

飛翔体搭載用ライダーに向けた 946nm パルスレーザーの検討

境澤 大亮¹, 大川 洋平¹, 木村 俊義¹

¹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)

Research for 946nm pulsed laser for airborne/space-borne lidar

Daisuke SAKAIZAWA¹, Youhei OKAWA¹, and Toshiyoshi KIMURA¹

¹Japan Aerospace Exploration Agency, 2-1-11 Sengen, Tsukuba, Ibaraki 305-8505

Abstract: Lidar is widely used in airborne laser scanner, especially for surveying forest canopy height, surface elevation, and bathymetry. Future satellite-borne lidar development aims to meet requirements for terrestrial biosphere such as forest biomass and land use change. Lidar scanner employing 0.9 μ m lasers with high-sensitivity Single photon avalanche detector array can mitigate laser power to satisfy the required snr for space applications. Some fundamental test results are shown in symposium.

Key Words: altimeter, bathymetry, 946nm, quasi-4 level laser, water vapor

1. はじめに

ライダーは、航空測量分野で地形、構造物の高さや沿岸域の測深計測に幅広く利用され、点群観測データは森林の高さを取得する上で、観測基準として利用される状況になっている¹⁾。航空レーザー測量では低出力レーザービームをガルバノスキャナの掃引等で、単位時間辺り 200- 1000 km²/h のデータを取得する²⁾。1000km²/h を取得する場合、1m² 辺りに落ちるレーザービームの割合 (カバー率) は 3 割程度に留まる²⁾。この単位面積当たり一定数のレーザーを照射する形態を衛星に拡大したものが ISS-GEDI や ICESat-2 である^{3,4)}。数多くのレーザーフットプリントを配置することで、ある面積内に効率的にビームを配置し、ある緯度経度のグリッドごとデータを整理する取扱いがされるが、カバー率を高くするには時間当たりの観測可能面積や、何往復も同じ地点を往復する必要がある。

低カバー率改善を目指したスキャナーに対して検討では²⁾、Nd, Yb の 1 μ m レーザーを用いて宇宙から利用する場合、広範な領域を一度に十分な SN 比で計測するには、レーザー出力や望遠鏡開口が利用可能な衛星リソースを超過してしまう。また光検出器の効率改善等、現状技術からの乖離があり、その差を埋める技術開発を要する。その一端として 1 μ m 帯より、検出器感度が高い Nd の 0.9 μ m 帯の利用について本発表では 0.9 μ m 帯のレーザーやシステム検討について報告する。

2. 0.9 μ m 帯光子計数型ライダー

2.1 観測対象とシステムへの要求

衛星搭載用ライダーは R5 年度宇宙基本計画ⁱ⁾にも具体的な名称で明記され MOLI 以降も推進していく活動となる。この高度計への要求項目は、森林バイオマスと、土地利用の観点がある。森林バイオマスは林冠高とバイオマスの相関関係を求められることから、正確な地盤面高度とその上の構造物の高さ推定、展葉構造の把握が求められている。土地利用に対しては主に地表面高度をデジタル地図で再現するデジタルツインⁱⁱ⁾の観点から、より立体地図の高度情報の正確性、高精度化の要望が出されている。加えてライダー観測点も MOLI のような直下点の観測に限定されず、CT 方向 (Cross track 方向、衛星進行方向とは直交する方向) への観測点数増大や地表分解能向上が要望されている。

以上のような要望に対処することを想定し、光子計数を用いてレーザー出力を抑制したシステム概算値を Table 1 に示す。レーザー1 ショット辺り光子計数検出器アレイ Si-PM が

Table1 Tentative system specification for photon-counting altimeter from space.

Wavelength	[μ m]	0.9	1	0.4	0.5
Energy	[mJ]	1.2	8	1	1
PRF	[kHz]	10	10	10	10
Detection Efficiency	[event/ photon]	0.24	0.01	0.45	0.55
swath	[km]	0.5	0.5	0.5	0.5

ⁱ https://www8.cao.go.jp/space/plan/plan2/kaitei_fy05/honbun_fy05.pdf

ⁱⁱ <https://earth.jaxa.jp/conseo/news/20230328-1/document02.pdf>

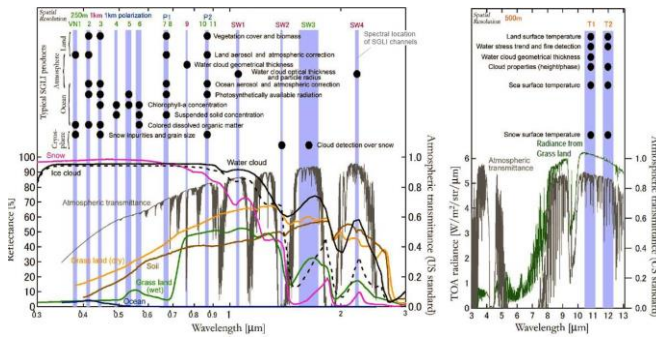


Fig.1 Spectral reflectance of several observation targets and the atmospheric transmittance.

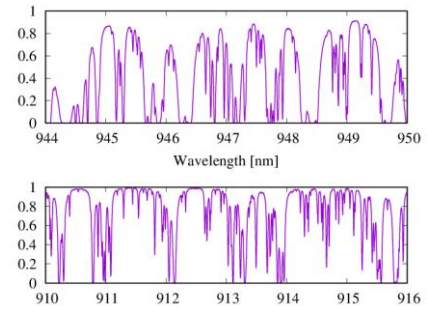


Fig.2 Detail atmospheric transmittance around 912 nm and 946nm.

ダークカウントによる誤検知確率を超える光子数が返ってくる条件とし、 $1.0\ \mu\text{m}$ と $0.9\ \mu\text{m}$ でそれぞれ現在参照できる光検出器の性能を用いて求めた。

2.2 $1\ \mu\text{m}$ 帯と $0.9\ \mu\text{m}$ 帯の比較

Table 1 では、光検出器における光子検出確率が $1\ \mu\text{m}$ よりも約 20 倍高い $0.9\ \mu\text{m}$ 帯に着目している。可視～近赤外域で感度を持つ APD では Si, InGaAs が挙げられるが、暗電流を含めた雑音特性から Si 製の SPAD を候補として選定した。Si では近赤外域の光吸収係数が大幅に低下するため、感度向上として実効光路長を金属箔反射による延長、吸収層厚みの近赤外域への適応などを行い、光子検出確率は $0.9\ \mu\text{m}$ で 0.24 まで得られ、 $1\ \mu\text{m}$ の 0.01 より性能面で利点がある^{5,6)}。加えて、 $0.9\ \mu\text{m}$ 帯は車載ライダー関連で開発進捗が著しく、品質や入手性という点で安定しており、宇宙用スクリーニングの観点でも利点も挙げられる。

一方、 $0.9\ \mu\text{m}$ 帯は地球大気に豊富に存在する水蒸気の吸収線が多数(Fig.1)ある。Fig. 2 に高分解能の放射伝達計算モデルで求めた、Nd が利得を持つ 946nm (Nd:YAG), 912nm (Nd:YVO₄/GdVO₄)の大気透過率を記載した。 912nm 帯は比較的吸収が弱い領域の選択性が高く、 946nm 帯は 912nm 帯よりも選択性が乏しい。ただレーザー発振に注意を払えば、水蒸気吸収線の弱い領域での観測が期待できる。 $1\ \mu\text{m}$ 帯ほど高輝度な光に耐性がある薄膜は普及しておらず、宇宙用を想定した場合に対応可能な薄膜ひいてはその成膜業者の選定が今後の課題になる。

3. $0.9\ \mu\text{m}$ 帯レーザー

$0.9\ \mu\text{m}$ のレーザー発振は Nd の $4F_{3/2} \rightarrow 4I_{9/2}$ の遷移で得られ、 $1\ \mu\text{m}$, $1.3\ \mu\text{m}$ に次ぐ Nd の 3 番目に大きな利得帯域を持つ。 $1\ \mu\text{m}$ の誘導放出断面積($2 \times 10^{-19}\ \text{cm}^2$)と比較して約一桁値が小さく($3 \times 10^{-20}\ \text{cm}^2$)、レーザーの下順位 $4I_{9/2}$ の $852\ \text{cm}^{-1}$ は規定準位に近く、熱による影響を受け、再吸収により利得制限がある等、出力を取り出すうえでいくつかの工夫が必要になる。

簡便な計算により、パルス駆動では出力鏡反射率を高めて共振器内での往復回数を確保して発振実験を試みている。Nd:YAG 結晶を用いた速報的な結果では 100Hz、19mJ の $808\ \text{nm}$ LD 入力に対して 5 mJ の $946\ \text{nm}$ フリーラン出力が得られている。これらデータを蓄積・整理し、Q スイッチ出力動作実験を通じて、ハンドヘルドサイズへのパッケージング化を目指している。

4. まとめ

$1\ \mu\text{m}$ 帯で広く利用される高度計を光子計数型として宇宙利用を想定した場合に、検出器感度が低いという点に対して、検出器感度の高い領域を使用できる $0.9\ \mu\text{m}$ 帯を用いたシステムの概要を取り上げた。送信光源となる $0.9\ \mu\text{m}$ 帯のレーザーに対しても基本的な試験を実施した。これら試験データや構築ノウハウを整理し、スキャンングもしくはスキャナー機能の原理実証を進める予定である。

参考文献

- 1) 国内特許第 4279894 号
- 2) 境澤 大亮：レーザーセンシングシンポジウム予稿集，福山 (2022)。
- 3) T. A. Neumann: *Remote Sensing of Environment* **233** (2019) 111325.
- 4) Ralph Dubayah: *Science of Remote Sensing*, **1** (2020) 100002.
- 5) 田代 睦聡, 伊藤恭佑: *応用物理* **91** (2022) 220.
- 6) Tuan Thanh Ta et al.: *Proc IEEE symposium on VLSI Circuits*, Honolulu, Hi USA 2020.