

トロムソ Na ライダーの改良に向けた

FPGA 制御・計測システムの開発

渡部 蓮¹, 津田 卓雄¹, 青木 猛¹, 雁金 沙弥香¹, 佐藤 洸太¹, 野澤 悟徳²,
川端 哲也², 斎藤 徳人³, 川原 琢也⁴

¹ 電気通信大学 (〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1)

² 名古屋大学 (〒464-8601 愛知県名古屋市千種区不老町)

³ 理化学研究所 (〒351-0198 埼玉県和光市広沢 2-1)

⁴ 信州大学 (〒380-8553 長野県長野市若里 4-17-1)

Development of FPGA-based Control and Measurement System for the Tromsø Sodium Lidar

Ren WATABE¹, Takuo T. TSUDA¹, Takeshi AOKI¹, Sayaka KARIGANE¹, Kota SATO¹,
Satonori NOZAWA², Tetsuya KAWABATA², Norihito SAITO³, and Takuya D. KAWAHARA⁴

¹ Univ. of Electro-Communications, 1-5-1 Chofugaoka, Chofu, Tokyo 182-8585

² Nagoya Univ., Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya, Aichi 464-8601

³ RIKEN, 2-1 Hirosawa, Wako, Saitama 3511-0198

⁴ Shinshu Univ., 4-17-1 Wakasato, Nagano, Nagano 380-8553

Abstract: The Tromsø sodium (Na) lidar is a highly stable Na resonance scattering lidar, resulting in various research achievements in the upper atmosphere. For further improvements in the Tromsø Na lidar, there are several issues, e.g., absolute time synchronization, strict control in frequency switching, etc. To solve these issues, we have been working on a self-build FPGA-based control and measurement system. As the initial development, we reproduced a basic measurement system, which is almost identical to the commercial system used in the current Tromsø Na lidar. In this presentation, we will introduce our FPGA-based system and the results of the performance tests. The current status of further developments for additional functions will be also reported.

Key Words: Resonance scattering lidar, FPGA, Photon counting

1. はじめに

トロムソ Na ライダーは、名古屋大学・信州大学・理化学研究所・電気通信大学によって 2010 年に開発され、ノルウェー・トロムソ (69.6°N, 19.2°E) に設置された Na 共鳴散乱ライダーである。本ライダーは、送信系に LD 励起パルスレーザーを採用した世界初の共鳴散乱ライダーであり、高安定・長寿命のシステムとして継続的な夜間観測を行い、超高層領域に関する様々な研究成果が得られている¹⁻⁴⁾。

トロムソ Na ライダーのレーザー繰り返し周波数は 1 kHz、即ち IPP (Inter-pulse period) は 1 msec である。1-msec 毎のレーザーパルス 1-shot に対し、bin 幅は 640 nsec (距離分解能: 96 m)、bin 数は 1500 bin として、1000-shot 積算 (時間分解能: 1 sec) でデータを記録する。この際、1-sec 積算の開始時刻は絶対時刻に同期していない為に、1-sec 間の積算範囲が厳密には把握できていない。その為、現状の 1-sec 積算データの絶対時刻精度としては最大誤差が 1-sec 程度となっている。また、温度・風速の観測の為に送信レーザーの周波数を、音響光学素子 (Acousto-optics: AO) によって Na D₂ スペクトル内の 3 つの周波数に 1-min 毎に切替える。その際、1-min 毎の周波数切替えのタイミングと 1-sec 積算のタイミングが同期していない為、周波数切替え時の 1-sec データは、切替え前の周波数のデータと切替え後の周波数のデータが混ざったデータとなってしまう、データ解析に使用できない (1-min 間に 1-sec のデータロスが発生する)。このような課題を解決するには、それぞれの目的に対応した厳密な制御が可能なシステムを構成する必要があるが、そのようなシステムは市販されていない。そこで、本研究では、トロムソ Na ライダーの機能拡張・高効率化を目的に、FPGA (Field-programmable gate array) を用いた柔軟な制御・計測システムを段階的に開発する。

2. FPGA 制御・計測システムの基礎開発

2.1 市販計測システムの再現

本システムの開発にあたって、まずはベースとなる計測システムの開発を市販システムの再現という観点から行った。開発には、Xilinx 社製のプロセッサ (PS) と FPGA (PL) が一つになった IC チップ Zynq を搭載した FPGA 評価ボード PYNQ-Z2 を使用した (Fig.1 参照)。開発したシステムは、主に、信号検出、カウンター配列、データ転送・保存、から構成される。システムの概要図を Fig.2 に示す。信号検出は、フォトンカウンティング方式であり、光電子増倍管 (Photomultiplier tube: PMT) からの出力をディスクリミネーターでデジタル出力に変換した信号を FPGA に入力する。信号のサンプリングは、位相反転した 2 つの 100 MHz クロックを用いることで、リソースを節約しながら実質的なサンプリング速度は 200 MHz になるようにした。カウンター配列における 1-bin の bit 数は、PMT モジュールのパルスペア分解能 (~ 70 nsec) と 1-bin の bin 幅 (640 nsec) とデータ積算数 (1000-shot 積算) を考慮して、15 bit レジスタ (0-32767 counts) を確保した。データ転送時のデッドタイムをなくす為に、1000-shot 毎に 2 つのカウンター配列を切り替えるダブルバッファシステムを構築した。PL から PS へのデータ転送には DMA (Direct memory access) を採用し、PS 内に作成したソフトウェア (python) でデータを保存する。

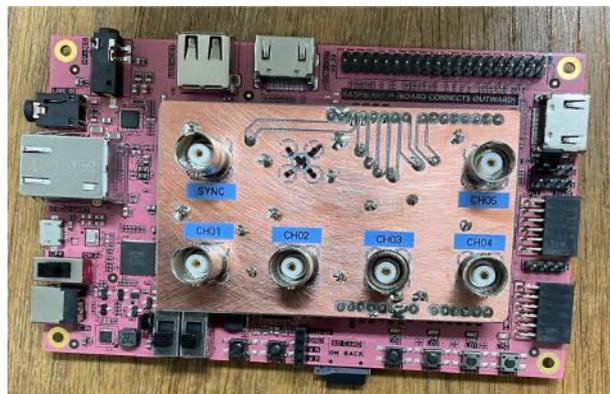


Fig. 1 FPGA evaluation board with the handmade I/O interface.

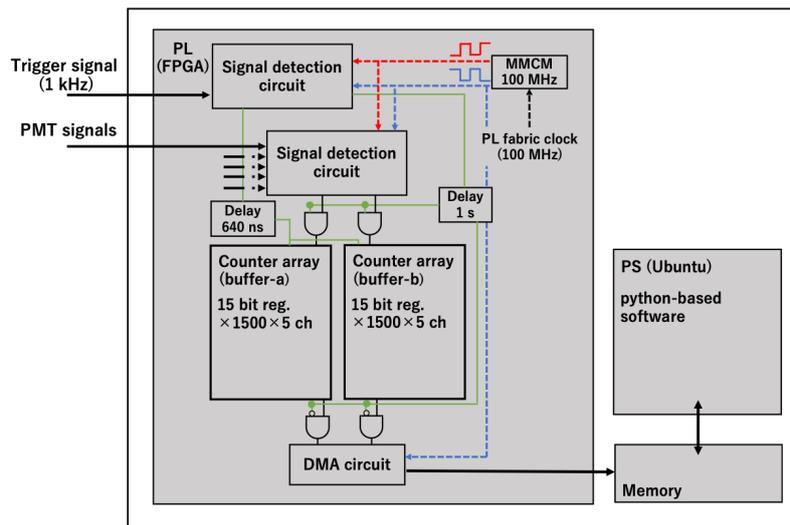


Fig. 2 Diagram of the developed measurement system on an FPGA board. The PL fabric clock is converted to two clocks with inverted phase by MMCM (Mixed-Mode Clock Manager), and these clocks are used in the signal detection circuit. Counter array switches between counting mode or transfer mode every second.

2.2 トロムソ Na ライダーによる実証試験

国内で各種の性能評価実験を行った後、開発したシステムの実証試験を 2023 年 2 月中旬にトロムソにて実施した。実証試験では、トロムソ Na ライダーシステムに、開発したシステムを組み込み、現行システム (市販システム) との同時計測を行った。それぞれのシステムによるカウントデータを Fig.3 に示す。70-bin (高

度 6.72 km), 100-bin (高度 9.6 km), 950-bin (高度 91.2 km) におけるカウント値は, 開発システムではそれぞれ, 15368 counts, 7367 counts, 55 counts であり, 現行システムではそれぞれ, 12911 counts, 7301 counts, 44 counts である. ~ 7000 counts までは両者のシステムで同程度であり, 信号プロファイル全体の概形もよく一致している. 従って, 開発したシステムにおいて問題なく計測が行えていると考えられる. 開発したシステムのカウント値が $\sim 15,000$ counts の際には, 現行システムの $\sim 13,000$ counts よりもカウント値が ~ 2400 counts ほど大きい. このことは, 現行システムと比較し, 開発したシステムでは, カウント値が大きい場合のフォトンカウンティングにおけるカウントロスが軽減されており, ダイナミックレンジが向上していることを示唆する結果であると考えている.

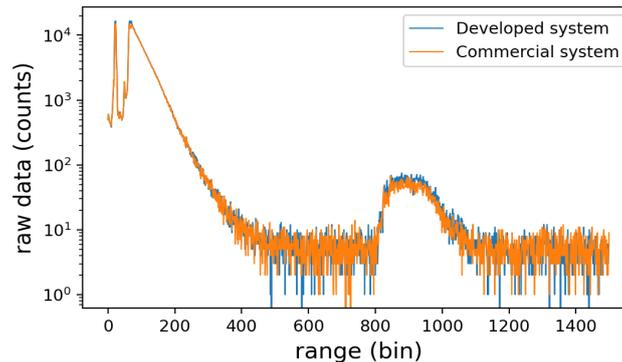


Fig. 3 Example of raw photon count data of one direction (vertical) by the developed system (blue) and commercial system (orange) at 18:00 UT on 20 Feb. 2023. Each integration time is 2 sec. The range resolution is 96 m.

3. まとめと展望

トロムソ Na ライダーの改良に向けた新たな FPGA 制御・計測システムの開発の初期段階として, 市販計測システムの再現を行った. トロムソでの実証試験によって, 市販システムとの比較を行った結果, 開発したシステムは, 基本計測を十分に行えること, ダイナミックレンジに関しては市販システムを上回る性能を示すことを確認した. 開発したシステムは市販システムの 1/10 程度の価格であることから, コスト的な観点からも優位性を有している. 現在は, 冒頭で述べた絶対時刻同期や AO 制御を追加したシステムの開発を精力的に進め, 2023 年 10-11 月に第 2 段階のトロムソ実証試験を行うことを予定している. 加えて, 最近の研究で報告されている熱圏 Na イベント^{5,6)}の観測に向けて進行中である観測高度拡張プロジェクトの要となる時間差マルチビーム観測方式への対応を想定し, 高速光軸制御, 時間差マルチチャンネル計測を統合した FPGA 制御・計測システムの開発も進めている.

謝 辞

本研究に関連する研究活動は, 日本学術振興会科学研究費助成事業 (JP20H01962, JP20K20940, JP21K18315, JP21H01144, JP21H01152, JP21H04516, JP22H01289, JP23H03532) 等により実施している.

参考文献

- 1) S. Nozawa, T. D. Kawahara, N. Saito, C. M. Hall, T. T. Tsuda, T. Kawabata, S. Wada, A. Brekke, T. Takahashi, H. Fujiwara, Y. Ogawa, and R. Fujii: *J. Geophys. Res. Space Physics* **119** (2014) 441.
- 2) T. T. Tsuda, S. Nozawa, T. D. Kawahara, T. Kawabata, N. Saito, S. Wada, Y. Ogawa, S. Oyama, C. M. Hall, M. Tsutsumi, M. K. Ejiri, S. Suzuki, T. Takahashi, and T. Nakamura: *Geophys. Res. Lett.* **40** (2013) 4486.
- 3) T. Takahashi, S. Nozawa, T. T. Tsuda, Y. Ogawa, N. Saito, T. Hidemori, T. D. Kawahara, C. Hall, H. Fujiwara, N. Matuura, A. Brekke, M. Tsutsumi, S. Wada, T. Kawabata, S. Oyama, and R. Fujii: *Ann. Geophys.* **33** (2015) 941.
- 4) T. D. Kawahara, S. Nozawa, N. Saito, T. Kawabata, T. T. Tsuda, and S. Wada: *Opt. Express* **25** (2017) A491.
- 5) Q. Gao, X. Chu, X. Xue, X. Dou, T. Chen, and J. Chen: *J. Geophys. Res. Space Physics* **120** (2015) 9213.
- 6) T. T. Tsuda, X. Chu, T. Nakamura, M. K. Ejiri, T. D. Kawahara, A. S. Yukimatu, and K. Hosokawa: *Geophys. Res. Lett.* **42** (2015) 3647.