

令和 4 年 5 月 25 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(A)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19H00766

研究課題名（和文）電子工学的時間ジッタ限界領域光サンプリングのショット雑音レベル信号高品質化

研究課題名（英文）High Quality Optical Sampling in the Electrical Timing jitter Limit Region

研究代表者

小西 毅（KONISHI, Tsuyoshi）

大阪大学・工学研究科・准教授

研究者番号：90283720

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 35,000,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、電気的な時間ジッタの抑制限界を超えたサブピコ秒以下の時間ジッタでの光サンプリングにおける信号品質の高性能化を目指して、ソリトンスクイーミングのアプローチによる強度ジッタ抑制の効果の検討を試みた。ソリトンスクイーミングのアプローチにおける強度調整を行った際に、光子雑音が通常増加する条件において、ショット雑音以下にはならなかったが強度ジッタの大幅な抑制が確認された。その条件でビット誤り率測定を行った品質評価においても誤り率の低減効果が確認された。また、本手法の集積化を念頭に置いたシリコン導波路による検討も進め、基礎的な効果を確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

Beyond 5G の研究開発の促進が求められるなど高い周波数領域の活用とともに超広帯域アプリケーションが急速に普及している。このような背景のもと、高いサンプリングレートを持つ高性能なアナログ・デジタル変換器のさらなる性能向上が求められている。本研究の成果は、扱われる信号の更なる大容量化、広帯域化に伴い顕在化する電子工学的なアプローチによる時間ジッタの理論限界の課題に対して、強度ジッタの抑制による補完が可能であることを示した学術的意義と、信号のデジタル化のフロントエンドにおけるサンプリングの電子技術によらない高品質化における一つの方向性を示したという社会的意義を持つ。

研究成果の概要（英文）：In this study, we attempted to investigate the effect of intensity jitter suppression by a soliton squeezing approach to achieve high quality optical sampling in the electrical timing jitter limit region. When the intensity in the soliton squeezing approach was adjusted, a significant suppression of intensity jitter was observed under conditions where photon noise usually increases, although it did not fall below the shot noise. The improvement of the bit error rate performance was confirmed in the quality evaluation under the same conditions. In addition, we have also studied integration of this method using silicon waveguides and confirmed the basic effect.

研究分野：光信号処理

キーワード：超高速信号処理 アナログ/デジタル変換 光信号処理 光サンプリング

1. 研究開始当初の背景

最先端の衛星通信や光通信をはじめとする広帯域・高周波領域の信号処理・通信を必要とする分野においては、実世界のアナログ信号をデジタル技術で取り扱うことのできるデジタル信号に変換するアナログ - デジタル変換システムが最もフロントエンドにある根幹技術であり、その高性能化が急務である。以下に示す(1)および(2)の具体的な背景を示す。

- (1) サンプリングレートの広帯域化には、その性能向上に時間ジッタ特性が大きく影響する。アナログ - デジタル変換の各処理の“光化”によるアシスト技術は、電子工学的なアプローチの時間ジッタに関するサブピコ秒の限界を超えるものとして期待されてきている [1-9]。応募者は、図 1 の各処理の“光化”の手法を提案しており[4,5]、現在、サブピコ秒以下の時間ジッタでの“光化” [8]や、40 GS/s 3.8 bit の性能での高速連続動作を達成しており、国内・国外におけるアナログ - デジタル変換の“光化”の研究をリードしてきている[4,10]。
- (2) アナログ - デジタル変換の性能には、図 1 に示すように時間ジッタとともに強度ジッタも大きく影響する。しかし、これまでは、電気的な時間ジッタの影響が非常に顕著であったために、アナログ - デジタル変換の各処理の“光化”によるアシスト技術は、時間ジッタに関する性能改善追求にその学術的研究が集中しており、電子工学的なアプローチの限界を超えた領域における強度ジッタに関する対応はほとんどなされてこなかったという背景があった。

2. 研究の目的

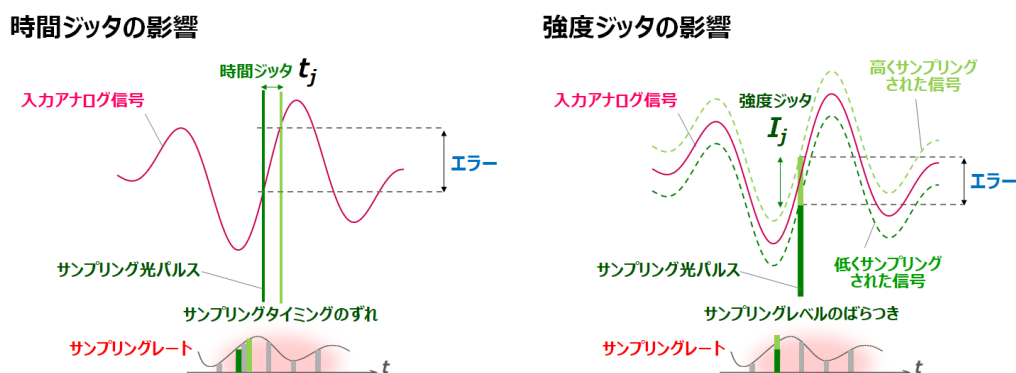


図 1 アナログ - デジタル変換 (サンプルング) の信号品質への各ジッタの影響

本研究の“目的”は、電子工学的なアプローチの時間ジッタに関するサブピコ秒の限界を超えた「未踏の領域」におけるアナログ - デジタル変換システムの“光化”による性能向上の方向性とそのアプローチの開拓である。特に、アナログ - デジタル変換の性能指標となる信号対雑音比に着目し、その性能指標値向上における図 1 に示す強度ジッタの重要性に着目した以下の二つの内容を具体的な目的とする。

- (1) 電子工学的時間ジッタ限界領域での性能向上の方向性の開拓
アナログ - デジタル変換システムの性能向上のために、“光化”オリエントドな領域となる電子工学的時間ジッタ限界領域における研究の方向性を明らかにすることを具体的な目的とする。
- (2) 電子工学的時間ジッタ限界領域での性能向上のアプローチの開拓
サンプリング処理を例として、“光化”が消費電力をはじめ様々な電子工学的限界の解決アプローチの一つとしてその有用性を示しつつあるが、本研究では、量子光学的光ソリトンスクイージングのアプローチをその具体的な例として取り上げ検討することを目的とする。

3. 研究の方法

本研究課題では、電子工学的時間ジッタ限界における信号高品質化を目的として、次の 4 つの研究項目について検討を行った。以下に具体的な方法について述べる。

- (1) 信号評価システム構築

時間ジッタおよび強度ジッタに関する位相および振幅雑音を同時に測定可能なコンステレーション表示による光サンプリング信号のスケーリングに関する詳細な状態解析を行うため、光サンプリング信号のコヒーレント受信が可能な信号評価システムを構築することを試みた。

(2) 安定な光ソリトン発生系構築

従来の時間ジッタおよび強度ジッタの評価を個別評価に加え、コンステレーション表示が可能な信号評価システムにより光ソリトン発生系の詳細な状態解析と調整を行い、ショット雑音以下のスケーリング効果を追求するための安定な光ソリトン発生系の実現を目指した。

(3) シリコン細線導波路による更なる安定化可能性の検討

構築した安定な光ソリトン発生系について、長尺な光ファイバ系における環境外乱の影響を考慮した更なる低雑音化のため、非常に高い非線形光学特性を持つことが報告されており、将来的な展開においても集積化は重要な要素となるシリコン細線導波路の試作も並行して行った。

(4) 光サンプリング処理系の検討

光サンプリング系についての最終的な品質評価を目的として、疑似位相整合型非線形光学結晶 (PPLN) [11]を用いた光サンプリング処理系の構築を試みた。

4. 研究成果

本研究課題では、電子工学的時間ジッタ限界における信号高品質化を目的として、検討を行った4つの研究項目についての研究成果について、以下に具体的に述べる。

(1) 信号評価システム構築

光サンプリング信号のスケーリングに関する詳細な状態解析を行うために、コヒーレント受信が可能な信号評価システムを光変調アナライザ (OMA, Tektronix 社製: OM4245) により信号評価システムを構築した。ソリトン自己周波数シフト後の周波数成分に対して、信号の振幅位相状態の測定結果を図2に示す。ショット雑音以下にはならなかったが強度ジッタの大幅な抑制が確認された。図2(c), (f), (i)の結果から、いずれの波長のコンステレーションにおいても振幅方向のゆらぎと比較して位相方向のゆらぎが大きくなっており、ソリトンスケーリングの効果が反映されているものと考えられ、光サンプリング信号のスケーリングに関する詳細な状態解析のための一定の指標となることが確認された。また、光変調アナライザ中の局部発振光の線幅が0.8 fm (100 kHz) と非常に狭いことから、ソリトンパルス全体の状態を反映した状態の測定のために新しい計測方法を試みた [12]。

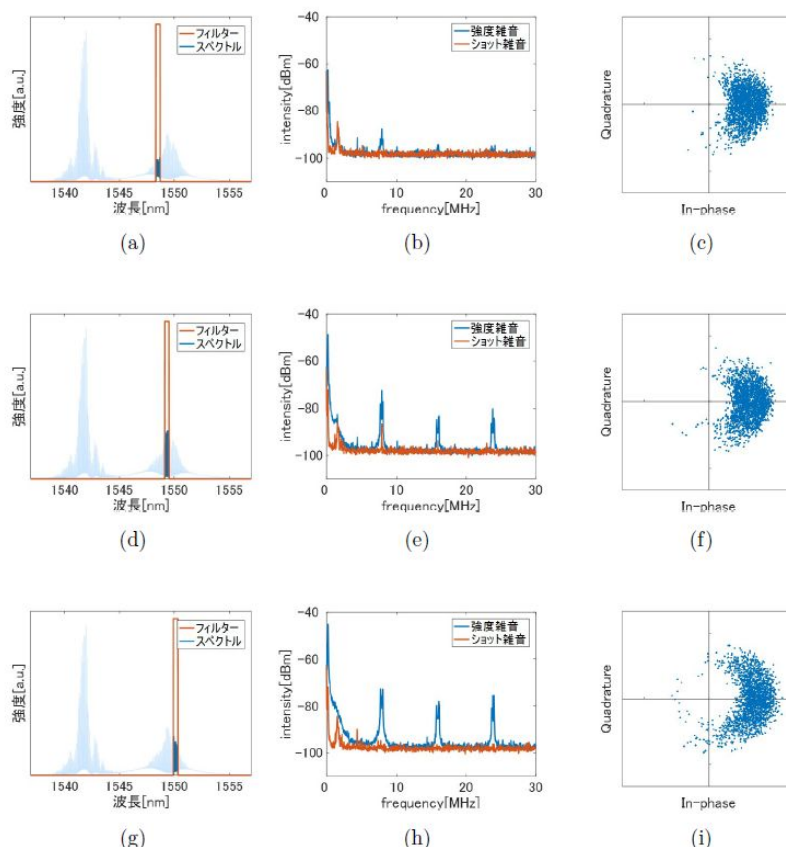


図2 各スペクトル成分の雑音とコンステレーションの測定結果: (a), (d), (g)各抽出スペクトル成分, (b), (e), (h)各雑音状態, (c), (f), (i)各コンステレーション。

(2) 安定な光ソリトン発生系構築

ソリトン自己周波数シフト成分に対して、波長可変フィルタ (santec 社製: OTF-350) を用いてソリトンスクイーミングのアプローチと同様にスペクトルフィルタリングを行った。図 3 にフィルタリングの幅を広くしていくことにより相対強度を上げたときの相対強度とショット雑音を基準とした強度雑音の大きさの測定結果を示す。相対強度を上げていくと、相対強度 7.44 dB のときの方が雑音は大きく減少していることからソリトンスクイーミングと同様のアプローチにより、高い雑音抑制効果による更なる安定化が期待できることを確認できた [13, 14, 15]。一般に、コヒーレント状態で光強度に対応する光子数はゆらいであり、そのばらつき具合(雑音)は、平均光子数に比例することが知られている。このために平均光子数に対応した相対強度を上げていくと、通常のコヒーレント状態であれば相対雑音が単調増加の傾向を示すと考えられる。

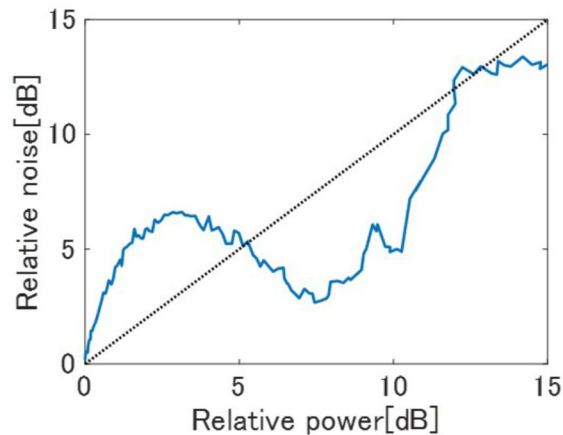


図 3 フィルタリング後の信号の相対強度と雑音の関係。

方で、スクイーミング状態であれば、単調増加の傾向から雑音が減少するなどの効果が得られることが期待される。図 3 において、相対強度を上げていくと、相対強度 7.44 dB のときの方が雑音は大きく減少していることから量子雑音抑制の効果を示唆するものと判断した。また、その条件でビット誤り率測定を行った品質評価においても誤り率の低減効果が確認された。

(3) シリコン細線導波路による更なる安定化可能性の検討

構築した安定な光ソリトン発生系について、長尺な光ファイバ系における環境外乱の影響を考慮した更なる低雑音化のため、非常に高い非線形光学特性を持つことが報告されており、将来的な展開においても集積化は重要な要素となるシリコン細線導波路の試作も並行して行った。幅

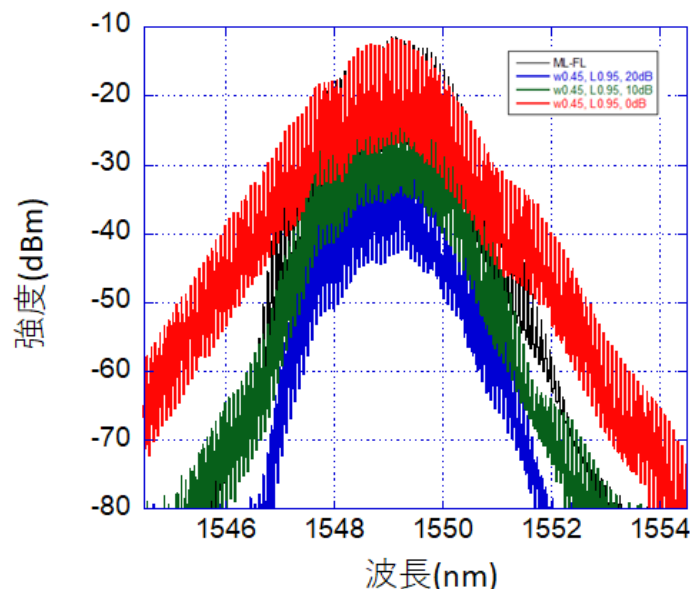


図 4 試作したシリコン細線導波路による非線形スペクトル変化の確認。

0.45 μm , 厚さ 0.21 μm , 長さ 0.95cm のシリコン細線導波路を用いて得られた非線形光学効果の結果を図 4 に示す. 安定した非線形光学効果の発生の確認に成功し, ソリトンスクイーミングの発生のための構造最適化を今後の課題とした.

(4) 光サンプリング処理系の検討

光サンプリング処理系として実績のある疑似位相整合型非線形光学結晶 (PPLN) [13] を用いた光サンプリング処理を試みた結果を図 5 に示す. 図 5(a) は入力したサンプリング光と信号光のスペクトルであり, 図 5(b) は第二次高調波 (780nm 帯) として得られたサンプリングされた信号光の出力時間波形である. 原理確認として比較的low繰り返し率の光源を用いた予備実験を行い, 光サンプリングが可能であることを確認した. しかし, 疑似位相整合型非線形光学結晶の波長選択性の高さから高繰り返し率の光源での使用については, 課題が残った.

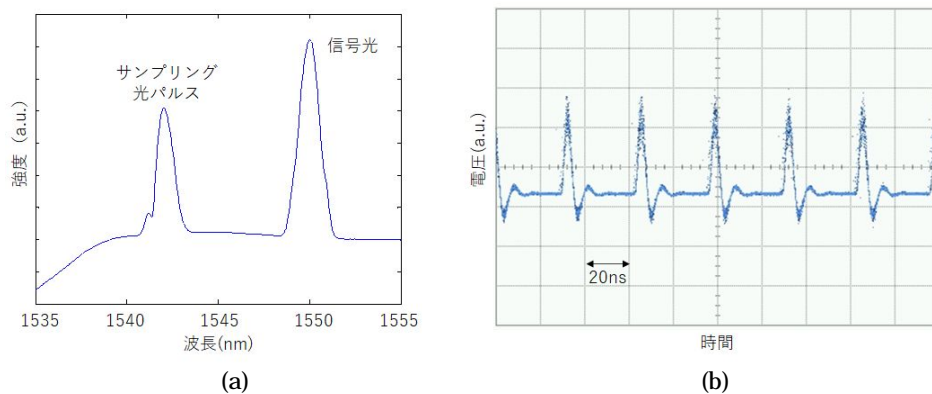


図 5 疑似位相整合型非線形光学結晶 (PPLN) を用いた光サンプリング処理: (a) サンプリング光と信号光のスペクトル, (b) 第二次高調波 (780nm 帯) として得られたサンプリングされた信号光の出力時間波形.

< 引用文献 >

- B. L. Shoop, Photonic Analog-to-digital Conversion, Springer, New York, 2000.
- G. C. Valley, Opt. Exp., 15, 5, pp. 1955-1982, 2007.
- C. Laperle, OFC/NFOEC ' 13, OTh1F, 2013.
- 小西 毅, 電子情報通信学会誌 (解説記事), 99(10), 992-998, 2016.
- T. Konishi, et al., JOSA B, 19, pp.2817-2823, 2002.
- S. Oda, et al., IEEE PTL, 16, pp.587-589, 2004.
- A. Khilo et al., Opt. Exp., 20, 4, pp. 4454-4469, 2012.
- M. Hasegawa, et al., IEEE Phot. Journal 7, 3, pp.1-7, 2015.
- T. Nagashima, et al., IEEE PTL, 29, 1, pp. 74-77, 2017.
- 小西毅, 電子情報通信学会 2018 年ソサイエティ大会(シンポジウム招待講演) BI-2-4, 2018.
- S. Nogiwa, et al., IEICE Trans. Electron., vol.E85-C, pp.156-164, 2002
- S. Shimizu, R. Kamikawa, Y. Kaihori, Y. Ymasaki, and T. Konishi, IEICE Electronics Express, 17-20200383(2020).
- T. Konishi, et al., 2020 IEEE Photonics Society Summer Topicals Meeting Series (SUM2020), WB1.1 (Invited, 2020).
- 小西 毅, 上川涼平, 山崎 佑, レーザー学会, G04-12p-VII-03 (オンライン), 2022 年 1 月 12 日 .
- 上川涼平, 山崎 佑, 小西 毅, 電子情報通信学会総合大会 B-10-3, (オンライン), 2022 年 03 月 18 日 .

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Shimizu Satoshi, Kamikawa Ryohei, Kaihori Yuta, Yamasaki Yu, Konishi Tsuyoshi	4. 巻 18
2. 論文標題 Demonstration of coherent detection technique for broadband optical comb light source	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEICE Electronics Express	6. 最初と最後の頁 383 ~ 388
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/elex.17.20200383	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 3件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Tsuyoshi KONISHI, Yu YAMASAKI, Yuta KAIHORI, Ryohei KAMIKAWA
2. 発表標題 Further development potential of photonic ADCs under contention among error terms in SNR
3. 学会等名 The IEEE Summer Topicals Meeting 2020（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 上川涼平, 山崎 佑, 小西 毅
2. 発表標題 ソリトンスクイーミングを用いた光サンプリングパルスの強度ゆらぎ抑制手法に関する一検討
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小西 毅
2. 発表標題 Photonic Analog-to-Digital Conversion
3. 学会等名 2021 IEEE Photonics Society Kansai Chapter特別講演会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小西 毅, 上川涼平, 山崎 佑
2. 発表標題 電子工学的時間ジッタ限界領域光サンプリングの高品質化
3. 学会等名 レーザー学会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	清水 智 (Shimizu Satoshi) (10533440)	国立研究開発法人情報通信研究機構・ネットワーク研究所 フォトリックICT研究センター・主任研究員 (82636)	
研究分担者	植之原 裕行 (Uenohara Hiroyuki) (20334526)	東京工業大学・科学技術創成研究院・教授 (12608)	
研究分担者	西澤 典彦 (Nishizawa Norihiko) (30273288)	名古屋大学・工学研究科・教授 (13901)	

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	山本 直克 (Yamamoto Naokatsu)		

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	諸橋 功 (Morohashi Isao)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関