

光の“超高速”を機能化する時空間フォトニクス ～アナログ-デジタル変換のフロントエンドの光化～



技術解説

小西 毅*

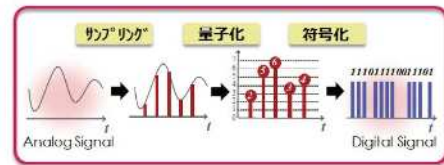
Ultrafast Optics Functionalization in Front-end Analog-to-Digital Conversion

Key Words : Optical Signal Processing, Ultrafast Optics,
Photonic Analog to Digital Conversion

はじめに

モノのインターネット (IoT : Internet of Things) により全ての“モノ”がネットワークに繋がれる時代に、用途による仕様の差こそあれ、実世界に存在する連続的なアナログ信号をデジタルの世界に繋ぐためのアナログ-デジタル変換 (A/D 変換 : Analog-to-Digital 変換) の重要性がますます重要となってきた。第5世代移動通信システム (5G) や自動運転をはじめとした多様な可能性を実現するために、この“モノ”からネットワークにそそぎこまれる膨大なデータは、様々な情報通信技術 (ICT : Information and Communication Technology) に対しても材料、デバイスからシステムに至るまで急激な変革と展開を促しており、水道などのライフラインと同じような感覚で既にインフラとして十分な伝送容量を確保して完成されたと受けとめられがちな光通信技術も例外ではない¹⁾。

例えば、ネットワークのバックボーンを支える光通信技術の超高速信号処理の中でも超高速アナログ光信号である伝送信号の伝送歪をデジタル技術を用いて補償する信号再生技術はその根幹技術であり、超高速アナログ光伝送信号をデジタル信号に超高速に変換する図1に示すような A/D 変換処理がフロントエンドとしてその成否の鍵を握る²⁻⁴⁾。400 ギガビット級の光伝送技術の研究成果においても高性能



アナログ-デジタル変換

図1 アナログ-デジタル変換の概念図

な電氣的 A/D 変換を用いた目覚ましい成果があげられているが⁵⁾、これらの応用分野における更なる大容量化、高速化は、A/D 変換への負荷を増大させ、フロントエンドとしての A/D 変換の処理が様々な観点でボトルネックとなることが懸念されてきている。そこで、このようなボトルネックを解決するための切り札として注目されているのが、やはりフォトニクス技術である。

近年、筆者らは光の超高速領域で顕れる“Time-Space Duality”⁶⁾ と呼ばれる特徴に基づいた信号処理に関するフォトニクス技術の一つの形を確立し、その具体的な適用課題として A/D 変換の光化による高性能化への展開を目指している⁶⁻⁹⁾。

本稿においては、まず“Time-Space Duality”について概説し、A/D 変換の光化の現状を踏まえて、筆者らのグループの取り組みを紹介する。

Time-Space Duality とは？

光ファイバ中を伝搬するような時間領域の光の振舞いは、一般に非線形シュレーディンガー方程式に従う。式 (1) に緩やかに包絡線が変化するような光波に対する非線形シュレーディンガー方程式を示す。



* Tsuyoshi KONISHI

1968年12月生まれ
大阪大学・大学院工学研究科・応用物理学専攻・博士課程了 (1995年)
現在、大阪大学 大学院工学研究科 生命先端工学専攻 准教授 博士(工学)
光信号処理
TEL : 06-6879-7931
FAX : 06-6879-4582
E-mail : konishi@ap.eng.osaka-u.ac.jp

$$\frac{\partial^2 A}{\partial \tau^2} + j \frac{4\pi}{D_v} \frac{\partial A}{\partial z} + q|A|^2 A = 0 \quad (1)$$

ここで、 D_v と q はそれぞれ、分散パラメータと非線形項の係数である。一方、回折を起こしながら伝搬するような空間領域の光の振舞いは、一般にヘルムホルツ方程式に従う。式(2)に近軸近似が可能な光波に対するヘルムホルツ方程式を示す。

$$\nabla_r^2 A - j \frac{4\pi}{\lambda} \frac{\partial A}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

(1)、(2)式を比較すると、この時間と空間領域の光の振舞いを表す両式の形には非線形項を除くと共通性があり、この共通性は、“Time-Space Duality”と呼ばれている。特に、広帯域性を持つ光パルスでは、波長情報を媒介役にして分散素子を用いて波長分散と角度分散を置き換えることで、時間の現象と空間の現象を目的に応じて疑似的に相互に置き換えて扱うことのできる“時空間フォトニクス”とも呼べるフォトニクス技術の一つの形を構築することができる。図1に示すようなA/D変換の光化において、時間領域のフォトニクスは、サンプリングや量子化のような高速な非線形信号処理を、空間領域のフォトニクスは符号化のような並列の線形信号処理を得意とし、利用可能なデバイスやシステム、求められる機能に応じて、使う領域を自由に選択することが可能となる。次に“時空間フォトニクス”の具体的な適用課題としてA/D変換の光化による高性能化への取り組みについて紹介する。

A/D変換の高性能化の課題と光化

図1に示すようにアナログ信号は、まず時間的にサンプリングされる。この時点で、サンプリング定理に基づいて信号の品質が決定され、一般にサンプリングレートの半分の帯域までの信号しか取得することができない。超高速信号処理に対応するために、単位時間当りにさらに多くの情報を扱うことが必要になってくるのに伴い、A/D変換におけるサンプリングレートの更なる高周波化が求められている。しかし、回路中の熱雑音などが原因で発生するサンプリング信号の時間的ずれである電気的な時間ジッタ

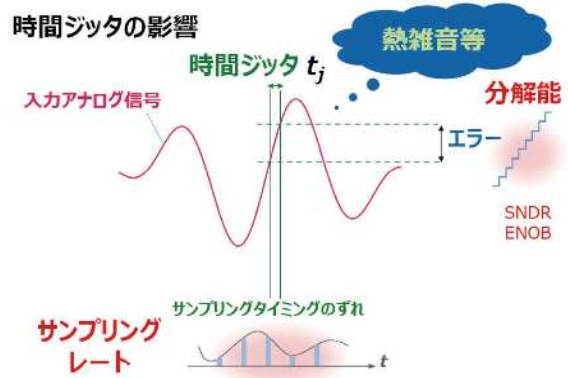


図2 アナログ-デジタル変換と時間ジッタ

タによって、A/D変換におけるサンプリングレートの高周波化は制限されている。

図2にサンプリング時の時間ジッタの影響の説明図を示す。図2に示すように、時間ジッタは、サンプリングレートだけでなく、分解能にも影響する。雑音の中でも、特に、サンプルホールド時の kT/C 雑音と呼ばれる雑音が重要となる。ここで、 k 、 T 、 C はそれぞれボルツマン定数、回路の温度、回路の容量である。処理の高速化に伴う集積回路の膨大な発熱量が温度 T を上げて雑音を増大させるだけでなく、高速化を目的として回路の容量 C を減らすことは逆に雑音を増大させてしまうという課題がある。図3は、これまでに報告されている主な電気的なA/D変換の性能を有効分解能(ENOB: Effective Number of Bit)とサンプリングレートの関係を示したものである²⁾。図3から、サンプリングレートの高周波化とA/D変換の高分解能化はトレードオフの関係にあり、時間ジッタ特性がA/D変換の性能向上に大きく影響を及ぼしており、電気的な時間

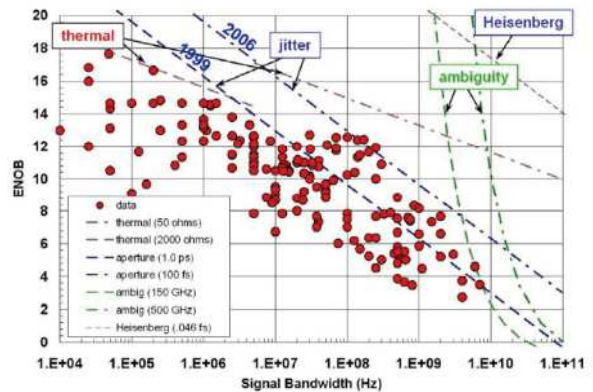


図3 A/D変換の高性能化の現状 (出典: G. C. Valley, Opt. Express, 15, 1955, 2006.)

ジッタの量としては、100 fs が下限となっている。一方、最近のモードロックレーザー技術や光周波数コム技術を用いると、100 fs をはるかに下回る非常に低い時間ジッタ特性が実現可能であり、光パルスを用いた A/D 変換の光化の研究が精力的に行われている。特に、光サンプリング部分の時間ジッタ性能については、100 fs をはるかに下回る時間ジッタ性能での実験例が報告されてきている¹¹⁾。このような理由から、サンプリング、量子化、符号化の各処理の中でも高サンプリングレート化を目指したサンプリング部分の光化の研究が先行しており、光サンプリングオシロスコープ等への技術導入が既に進められてきている。

A/D 変換の光化の取り組み

図4はA/D変換の光化の取り組みの状況を示しており、青と緑で光化された部分とされていない部分を区別している。取り組みの形としては、1) サンプリングのみ光化する光サンプリング特化型と2) サンプリングからインターリーブまでを光化し量子化以降の処理を電気で行う光アシスト型、3) サンプリングから量子化さらに符号化まで光化する光ドミナント型の三つに大きく分けることができる。

量子化以降の処理について、まず比較的狭帯域な電氣的な A/D 変換器の並列化を前提としたものが検討されている。高いサンプリングレートのサンプリング信号を後段の並列化された比較的狭帯域な電氣的な A/D 変換器群と接続するためには、サンプリング信号の帯域を個別の電氣的な ADC の帯域と整合するための広帯域なインターリーブ技術が必要となり、光インターリーブ技術の研究開発における大きな動機となっている。また、高サンプリングレート化に伴い、前述の時間ジッタの問題に加えて消

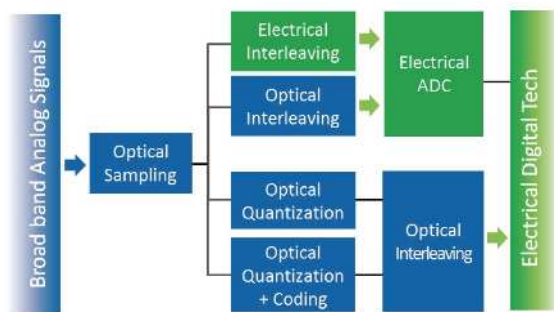


図4 A/D変換の光化の取り組み

費電力の課題も顕在化してきている。単独の電氣的な A/D 変換の帯域が GHz の領域に入ると一変換当りに必要となる消費電力が指数関数的に増大することから、GHz の領域までが単独の電氣的な A/D 変換器で実現できるリーズナブルな分岐点の一つの判断の目安とされている¹²⁾。したがって、GHz の領域を超えるサンプリングレートに対応する場合は、比較的狭帯域な電氣的な A/D 変換器の並列化によるアプローチが取り入れられる傾向にある。このため、広帯域なアナログ信号の帯域を個別の電氣的な A/D 変換器利用の目安となる帯域と整合するためにフロントエンドに単独で広帯域なインターリーブが可能な光インターリーブ技術が必要となり、A/D 変換器の消費電力のこれまでの指数関数的な増加特性を線形化することが可能となる。このように、帯域整合に加えて低消費電力化における課題も光化における大きな一つの動機となっている。

筆者らの取り組みの紹介

次に時空間フォトニクスを駆使した A/D 変換の光化について、光サンプリングだけでなく、光量子化や光符号化の一括処理の研究開発状況も含めた筆者らのグループの取り組みを中心に紹介する^{6,9)}。

100GHz のサンプリングレートを持つ A/D 変換器を考えると、消費電力、分解能、サンプリングレートの課題を念頭に単純に考えると、1GHz 程度のサンプリングレートを持つ電気 A/D 変換器が 100 個程度必要となる。このことは新たな消費電力に関する問題の発生につながる事が懸念される。更なるサンプリングレートの高速化において消費電力を増大させる要因となる並列化のアプローチを避けるためには、処理の一括化による低消費電力化が見込まれる光量子化への期待につながる。

A/D 変換システム全体に対する光化の現状としては、電子工学的なアプローチの限界となる 100 fs のジッタ以下の 10G-Samples/s、3-bit A/D 変換のための光サンプリング、光量子化、光符号化の一連の動作確認実験に成功している¹²⁾。図5(a)に筆者らの提案する A/D 変換の光化実験システムの具体的な構成事例を示す。この構成では、パルス整形器としての機能も併せ持つ波長選択スイッチ (Wavelength Selective Switch:WSS) が、時間の現象と空間の現象の相互置き換えの役割を果たしてい

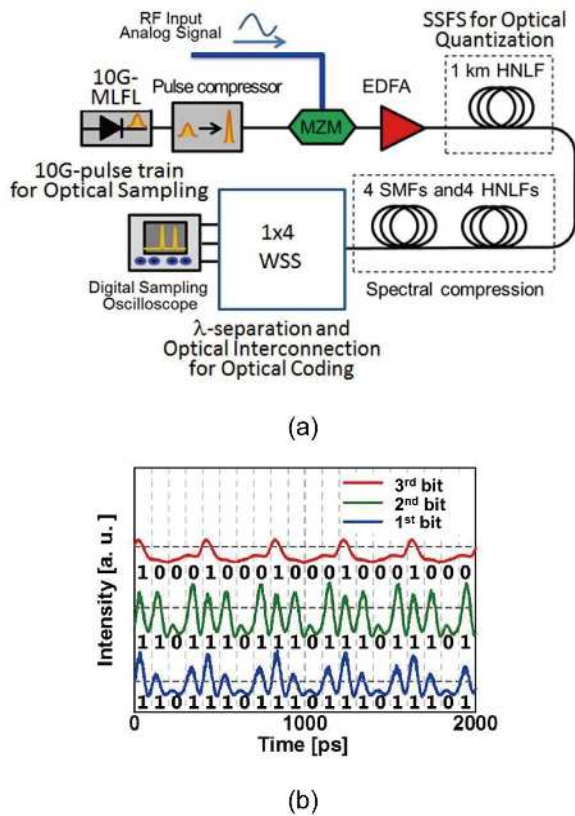


図5 100fsのジッタ以下の10G-Samples/s, 3-bit 光ADC実験；(a) 実験システムの構成 (b) 光サンプリング、光量子化、光符号化後のビットパラレル出力のモニタリング結果¹²⁾

る。まず、Mach-Zender 変調器を介して入力された 2.5 GHz の正弦波アナログ信号のアナログ値を 10GHz のパルス列に重畳し光サンプリングを実現している。光量子化では、時空間フォトニクスを駆使して時間の現象と空間の現象の相互置き換えをすることを念頭に、まず時間領域で高速な非線形信号処理としてソリトン自己周波数シフト (Soliton Self Frequency Shift: SSFS) という光ファイバ内での非線形光学現象を用いることで、各光サンプリングパルスのピークパワーに応じて SSFS 後の中心波長が変化し、強度の情報が媒介役の波長情報に超高速に変換する。強度—波長変換後の各強度レベル値の信号は、アレイ導波路格子 (Arrayed-Waveguide Grating: AWG) 等の波長分波デバイスを用いて波長情報を空間情報に置き換えることにより容易に空間領域での分別 (量子化) が可能となる。量子化については、これまでに、発表当時の世界のトップレベルとなる 6 ビットの光量子化まで実現している^{8,9)}。光符号化では、各信号の強度レベル値に応じて異なる

空間ポートに出力されてきた信号を並列の線形信号処理である光インタコネクション技術を用いてビットパラレルにデジタル信号化する。また、空間領域での波長フィルタリングに基づくパルス整形技術を用いて、各信号に対して異なるフィルタ処理を施すことにより、任意のシリアルデジタル光信号の出力も可能である。ここでは、WSSにおいて異なるポートからビットパラレル信号が出力されるように波長フィルタを設計して光インタコネクションを実現している。

図 5 (b) は、光サンプリング、光量子化、光符号化を経て WSS の異なるポートから出力された各ビットパラレルデジタル信号のモニタリング結果である。図 5 (b) の結果から、2.5 GHz の正弦波アナログ信号に対応したビットパラレルデジタル信号が周期的に出力されている様子が分かる。さらに、最近、サンプリングレートの高周波のアップグレードにより、40G-Samples/s、4-bit A/D 変換の光化まで実験的に成功してきている¹³⁾。

おわりに

現在のエレクトロニクスの飛躍的な進展の裏で時間ジッタに代表される電子工学的な限界も現実的になってきていることから、これまでアカデミックな場での利用が中心であった “Time-Space Duality” と呼ばれる光の超高速領域で顕れる特徴に基づいたフォトニクスの活躍の場がより実用的かつ明確になってきていることを強調したい。そのような場の代表的な事例として取り組んでいる超高性能の A/D 変換の光化において、時間と空間の両領域のフォトニクスがそれぞれ得意とする処理を A/D 変換に求められる各機能に適切に導入し、光の量子的な技術も使いつつ最先端の電子工学的なシステムとの協調・融合を進めている。これらの協調・融合には集積化も重要となり、総務省の戦略的国際連携型研究開発推進事業におけるプロジェクト (STARBOARD) の支援を受けて、図 5 のシステムを平面光回路 (Planar Lightwave Circuit: PLC) を用いて集積化する試みも進めてきている。さらに、チップ上へのエレクトロニクスとの集積化の観点からもその活用が期待されるシリコンフォトニクスの技術の導入にも取り組み始めている。

参考文献

- 1) A. D. Ellis, et al., Journal of Lightwave Technology, 28, 4, pp. 423-433, 2010.
- 2) G. C. Valley, Opt. Exp., 15, 5, pp. 1955-1982, 2007.
- 3) B. L. Shoop, Photonic Analog-to-digital Conversion, (Springer, New York, 2000)
- 4) C. Laperle, OFC/NFOEC 2013, OTh1F, (Anaheim, USA, 2013).
- 5) NTT 技術ジャーナル, 2, pp. 71-72, 2013.
- 6) T. Konishi, Lasers, Optics and Electro-Optics Research Trends, Ch.1 (Nova Science Pub Inc, New York, 2007).
- 7) T. Konishi, et al., JOSA B, 19, pp. 2817-2823, 2002.
- 8) T. Konishi, ECOC2015, We.1.6.2, (Invited paper, Valencia, Spain, 2015).
- 9) 小西 毅, 電子情報通信学会誌, Vol.99 No.10 pp. 992-998, 2016.
- 10) A. Khilo, et al., Opt. Exp., 20, 4, pp. 4454-4469, 2012.
- 11) S. Rajagopal, IEEE Communications Magazine, 52, 11, pp.40-45, 2014.
- 12) M. Hasegawa, et al., IEEE Photonics Journal, 7, 3, pp. 1-7, 2015.
- 13) T. Nagashima, et al., IEEE Photonics Technology Letters, 29, 1, pp. 74-77, 2017.

