

衛星ライダー用パルスファイバレーザー試作に関する検討

大川 洋平, 境澤 大亮, 木村 俊義

宇宙航空研究開発機構 研究開発部門センサ研究グループ (〒305-8505 茨城県つくば市千現 2-1-1)

Study on pulsed fiber laser for space-borne lidar

Youhei OKAWA, Daisuke SAKAIZAWA, and Toshiyoshi KIMURA

Japan Aerospace Exploration Agency Sensor Research Group, 2-1-1 Sengen, Tsukuba, Ibaraki 305-8505

Abstract: Earth observation lidar has achieved some success with laser transmitters using diode-pumped solid-state lasers, and the technology is being established. To meet future small satellite installations and various scientific requirements, SWaP (size, weight, and power) reduction, improved power efficiency, extended lifetime, and high reliability are issues. To address these problems, we investigated fiber lasers, which have recently become the center of industrial applications, as a new light source. We have started experimental research on Yb-doped nanosecond pulsed fiber lasers. Utilizing fiber lasers requires addressing the issues of low peak power and low pulse energy compared to bulk solid-state lasers. This report introduces the contents of the conceptual study so far.

Key Words: Fiber laser, Lidar

1. はじめに

地球観測用途を中心とする衛星搭載ライダーは、LD 励起固体レーザーによるレーザー送信機により一定の成功を納め、技術確立が進んでいる。一方、今後の小型衛星搭載や多様な観測要求に応えるには、SWaP (size, weight, and power) 低減及び電力効率の改善や、長期寿命及び信頼性（光学ミスアライメントやコンタミ耐性）などに課題を残している。これら課題に対処すべく、新規光源として近年産業用レーザーで中心となっているファイバレーザーの利用検討を行い、1 μ m 帯パルス光源の試作に着手にした。ファイバレーザー利用では、ピーク出力及びパルスエネルギーがバルク固体レーザーに比して低い点に対処する必要がある。本報告ではこれまでの検討内容について紹介する。

2. 衛星ライダー用レーザー光源の情勢

2.1 衛星ライダーにおけるレーザー傾向

図 1 にこれまで及び現在計画されている地球観測ライダーの出力パルス特性を示す。ほぼ全て光源は Nd:YAG Q スイッチとなっており、波長は 1064nm 及びその高調波となっている。これは現実的な受光効率で地表面のライダー波形データや大気散乱を各パルスで取得するには、パルスエネルギーにして数十~数百 mJ のジャイアントパルス出力が必要なため光源形態が限定的となっている。また真空環境では、レーザー照射により光学素子にアウトガスが付着して焼損を引き起こすレーザー誘起コンタミネーションが発生するため、与圧筐体封入が必要である。国内では初の地球観測ライダーである国際宇宙ステーション搭載のライダー実証ミッション (MOLI) が進んでいる。

2018 年に打ち上げられた ICESat-2 では、従来の低繰り返し+ジャイアントパルス方式とは異なる高繰り返し+マイクロパルス方式が採用されている [1]。Nd:YVO 第二高調波による波長 532nm のパルス出力は、パルスエネルギー 0.25-1.4mJ で可変、パルス幅 1.3ns のマイクロパルスが強・弱の二種が三つずつの計 6 ビームに分岐されている。分岐後の強ビームのパルスエネルギー約 0.1mJ、ピーク出力 0.1MW 程度と従来方式から二桁低く、晴天下における雪面反射の理想条件でも受信光子数が平均 12 光子の設計だが、10kHz の高繰り返しによる精算処理によって回線計算を成立させている。高繰り返し方式では信号処理に課題があるが、オンボード DEM による信号処理を行い帯域内でダウンリンクしている。

2.2 衛星ライダー用ファイバレーザの研究開発状況

NASA/GSFC は GEDI, ICESat-2 など固体ライダー技術を先行して確立している一方、ファイバレーザにも投資・開発を進めている[2]。中でも 1.5 μm 帯 Er 添加ファイバレーザによる CO₂ 観測ミッションである ASCENDS は、レーザ送信機の基本的な光学系は全てファイバで構成されている[3]。各パルス (3.2mJ/1 μs) で波長を変化させて地盤面からの反射光を測定し、離散的ながら CO₂ などの吸収スペクトルを取得する方式である。航空機観測を行い開発が進められていたが、2017 年の Decadal Survey の結果、予算低減により計画変更となっている。

ONERA では 2.05 μm 帯 Tm 添加ファイバレーザによる CO₂/風観測ライダー (HELENA) の開発が進んでいる[4]。ファイバレーザ出力は 0.12mJ/200ns が報告されており、Ho:YLF の後段バルク増幅器とのハイブリッド形式で衛星搭載を計画している。このようなファイバレーザを発振器として後段に固体増幅器を配置するハイブリッド形式は、発振器に共振器構造がなくロバストな一方で、固体増幅器による高出力化も見込めるため、両者の長所を利用できる。ONERA では VEGA、HELIPAS など同様の近赤外大気観測ファイバライダーの開発が複数進んでいる。

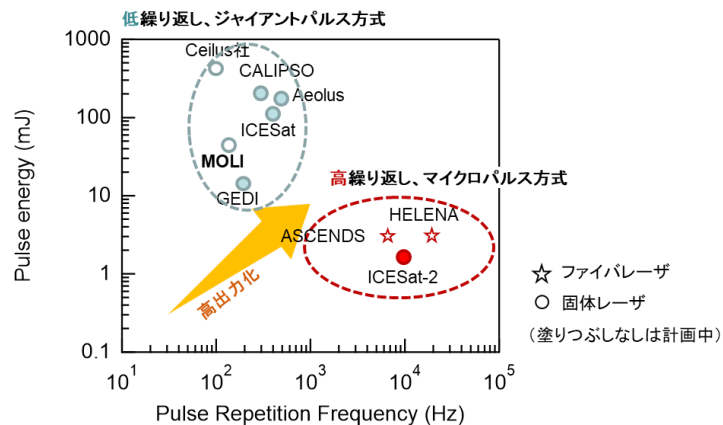


図1：衛星搭載ライダーのパルス出力特性（パルスエネルギー対パルス繰り返し）

3. ファイバレーザ利用検討

ファイバレーザ及び増幅器の衛星ライダー利用におけるメリットは以下が考えられる：

- ・低 SWaP
- ・高い電力効率 (WPE>20%)
- ・モノリシック構造で高信頼性
- ・高いビーム品質、安定性
- ・細線構造のため高比表面積で高熱分散性
- ・広い増幅帯域

そのため国内外の機関によりファイバレーザ開発は進められており、特に通信衛星では利用が一般的となっているが、地球観測ライダーへの軌道上実績は未だにない。その最大の要因はピーク出力及びパルスエネルギーの制限と考えられる。地球観測ライダーにおける現実的な受光効率から、送信パルスは通常 MW 級のピーク出力が求められる。ファイバレーザでは数~数十 μm 径の微小なコア領域に光を導波するため、様々な非線形現象によりピーク出力は制限される。CW では kW 級が実現されているファイバレーザだが、後述する各種制限によりナノ秒パルスではパルスエネルギー 1mJ、ピーク出力 1MW 程度が限界となる。そのため、低いピーク出力で運用できる観測ターゲット・方式の選定が実現の鍵になる。

ファイバレーザでは非線形現象によって出力は制限される(図2)。非線形効果は通常、ファイバコアの大口径化によって緩和されるが、コア径によらず究極的な限界となるのは自己収束限界で、1 μm 帯では3MWの程度である。レーザ高度計で使用されることが多い1-10ns程度のパルス幅では、誘導ブリルアン散乱(SBS)、誘導ラマン散乱(SRS)が支配的である。特に先行研究ではSBSが出力制限となることが報告されている。ナノ秒領域ではTransient SBSと呼ばれる過渡的な過程であり、パルス幅が短い方がむしろ閾値が緩和され、出力可能なパルスエネルギーが高くなる傾向が見られる。実際のSBS閾値は、フェーモードの希土類添加ファイバで周波数変調もかかっている場合が多く予測は難しい。パルス幅を長くすることでピーク出力を落とす方式も考えられるが、この場合は飽和エネルギー $E_{\text{sat}} = 68 \text{ J/cm}^2$ が限界を決める。

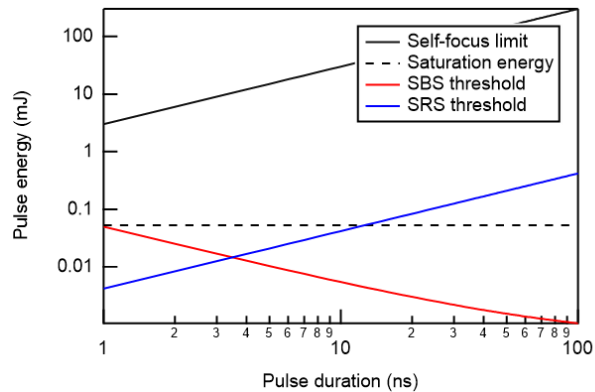


図2：ファイバレーザの出力制限計算例(波長=1 μm , コア径=10 μm)

ファイバレーザの主な利用形態について主に以下の三方式が考えられる。

(i)1 μm 帯レーザ高度計：レーザ高度計ではパルス幅1-10ns程度が多く最もピーク出力要求が高い傾向があるが、ICESat-2同様のマイクロパルス+高繰り返し方式では成立性がある。またYb添加ファイバレーザは最も高効率で高出力化しやすく、レーザ加工分野で技術成熟も進んでいる。またレーザ高度計は基本となるライダー方式であり、要素技術からの開発に適しているため、本研究では本方式を試作対象に選定し、パルスファイバレーザ技術獲得を目指した。

(ii)近赤外大気観測ライダー：前述の通り、欧米を中心に大気観測用にファイバレーザ開発が進んでいる。希土類のファイバレーザは重要なトレースガスに対応する帯域を持ち、またパルス幅が比較的長く良く、IPDA方式ではパルスエネルギーも低くてよいため成立性がある。

(iii)CWライダー：1.5 μm 帯を中心としたCW方式のライダーは最もピーク出力を低くすることができ、ファイバレーザの利点を最大限に活用できる可能性がある。しかし地球観測のような長距離計測では実績が乏しく開発要素が大きい方式であり、特に衛星搭載では光源が高速移動するため積算時間に制限がある。小惑星探査機用で開発事例があり、NASA/GSFCが開発しているSALiはMOPA型ファイバレーザの出力可変性を利用して軌道高度に応じて様々に機能する疑似ランダム変調方式の1.5 μm 帯CWライダーである[5]。

4. 1 μm 帯パルスファイバレーザ試作に関する検討

試作に当たり、高繰り返し+マイクロパルス方式のレーザ高度計用1 μm 帯Ybパルスファイバレーザを選定した。出力目標としてパルスエネルギー1mJ、パルス幅10ns以下を設定した。これはICESat-2で回線計算が成立しているギリギリの設定だが、ファイバレーザでは論文レベルで幾つか報告が見られる程度で高難易度の値である[6,7]。上述の通り、高出力化にはラージモードエリア化が必須だが、通常のLMAファイバでは単一モードで導波できるコア径は10 μm 程度である。図2に示す通り、コア径10 μm では必要なパルス出力は難しい。フォトニック結晶ファイバではコア径100 μm 程度まで可能で、理論限界近い4.3mJ/1nsパルス出力の報告もあり、ICESat-2の初期検討では候補となっていた。しかし、ロッド状で曲げに弱く、さらに融着接続が難しいため安定性が失われる問題があり、利用が難しい。そこで本試作ではテーパダブルクラッドファイバ(T-DCF)増幅器を最終段に使用することにし、評価を行う。T-DCFはファイバの長手方向に沿ってコア径が徐々に大きくなっていく構造のため、融着接続が可能で、ファイバの柔軟性を持ち曲げ

が可能であり、上記欠点を回避できると考えられる。また空間モードの断熱的な遷移のため、入射時の単一モード性が保持される。また SBS 閾値が高く縦モード不安定も起きにくい利点がある。通常の設備では数 m のテーパーファイバの製作は難しいのが現状だが、海外では市販品も出始めている。

5. まとめ

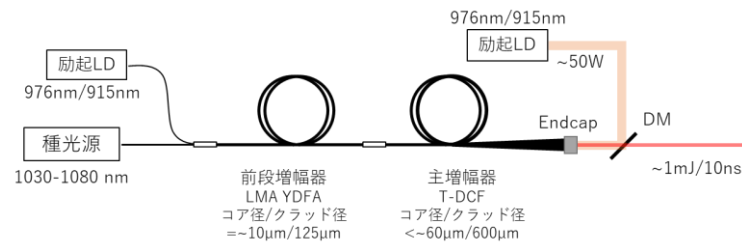


図 3：試作するパルスファイバレーザー概念図

衛星搭載ライダーのコア技術であるレーザー送信機について、SWaP 低減・信頼性向上を目指し、パルスファイバレーザー技術を獲得することを目的とし、試作・研究を開始した。現在、ファイバレーザーの試作に向けて机上設計と並行して実験系の準備を行っている。

6. 参考文献

- [1] W. Yu et al., "Space laser transmitter development for ICESat-2 mission," Proc. SPIE 7578, Solid State Lasers XIX: Technology and Devices, 757809 (17 February 2010).
- [2] W. Yu et al., "Orbiting and In-Situ Lidars for Earth and Planetary Applications," in IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, vol. 14, pp. 8999-9011, 2021.
- [3] M. Stephen et al., "Fiber-based laser MOPA transmitter packaging for space environment," Proc. SPIE 10513, Components and Packaging for Laser Systems IV, 1051308 (20 February 2018).
- [4] J. Lahyani et al., "2.05- μm all-fiber laser source designed for CO₂ and wind coherent lidar measurement," Appl. Opt. 60, C12-C19 (2021).
- [5] S. Cremons et al., "Small All-Range Lidar for Asteroid and Comet Core Missions," Sensors 21(9), 3081 (2021).
- [6] X. Mu et al., "Compact 1 mJ fiber MOPA for space-based laser-ablation resonant ionization mass spectrometry (LARIMS)," Proc. SPIE 10512, Fiber Lasers XV: Technology and Systems, 1051211 (26 February 2018).
- [7] F. Scol et al., "High-energy, narrow-linewidth, flat-top temporal profile nanosecond-pulses from ytterbium-doped tapered fiber amplifier with chirped-diode seeding," OSA Continuum 4, 1162 (2021).