4 Zusammenfassung

Die Simulation zeigt, dass auch ein Puls, der sich vollständig im Brillouin-Gewinnspektrum befindet je nach Konfiguration aufgrund des nicht konstanten Gruppenbrechungsindex bzw. der GVD verzerrt wird. Die Verbreiterung des Gewinnspektrums bringt einerseits den Vorteil einer Erhöhung der möglichen Datenrate mit sich. Andererseits nimmt die Verzerrung innerhalb der Gewinnbandbreite ab. Bild 4 stellt die Verläufe der GVD bei den verschiedenen Verfahren noch einmal vergleichend dar. Aus der Abbildung zeigt sich die Methode der Gauß-förmigen Verbreiterung am verzerrungsärmsten.

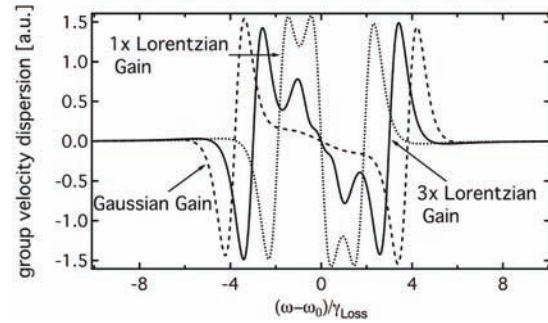


Bild 4 Vergleich der GVD für die untersuchten Konfigurationen

Bereits eine geringe Verbreiterung führt in jedem Fall zu einer Reduktion der GVD innerhalb der Gewinnbandbreite. In [7] wird gezeigt, dass eine Erweiterung des Gewinnspektrums bis zur doppelten Brillouin-Verschiebungsfrequenz und darüber hinaus möglich ist.

Die entstehende Zeitverzögerung in der Linienmitte lässt sich allgemein für alle drei untersuchten Fälle wie folgt ausdrücken:

$$t_D = z \left(\frac{n_0 - 1}{c_0} \right) + C + 2g_{LOSS}\gamma_{LOSS} \frac{\delta_{LOSS}^2 - \gamma_{LOSS}^2}{(\delta_{LOSS}^2 + \gamma_{LOSS}^2)^2}. \quad (8)$$

Dabei ist C ein Term, der charakteristisch für das jeweilige Gesamtgewinnspektrum ist. Er ist proportional zum Gewinn und umgekehrt proportional zur Gewinnbandbreite. Neben der Manipulation der Verzögerungszeit über den Gewinn und damit über die Pumpleistung ist es laut Glg. (8) möglich, diese über den Abstand der Verlustspektren einzustellen. In Bild 5 sind die dadurch entstehenden Zeitverzögerungen für alle drei untersuchten Konfigurationen vergleichend dargestellt. Grundsätzlich zeigt sich,

dass jede Verbreiterung zu einer Reduktion der maximal möglichen Zeitverzögerung führt.

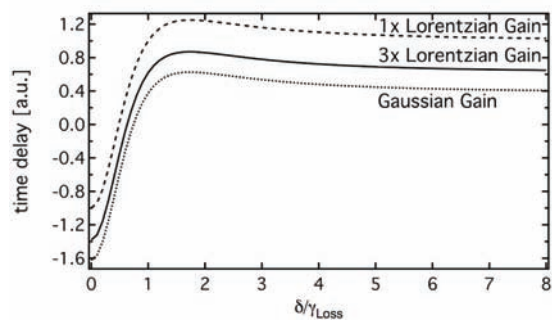


Bild 5 Vergleich der erreichbaren Zeitverzögerungen in der Linienmitte für die untersuchten Konfigurationen in Abhängigkeit vom Abstand der Verlustspektren

Spektrale Breite und zeitliche Dauer eines Pulses sind umgekehrt proportional zu einander. Aus diesem Grund muss das Verhältnis zwischen Pulsdauer und Zeitverzögerung durch die Verbreiterung des Gewinnpektrums nicht zwangsläufig schlechter werden.

Abschließend möchten wir J. Klinger von der Hochschule für Telekommunikation in Leipzig für die fachliche Unterstützung herzlich danken.

5 Literatur

- [1] Schneider, T.: Nonlinear Optics in Telecommunications. Berlin: Springer-Verlag, 2004
- [2] Henker, R. ; Wiatrek, A. ; Lauterbach, K.-U. ; Schneider, T.: Optimization of the Brillouin Spectrum for Fiber Based Slow Light Systems. Proc. of CLEO (accepted) (2008), Mai, Nr. CThE1
- [3] Stenner, M. D. ; Neifeld, M. A.: Distortion Management in slow-light pulse delay. Optics Express 13 (2005), Dezember, Nr. 25, S. 9995–10002
- [4] Schneider, T. ; Henker, R. ; Lauterbach, K.-U. ; Junker, M.: Comparison of delay enhancement mechanisms for SBS-based slow light systems. Optics Express 15 (2007), Juli, Nr. 15, S. 9606–9613
- [5] Pant, R. ; Stenner, M. D. ; Neifeld, M. A.: Designing Optimal Gain Profiles for Slow-Light Applications. Proc. of SPIE 6482 (2007), S. 64820R1 - 64820R7
- [6] Zhu, Z. ; Dawes, A. M. C. ; Gauthier, D. J. ; Zhang, L. ; Willner, A. E.: Broadband SBS Slow Light in an Optical Fiber. Journal Of Lightwave Technology 25 (2007), Januar, Nr. 1, S. 201–206
- [7] Schneider, T. ; Junker, M. ; Lauterbach, K.-U.: Potential ultra wide slow-light bandwidth enhancement. Optics Express 14 (2006), November, Nr. 23, S. 11082 - 11087