

超高速光信号の信号再生に関する光物理学的見地からの基礎研究

小 西 毅 大阪大学大学院工学研究科准教授

1 研究の目的

光通信ネットワークでは、伝送、増幅、スイッチング等の処理により、光信号の各ビット間強度が一定ではなくなり、強度揺らぎが生じる。また、レーザー光は光源から射出された直後でさえ、その強度にはわずかながら揺らぎが存在し、それら光信号の強度揺らぎは様々な光信号処理に弊害をもたらす、信号処理の正確性を低下させる。特に近年盛んに研究が行われている非線形光信号処理にとっては、わずかな強度揺らぎも非常に大きな影響となるため、光信号のもつ強度揺らぎによって信号処理の性能は著しく低下する恐れがある。将来のフォトニックネットワークで用いられる超高速光信号処理の安定化を行うためには、全光システムによる強度安定化技術の開発が不可欠である。(図1) 全光システムによる強度安定化技術の実現には様々なアプローチが考えられるが、例えば入力強度の変化に対して一定値の出力が得られるリミッタの機能を用いることにより、光強度の均一化が実現されると考えられる。しかしこれまでの2R光信号再生技術を含めた各光リミッタ手法[1-9]に用いられている強度伝達関数の飽和特性は、リミッタの機能に近いふるまいを示すが理想的なリミッタの機能ではないため、図1に示すように出力強度がほぼ一定の値を示す強度範囲は非常に狭く、実現可能なダイナミックレンジや強度安定化精度にはおのずと限界が存在する。全光技術による理想的なリミッタ特性を実現するためには、近い物理現象を用いる従来の研究手法から脱却を行う必要がある。我々はこれまでに、その性能改善を目的として、自己位相変調現象と新しい波長フィルリング技術に基づいた方法を提案してきている。[10-11] さらに、光信号のチャープ状態の制御による性能改善の可能性について新しいアプローチを提案してきている。[12-13]

本研究では、理想的な特性を持つ全光リミッタの実現を目指し、10Gbpsを超える超高速光信号処理の安定化の実証を第一の目的とした。また、我々が現在取り組んでいる自己位相変調効果に基づくアプローチをさらに進め、光物理的な見地から強度に依存して変化する自己位相変調現象の中に変化しない要素を見出していくことを目的とする。

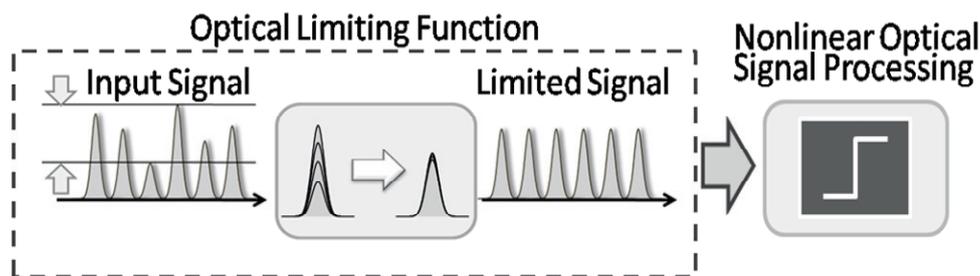


図1 非線形光信号処理活用のための信号の安定化

2 研究の方法

2-1 利用する自己位相変調効果の再検討

100Gbpsを超える高い繰り返しの光信号に対してパルス間の安定性を実現するには、安定化機構の応答性に相応の高速性が求められる。一方、光信号の繰り返しの高速化とともに光信号を構成する各パルスのパルス幅は短くなり、非線形光学効果を利用することが容易になる。このように、消費電力などの課題を念頭に置きつつも、将来の超高速光信号処理における非線形光学効果の利用は一つの自然な流れであると考えられる。このような指針の下、本研究では、非線形光学効果による強度依存スペクトル変化において強度の変

化に依存しないスペクトル成分に着目するアプローチを採用した。(図2)

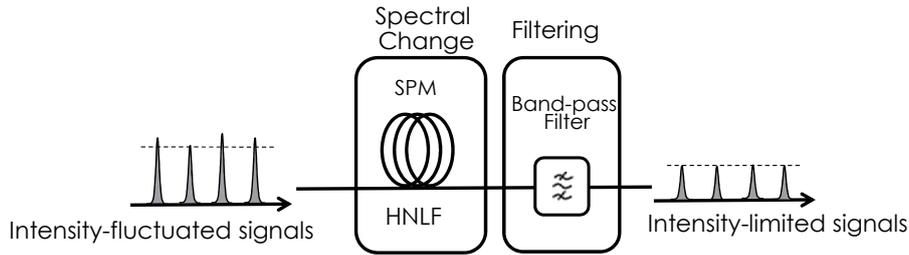


図2 本研究で採用するアプローチの概要

本アプローチでは、非線形光学効果の一つである自己位相変調(SPM; Self-Phase Modulation)によるスペクトルの変化を利用し、光信号の強度に応じたスペクトル変化を誘起する。入力信号の強度揺らぎにより生じる様々なスペクトルパターンに対して出力信号強度が一定となるようなスペクトル成分を抽出することにより、光パルスの強度揺らぎを低減する。これまでに、自己位相変調(SPM; Self-Phase Modulation)によるスペクトル変化では、中心周波数における強度の増加と減少の周期的な現象が認められている。一般には、この中心周波数の強度の増加が減少へ転じる領域を利用した強度リミッタ機能の実現提案されている。しかし、そのままこの現象を利用して高いパルス間強度安定性(高精度)と広いダイナミックレンジの実現には、現象自体が正弦波的な周期現象のために限界があった。そこで、本手法を用いてより高いパルス間強度安定性(高精度)と広いダイナミックレンジを追求するために、自己位相変調(SPM; Self-Phase Modulation)によるスペクトルの変化のメカニズムのより詳細な分析をもとに、プレチャープ依存性を考慮することにより、強度の変化に依存しないスペクトル成分の創出を試みた。(図3)

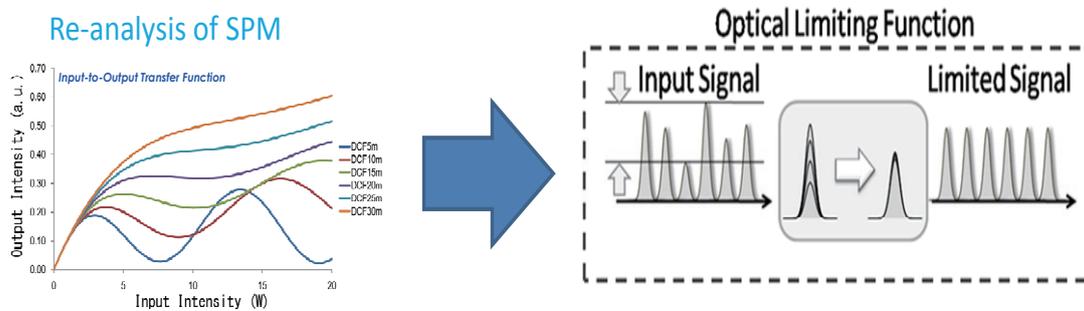


図3 利用する自己位相変調現象の再検討

2-2 高信頼性獲得への検討

10Gbpsにおけるビットエラーレートのシミュレーション実験を行った。入力信号として、中心波長1550nm、パルス幅1.3ps、繰り返し10GHz、ピーク強度5Wを中心に±12%の強度揺らぎを持つ光信号を用いた。図4にシミュレーションで用いたシステムを示す。光リミッタの性能改善を目指した前項2-1における検討結果を踏まえ、本システムでは、入力信号を分散補償ファイバ(DCF)に伝播させることによりアップチャープを付加した。前項2-1における検討結果については、後述する。このプリチャープの効果により、高非線形ファイバ(HNLF)中において誘起される自己位相変調(SPM; Self-Phase Modulation)によるスペクトル変化は、入力信号の強度を問わず、スペクトルの中心波長成分の強度は一定に保たれる。スペクトルの中心波長成分をOBPFによりフィルタリングを行うことにより、強度揺らぎが取り除かれ、高精度な光強度安定化が実現される。

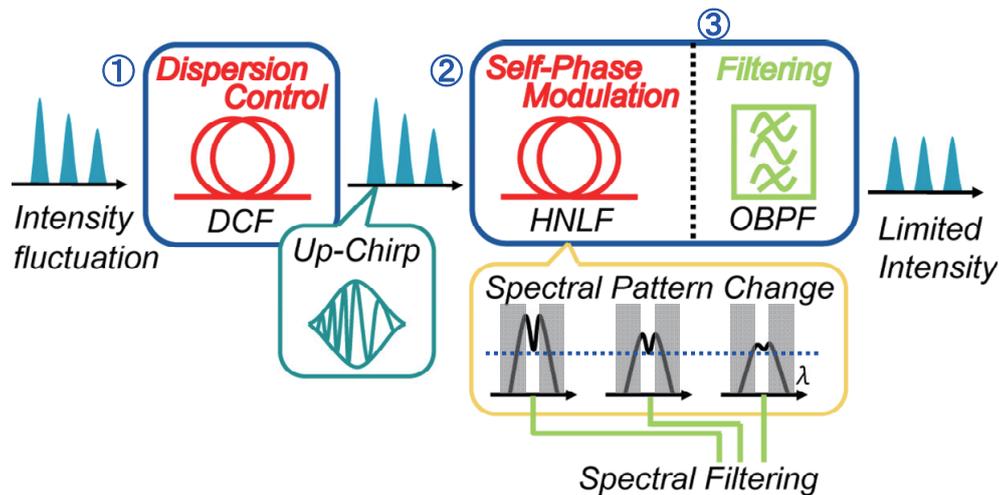


図4 10Gbps 信号に対するシミュレーションで用いたシステムの概略；①プレチャープ付加部，
②自己位相変調発生部，③強度無依存スペクトル成分抽出部。

3 研究の結果

3-1 利用する自己位相変調効果の再検討の結果

光パルスの強度に応じて自己位相変調 (SPM; Self-Phase Modulation) はスペクトル変化を示すが，提案する光リミッタでは波長の違いによる色分散の影響を避けるため，主に中心付近の強度を利用し，出力信号を生成している．しかし入力信号の強度を強めていった場合の，SPM による中心周波数成分の著しい強度低下により 光リミッタで実現可能なダイナミックレンジが制限されていた．一方で，強度をさらに増加させると中心周波数成分は再び増加傾向を示す．この中心周波数成分の再増加現象を比較的早い段階から利用することが出来れば，中心周波数成分の著しい強度低下を防ぐことが可能となり，ダイナミックレンジの拡大につながると思われる．そこで，SPM による中心周波数成分の再増加現象を引き起こす直接的な要因を探るため，このメカニズムについて調べた．SPM は時間的に周波数が変動する現象であるため，その解析にはスペクトログラムを用いた．光信号のスペクトログラムを観察する手法としては，強度を様々に変化させながらリアルタイムで観察を行うために，提案している光時空間変換に基づいた光スペクトルグラムスコープ [14] を用いた．実験では，自己位相変調 (SPM; Self-Phase Modulation) が比較的得られやすい繰り返し周波数 50MHz，パルス幅 0.7ps のパルスから幅 1nm のバンドパスフィルタにより抜き出した中心波長 1559nm のパルスを用い，高非線形ファイバ通過後の光信号のスペクトログラムを観察した．その結果，自己位相変調 (SPM; Self-Phase Modulation) により別れた二つの周波数成分のうち，長波長成分の後端から中心周波数へ，短波長成分の前端から中心周波数へ，再びエネルギーが移動している様子が確認できる．これは二つの周波数成分それぞれにおける自己位相変調 (SPM; Self-Phase Modulation) によるスペクトル変化であると考えられる．つまり，自己位相変調 (SPM; Self-Phase Modulation) によるスペクトル変化中に見られる中心周波数成分の再増加現象は，パルスがアップチャープを持ったことにより再び中心周波数成分にエネルギーが移動したものと考えられる．

以上の検討により，実験で見られたような，中心周波数へのエネルギーの再移動が起こるきっかけとなると考えられるアップチャープをあらかじめ光パルスに与えておけば，自己位相変調 (SPM; Self-Phase Modulation) 中の中心周波数へのエネルギー移動が促進され，中心周波数成分の著しい強度低下が防げるものと考えられる．光パルスへのアップチャープの付加による光リミッタのダイナミックレンジの拡大効果を確認するため，シミュレーションを行った．図5に入力信号にプリチャープを導入した場合の全光リミッタのシミュレーション結果を示す．プリチャープを入力に付加することにより強度揺らぎ補償範囲を飛躍的に拡大可能であることを確認した．また，このときの出力信号ピーク強度の揺らぎは 0.013dBm 以下の範囲内に抑えられており，入力信号にプリチャープを与えることにより，高精度な強度安定化機能が得られることを確認した．以上の結果より，提案する手法により，理想的な光リミッタの機能である入力の強度に依存せず一定の強度を出力する機能を得ることができた．実験により示された出力強度幅は光パワーメータの測定限界以下に留まり，非常に高精度な強度安定化機能が得られた．

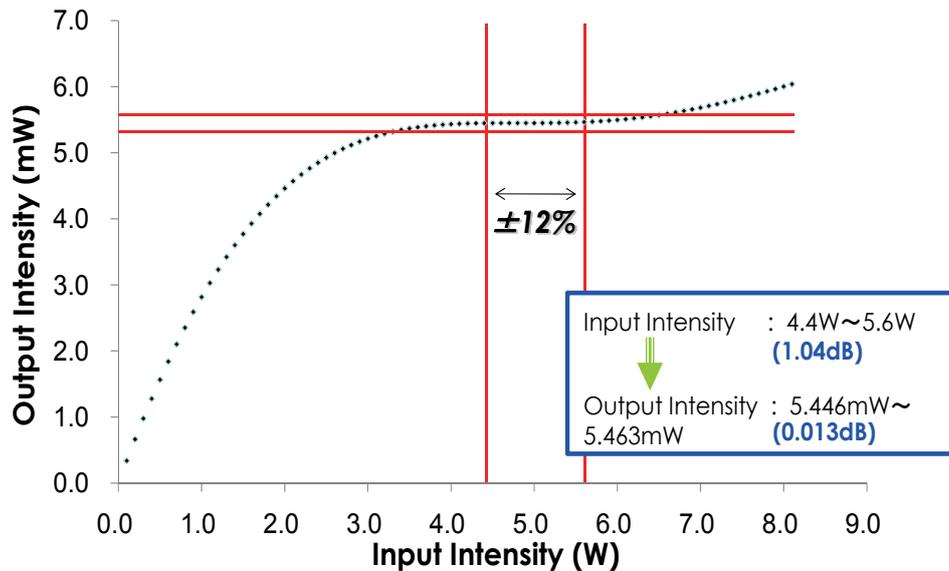


図5 得られた強度安定化特性

3-2 高信頼性獲得への検討の結果

10Gbps におけるビットエラーレートのシミュレーション実験を行った。入力信号として、中心波長 1550nm, パルス幅 1.3ps, 繰り返し 10GHz, ピーク強度 5W を中心に $\pm 12\%$ の強度揺らぎを持つ光信号を用いた。図 4 にシミュレーションで用いたシステムを示す。光リミッタの性能改善を目指した 2-1 における検討結果を踏まえ、本システムでは、入力信号を分散補償ファイバ(DCF) に伝播させることによりアップチャープを付加した。シミュレーションにより得られた光リミッタの入力、出力信号のアイパターンを図 6 に示す。図 6 の結果より、光リミッタによる強度揺らぎの飛躍的な改善を確認した。

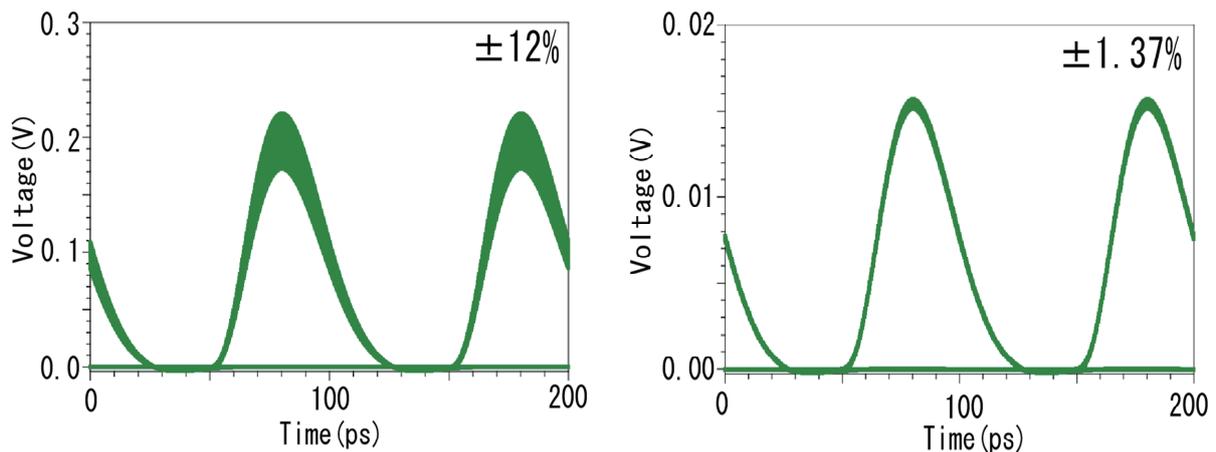


図6 アイパターンによる信号品質評価

4 おわりに

以上の通り、ほぼ当初の目的通りの成果を期間内に達成することができたが、最後に関連する事項について述べてまとめに代える。

非線形ファイバー光学の著書でも知られるロチェスター大学のアグラワール教授が同時期に滞在されたことから、本研究テーマの理論的な部分について非常に深い議論を行う機会を得ることができた。[15] その結果をまとめた論文を現在投稿準備中である。本研究で成功した 10Gbps の光信号に対する強度揺らぎ補償のシミュレーションは、その議論の結果の一部を参考に実施した内容であり、滞在期間中に開催された国際会議にて招待講演を行った。[16-17] また、非線形光学現象の応用に関して光物理的見地から検討をさらに進めるために、光のキャリアエンベロープ位相などの光パルスの本質的なパラメータに着目して非線形光学現象を制御することを目的とした研究に新しい計測手法の開発の立場から加わった。装置の導入の遅れが原因で実際の実験の立ち上げが間に合わなかったが、新しい計測手法の開発について有益な議論を行うことができた。

さらに、滞在期間中に、欧州を含む国際会議での複数の招待講演および欧州の複数の研究機関から招待講演を依頼された。それらを通じた交流を深めることができ、日本では得られない交流の機会を得ることができた。この度の長期滞在の機会を実施するにあたり、ご支援賜った皆様に改めて厚く感謝したい。

【参考文献】

- [1] G. S. He, J. D. Bhawalkar, C. F. Zhao, and P. N. Prasad, "Optical limiting effect in a two-photon absorption dye doped solid matrix," *Appl. Phys. Lett.* 67 2433-2435 (1995).
- [2] G. S. He, L. Yuan, J. D. Bhawalkar, and P. N. Prasad, "Optical limiting, pulse reshaping, and stabilization with a nonlinear absorptive fiber system," *Appl. Opt.* 36 3387-3392 (1997).
- [3] B. Y. Soon, J. W. Haus, M. Scalora, and C. Sibilia, "One-dimensional photonic crystal optical limiter." *Opt. Express* 11 2007-2018 (2003).
- [4] P. V. Mamyshev, "All-Optical Data Regeneration Based on Self-Phase Modulation Effect," *Proc. ECOC 1998, Poland, 1998*, pp. 475-476.
- [5] M. Asobe, A. Hirano, Y. Miyamoto, K. Sato, K. Hagimoto, and Y. Yamabayashi, "2R Optical Regeneration: An All-Optical Solution for BER Improvement," *Electron. Lett.* 34 1135-1136 (1998).
- [6] M. Matsumoto and O. Leclerc, "Analysis of 2R optical regenerator utilizing self-phase modulation in highly nonlinear fibre," *Electron. Lett.* 38 576-577 (2002).
- [7] Ohara, H. Tanaka, S. Kawanishi, T. Yamada, and M. M. Fejer, "160-gb/s all-optical limiter based on spectrally filtered optical solitons," *IEEE Photon. Technol. Lett.* 16 2311-2313 (2004).
- [8] J. H. Lee, T. Nagashima, T. Hasegawa, S. Ohara, N. Sugimoto, Y. G. Han, S. B. Lee, and K. Kikuchi, "Output performance Investigation of Self-Phase-Modulation-Based 2R Regenerator Using Bismuth Oxide Nonlinear Fiber," *IEEE Photon. Technol. Lett.* 18 1296-1298 (2006).
- [9] F. Parmigiani, S. Asimakis, N. Sugimoto, F. Koizumi, P. Petropoulos, and D. J. Richardson, "2R regenerator based on a 2-m-long highly nonlinear bismuth oxide fiber," *Opt. Express* 14, 5038-5044 (2006).
- [10] H. Goto, T. Konishi, and K. Itoh, "Ultrafast All-Optical Intensity Stabilizer Based on Self Phase Modulation-Induced Spectral Pattern Change and Optical Pattern Recognition," *Jpn. J. Appl. Phys.* 47 8834-8837 (2008).
- [11] H. Goto, T. Konishi, and K. Itoh, "Simultaneous amplitude and phase modulation by discrete phase-only filter," *Opt. Lett.* (in press).
- [12] H. Goto, T. Konishi, and K. Itoh, "An all-optical limiter with high-accuracy thresholding based on self-phase modulation assisted by preparatory waveform conversion," *J. Opt. A: Pure and Appl. Opt.* 10, 095306 (4pp), (2008).

- [13] H. Goto, T. Konishi, R. Itoh, T. Enoki, T. Nishitani, and K. Itoh, "Expansion of Dynamic Range of All-Optical Intensity Equalizer Based on Effective Self-Phase Modulation by Using Pre-Chirped Signals", PS 2008, D-03-4, Sapporo, Japan, 2008.
- [14] T. Konishi and Y. Ishioka, "Optical spectrogram scope using time-to-two-dimensional space conversion and interferometric time-of-flight cross correlation," Opt. Rev. 6 507-512 (1999).
- [15] G. P. Agrawal, Self-Phase Modulation: Nonlinear Fiber Optics, Academic Press, San Diego, 4th ed. 2007.
- [16] T. Konishi, H.Goto, T.Kato, and K.Kawanishi "Advanced optical limiting function based on effective understanding of physical phenomena," The 11th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON2009), Tu.B1.1(Azores, Portugal) June 28 - July 2.
- [17] T. Konishi, "Diversity of optical signal processing led by optical signal form conversion," The 8th International Workshop on Information Optics (WIO' 09) 20- 24 July 2009, Paris, France.

〈 発 表 資 料 〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
Simultaneous amplitude and phase modulation by a discrete phase-only filter	Optics Letters	2009年5月
Diversity of optical signal processing led by optical signal form conversion	Journal of Physics: Conference Series	2010年1月
Wavelength- and Time-Selective Reconfigurable Optical Add/Drop Multiplexer (ROADM) using Time-Frequency Domain Processing	EURASIP Journal on Advances in Signal Processing	2010年7月
Advanced optical limiting function based on effective understanding of physical phenomena	The 11th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON2009)	2009年6月
Diversity of optical signal processing led by optical signal form conversion	The 8th International Workshop on Information Optics (WIO' 09)	2009年7月