

# 超高速光A/D変換技術

北山 研一

大阪大学大学院工学研究科  
電気電子情報工学専攻

**概要:** 近年、100Gbps級の長距離光ファイバ通信においては、高分散耐性を実現するためデジタル信号処理による分散補償(EDC)や多値変調方式等の研究開発が活発化している。デジタル信号処理のフロントエンドにはアナログ・デジタル(A/D)変換器が必要となるが、ビットレートの高速化によって速度限界に直面しており、このボトルネックを克服できる超高速光A/D変換への期待が高まっている。本報告では、テラヘルツの高速応答を有する光ファイバ中の非線形光学効果を利用した非線形光ループミラー(NOLM (Nonlinear Optical Loop-Mirror))を用いた超高速全光アナログ・デジタル変換器の研究成果について述べる。

## はじめに

近年、無線通信で用いられてきたデジタル信号処理を用いた信号歪補償技術は、現在急速に普及しつつあり、10Gビット毎秒では最尤推定法を用いた技術も実現されている。100Gbps級の長距離光ファイバ通信においては、高分散耐性を実現するためデジタル信号処理を用いた光通信技術の研究開発が活発化しており、デジタル信号処理のフロントエンドに超高速、広帯域のアナログ・デジタル変換器が必要となっている。しかしながら、既存の電氣的なA/D変換器では、時間ジッタや回路の応答速度の制限により100ギガサンプル毎秒を越える高速動作条件下で5ビット以上とされる所要の分解能を得ることは極めて困難である。そこで、我々はA/D変換のキーとなる非線形光ループミラー(NOLM: Nonlinear Loop-Mirror)を用いた量子化、符号化の手法を2004年に提案し、原理確認のための3ビット、10GS/sの研究結果を主要な国際会議で招待講演を含め数々発表しており、国内外で特許(U.S. Patent No. 7423564など)を取得してきた。

既存の電子デバイスによるA/D変換では、サンプリング時に時間的な揺らぎが発生し正確にアナログ信号の値を読み取れないことや、電子回路の応答速度が動作速度の制限要因となっている。光通信で用いられているモードロックレーザー技術では、タイミングジッタは数十フェムト(10<sup>-15</sup>)秒程度に抑えることが可能であり、動作速度の向上が期待できる。また、非線形光学効果の1つである光ファイバ中の3次の非線形光学効果(光カー効果)の応答速度はフェ

ムト秒(10<sup>-15</sup>)オーダーであるため、非線形光学効果を用いた超高速光信号処理では、数百ギガ~数テラビット(10<sup>12</sup>bps)以上の動作速度を得ることが原理的に可能である。しかしながら、NOLMに用いる光ファイバ分散の精密な制御の困難さや不要な非線形光学効果の発生によって、従来分解能は高々3ビットに止まっていた。このたび、分解能を向上させるためNOLMの改良を行い、5ビットの量子化分解能の実現を可能とする8周期NOLMの成果を得ることが可能となった。なお、本研究成果は2009年3月に米国で開催される世界最大規模の国際会議であるOFC2009 (<http://www.ofcnoec.org/>)の招待講演において発表する予定である。

## 非線形光ループミラーの多周期特性を用いた超高速光A/D変換方法

NOLMの構成を図1上部に、NOLMの伝達関数を図1左下に示す。この全光A/D変換器は標準化されたアナログ信号を複数台の異なる周期の伝達関数を持つNOLMへと入力し、その伝達関数を用いて量子化、符号化を行うことを特徴とする。そして、それぞれのNOLMから出力された信号をしきい値処理することにより、図1右下のような隣接符号間で異なるビット数が1のGray符号の光デジタル信号を出力する。

次に、NOLMの動作原理について説明する。時計回りのプローブパルスはWDMカプラによりコントロールパルスとして入力されるアナログ信号と重畳されて高非線形ファイバ(HNLF)へと入力される。時

計回りのプローブパルスは高非線形ファイバ中でコントロールパルスから相互位相変調(XPM)による位相変調 $f_{cw}$ を受ける。一方、反時計回りのプローブパルスが受ける位相変調 $f_{ccw}$ はコントロールパルスのデューティ比が小さければ無視できる。そして、時計回りと反時計回りのプローブパルスは3dBカプラにより合波され、BPFによりコントロールパルスを取り除く。このときに透過ポートから出力されるプローブパルスの強度は、位相変調の差  $Df = |f_{cw} - f_{ccw}|$  によって変化し、透過率は  $T = (1 - \cos Df) / 2$  となる。位相変調 $f_{cw}$ の大きさは重畳されるコントロールパルスの強度に比例するため、図1左下のように、入力光の強度に依存して周期的に出力が変化する伝達関数が得られ、全光アナログ・デジタル変換に必要な周期特性を得ることができる。

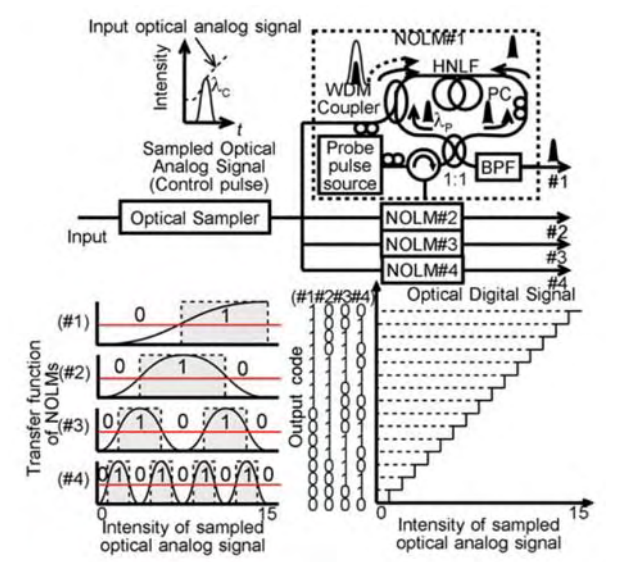


図1 全光A/D変換器の動作原理と構成

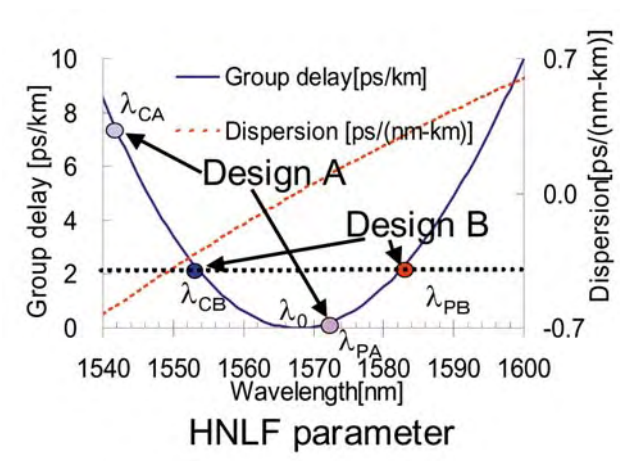


図2 高非線形ファイバの色分散特性と波長配置

## 多周期特性を持つ非線形光ループミラーの設計

N-bitの分解能を得るためには2<sup>N</sup>周期の伝達関数が必要であり、そのため必要な位相シフト量 $f_{cw}$ は2<sup>N-1</sup>にもなる。そのため、4-bitを超える分解能を得るためには自己位相変調によるスペクトルの広がりや、ラマン利得の影響を考慮し、HNLFの分散特性やコントロールパルス、プローブパルスの波長、パルス幅を設定する必要がある。さらに、NOLMへと入力するコントロールパルスとプローブパルスの偏光状態を、プローブパルスの偏光状態と一致させる必要がある。

図2にあるHNLFの色分散特性を示す。まず、コントロールパルスの波長は高い非線形効果を受けるため、正常分散領域に配置する必要がある。そして、位相シフト量 $f_{cw}$ を最大化するためにコントロールパルスとプローブパルスのHNLF内での群遅延の差によって発生するウォークオフの抑制を行う。このHNLFの場合、群遅延量はHNLFの零分散波長から離れるほど大きくなる特性を持っており、コントロールパルスとプローブパルスの波長は異なる必要があるため、Design Aのように異なる群遅延量を持つ波長にコントロールパルスの波長 $\lambda_C$ 、プローブパルスの波長 $\lambda_P$ を設定するとウォークオフが発生するため、Design Bのように群遅延量が同じになるように波長の配置を行う。

次にコントロールパルスの波長 $\lambda_C$ とプローブパルスの波長 $\lambda_P$ の波長間隔を設定する。波長間隔は広すぎるとコントロールパルスのエネルギーによってプローブパルスの振幅が増幅されるラマン増幅効果が大きくなり、伝達関数に悪影響を与える。一方、波長間隔が狭いとコントロールパルスのスペクトルは自己位相変調によって広がり、プローブパルスの波長と重なってしまいNOLM出力ポートにおいてBPFにより取り除くことができなくなり動作しなくなってしまう問題がある。そのため、波長間隔はラマン増幅効果が過剰にならない範囲で可能な限り広くする必要がある。適切な波長間隔を求めめるため、数値シミュレーションを用いて検討を行った。表1にそれぞれの設計におけるコントロールパルス、プローブパルスの波長、パルス幅、NOLM出力部のBPFの半値幅を示す。高非線形ファイバの損失、零分散波長、分散スロープ、ラマン時定数、非線形係数、長さはそれぞれ  $\alpha = 1.0$  dB/km、 $\lambda_0 = 1560$  nm、 $D_s = 0.02$  ps/km<sup>1</sup>nm<sup>-1</sup>、

$T_R = 5$  fs,  $g = 12.0$  W<sup>-1</sup>km<sup>-1</sup>,  $L = 400$  mとした。Designs 1, 2, 3 の波長間隔はそれぞれ 18 nm, 24 nm, and 30 nm, であり、コントロールパルスとプローブパルスのパルス幅  $T_C$ 、 $T_P$  は100-GS/s以上での動作を想定してそれぞれ2ps, 1psとした。図3に数値シミュレーション結果によるNOLMの伝達関数を示す。Design 1 では波長間隔が狭いために3周期半程度でコントロールパルスが出力側に漏れ出し、伝達関数が得られなくなっている。一方Design 3ではラマン増幅効果によりプローブパルスの振幅が大きく変化しており波長間隔が広すぎる。Design 2ではラマン利得もそれほど大きくはなく、4-bitのA/D変換に必要な4周期の伝達関数を得ることができている。よってこの3つのシミュレーション結果の中では波長間隔24 nmが適している。さらに、分解能を高くするためにはDesign 4のように入力パルスの条件を緩和し、 $T_C$ 、 $T_P$ をそれぞれ6 ps, 3 psとすることで、5-bitのA/D変換に必要な8周期の伝達関数を得ることができる。

原理確認実験

シミュレーション結果に基づき、8周期の伝達関数を確認するため実験を行った。図4に実験系を示す。コントロールパルス、プローブパルスの光源として、モードロックファイバーリングレーザー(FRL)によ

り発生させ、3dBカプラにより2分岐した。一方は半値幅0.34 nmの狭帯域光バンドパスフィルタ(BPF)を通過させることでパルス幅を6.8 psとしこれをコントロールパルスとして用いた。もう一方は可変波長光源(TLS)によって発生させた波長1560 nmの連続光と合波し、高非線形ファイバ(HNLF1)に入力することで四光波混合による波長変換により波長1572 nm、パルス幅 2.7 psのパルスを発生させ、これをプローブパルスとして用いた。また、コントロールパルスとプローブパルスの入力タイミングを安定させるために、可変遅延線と入力タイミングのモニタを組み合わせた入力タイミングの安定化装置を用いている。今回用いたNOLMには変更状態を厳密に調整を行うため偏光コントローラ(PC)とポラライザ(POL)を取り付けている。そして、コントロールパルスとプローブパルスをNOLMに入力し、コントロールパルスの強度を可変光アッテネータ(VOA)を用いて変化させ、光パワーメータを用いて伝達関数の測定を行った。5図に実験結果を示す。我々は、8周期の伝達関数を測定することに成功した。しかし、測定した伝達関数は振幅が大きく変動しており、このままではA/D変換に用いることができない。この変動の原因は高非線形ファイバ中の複屈折により、コントロールパルスとプローブパルスの偏光状態が完全には一致しないために、非線形偏波回転が発生

	Control pulse		Probe pulse		BPF
	$\lambda_C$ [nm]	$T_C$ [ps]	$\lambda_P$ [nm]	$T_P$ [ps]	
Design 1	1551	2.0	1569	1.0	3.0
Design 2	1548	2.0	1572	1.0	3.0
Design 3	1545	2.0	1575	1.0	3.0
Design 4	1548	6.0	1572	3.0	1.0

表1 各設計におけるパラメータ

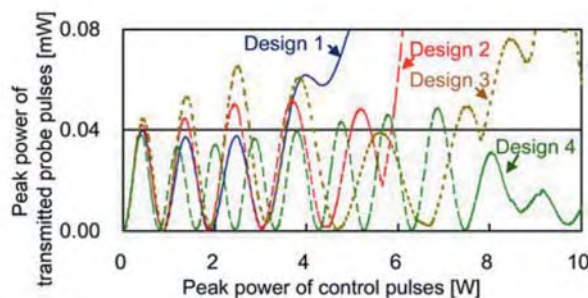


図3 数値シミュレーション結果

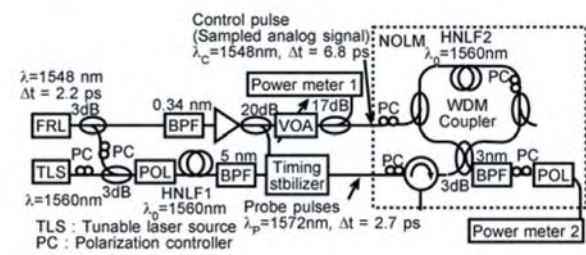


図4 多周期伝達関数測定実験系

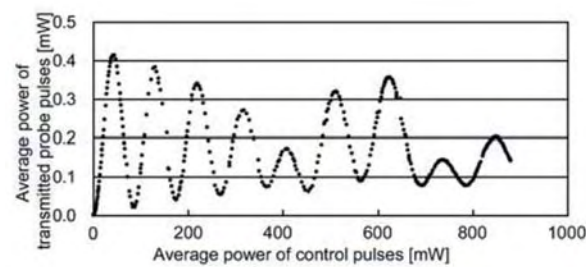


図5 実験結果

していることが考えられ、偏光状態を安定化させることにより伝達関数の改善が期待できる。

最後に

我々は、非線形光ループミラーの多周期特性を用いた超高速光A/D変換方法の提案を行い、5-bitのA/D変換を行うために必要な8周期の伝達関数を実験的に観測した。この多周期NOLMは世界初であり、超高速光通信におけるデジタル信号処理のフロントエンドの要求条件を満たすためマイルストーンとなる数字である。今後、100Gbps級の光ファイバ通信のデジタル信号処理への導入が期待される。

成果目録

<Journal>

[1] Yuji Miyoshi, Kensuke Ikeda, Hideaki Tobioka, Takashi Inoue, Shu Namiki and Ken-ichi Kitayama, "All-Optical Analog-to-Digital Conversion Using Split-and-Delay Technique," IEEE/OSA J. Lightwave Technology, vol. 25, no. 6, pp. 1339-1347, June 2007.

[2] Yuji Miyoshi, Kensuke Ikeda, Hideaki Tobioka, Takashi Inoue, Shu Namiki, and Ken-ichi Kitayama, "Ultrafast all-optical logic gate using a nonlinear optical loop mirror based multi-periodic transfer function," Optics Express, vol. 16, Issue. 4, pp. 2570-2577, Feb. 2008.

<International Conference>

[1] Yuji Miyoshi, Hideaki Tobioka, Takashi Inoue, Shu Namiki and Ken-ichi Kitayama, "Multi-period NOLM design for ultrafast all-optical A/D conversion," in proc. The 33rd European Conference on Optical Communications (ECOC2007), Tu 5.3.3, Berlin, Germany, Sept. 2007.

[2] Yuji Miyoshi, Kensuke Ikeda, Hideaki Tobioka, Takashi Inoue, Shu Namiki and Ken-ichi Kitayama, "Photonic A/D conversion using NOLM," (invited) workshop on IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS2007), WMK, Honolulu, Hawaii, June 2007.

[3] Yuji Miyoshi, Seiki Takagi, Hiroshi Nagaeda, Shu Namiki and Ken-ichi Kitayama, "Ultrafast all-optical A/D conversion using NOLMs with multi-period transfer functions," (invited) IEEE/LEOS Winter Topical Meeting Series, TuC1.2, Innsbruck, Austria, Jan. 2009.

<国内学会>

[1] 1. 三好 悠司, 高木 世紀, 長枝 浩, 並木 周, 北山 研一, "超高速光波形リアルタイム観測のための全光A/D変換用多周期非線形光ループミラー," 電子情報通信学会 フォトニックネットワーク研究会(PN)、沖縄、2008年3月。