

宇宙用デジタルコヒーレント式 FMCW-LiDAR と液晶スキャナの検討

山川 猛¹, 上塚 尚登², 所 武彦², 土田 英実³, 米田 修¹, 吉田 浩之⁴, 山ノ井 航平⁵

¹トヨタ自動車株式会社 (〒471-8571 愛知県豊田市トヨタ町 1 番地)

²株式会社 SteraVision (〒305-0047 茨城県つくば市千現二丁目 1 番地 6)

³国立研究開発法人 産業技術総合研究所 (〒305-8565 茨城県つくば市東 1-1-1)

⁴関西学院大学 工学部電気電子応用工学課程 (〒669-1330 兵庫県三田市学園上ヶ原 1 番地)

⁵大阪大学レーザー科学研究所 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-6)

Study of space-based digital coherent FMCW-LiDAR and liquid crystal scanner

Takeshi YAMAKAWA¹, Hisato UETSUKA², Takehiko TOKORO², Hidemi TSUCHIDA³,

Osamu KOMEDA¹, Hiroyuki YOSHIDA⁴, and Kohei YAMANOI⁵

¹Toyota Motor Corporation (1 Toyota-Cho, Toyota City, Aichi 471-8571)

²SteraVision Co., Ltd. (2-1-6 Sengen, Tsukuba City, Ibaraki 305-0047)

³National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (1-1-1 Higashi, Tsukuba, Ibaraki 305-8565)

⁴School of Engineering Kwansei Gakuin University (1 Gakuen Uegahara, Sanda, Hyogo 669-1330)

⁵Institute of Laser Engineering, Osaka University (2-6 Yamadaoka, Suita, Osaka 565-0871)

Abstract: We are currently studying a digital coherent FMCW-LiDAR that is resistant to disturbances and is not restricted by observation distance. This method enables long-distance observation that is not affected at all by the coherence length of the laser light source, and is highly sensitive by heterodyne detection. In addition, this method has high disturbance resistance. Furthermore, by applying the high sensitivity of this method, we investigated the possibility of a completely non-mechanical system using an LC scanner and confirmed the minimum feasibility.

Key Words : Blue Phase Liquid Crystal scanner, Digital coherent, FMCW-LiDAR, rendezvous sensor, Coherence length

1. はじめに

ISS への補給船やデブリ回収を行う機体、重力天体で活動する探査機等では対象までの距離や相対速度を精密に計測しながら制御する必要があるため外環境センサとしてカメラやレーダ、LiDAR を搭載している。これらのセンサはレーダを除き太陽が視野に入ると観測が不可能になる。この制約は特に相手機体の制御が不可能なデブリ回収や惑星探査では大きな運用制約となるため、太陽影響を受けない高分解能のセンサが求められる。そこで本研究では太陽直視でも観測を継続できる高分解能センサとして FMCW-LiDAR に注目し、観測距離制約を回避可能なデジタルコヒーレント式の検討を進めてきた¹⁾²⁾。他方フライト実績のある宇宙用 LiDAR は機械式スキャナを搭載するため非常に大型で重いため、大きな搭載制約となっている。本検討ではデジタルコヒーレント式の特徴を最大限生かし大幅な小型軽量化を可能とする液晶式スキャナの成立性について検討を行ったので、デジタルコヒーレント式 FMCW-LiDAR の概要と合わせ報告する。

2. FMCW-LiDAR の基本原理

筆者らが検討を行っているデジタルコヒーレント式 FMCW-LiDAR は、レーザ光に変調を加えて距離と速度を検出する特性上、(1)式に示すレーザ光源の周波数雑音に起因したコヒーレンス長を超える遠距離観測が困難という深刻な弱点を有する。そのためこのままでは長距離観測が求められる宇宙用途としては採用不可能であるため、この弱点を簡易な構造で観測距離の制約をほぼ完全に克服可能な方式として検討を行っている。具体的には、キャリアとサブキャリアの 2 つの差動検出を行うことで光周波数雑音を除去し観測距離の制約を回避する方式³⁾で、光ファイバ通信のデジタルコヒーレント方式の考え方を応用していることからデジタルコヒーレント式 FMCW-LiDAR と呼んでいる。デジタルコヒーレント式 FMCW-LiDAR の基本原理を Figure 1 に、機能ブロック図を Figure 2 に示す。このシステムでは周波数雑音に起因した成分を完全に除去するため、送信光として(2)式で示す光周波数雑音とドップラーシフトのみを持つキャリア光 $\nu_c(t)$ と、(3)式にて示すキャリア光が含む成分に距離計測を行うための変調波を重畳したサブキャリア光 $\nu_{sc}(t)$ の 2 つの信号を生成する。アナログ変調を用いる本方式では位相誤差を最小とする必要があるため、生成した 2 つの成分を含む信号はプローブ光と参照光に分離、送受信経路差に起因した位相ずれを抑制するため同軸光学系を通してプローブ光を目標物に投射し目標からの反射光も同一の光学系で観測する。得られた反射光はサーキュレータで分離後、ヘテロダイン干渉計によって参照光と合成・検波する。干渉計により得られた差周波は分波器とバンドパスフィルタにより構成されたビート信号生成回路によりキャリアとサブキャリアをそれぞれ独立に検出する。ここで、 ν_0 はレーザ光源の中心周波数、 $\nu_n(t)$ はレーザ光源が持つ光周波数雑音、 f_{RF} はサブキャリアのシフト周波数、 $\nu_m(t)$ は周波数変調、 V は観測者と目標との相対速度、 c は光速であ

る。よって(4)式に示す差周波 $f_D(t)$ を2つのビート信号の差分演算により検出（差動検出）することで、周波数雑音に起因した成分 $v_n(t)$ が完全に除去され、周波数変調に起因する成分とキャリアとサブキャリアの周波数差に対応したドップラーシフトのみを精度良く検出可能となる。ここで(4)式の第一項が目標との距離に依存した成分を、第二項が目標との相対速度に依存した成分を示している。なお τ_L は参照光に対する散乱光の遅延時間を表す。遅延時間は目標までの距離 L を用いて(5)式にて表すことができる。また本方式による距離の分解能はチャープ帯域幅 Δv_m と反比例の関係にあり(6)式で表すことができる。本方式により FMCW 方式でありながらコヒーレンス長の影響を完全に排除し、またコヒーレント検波を行うことで外乱光影響を受けることなく距離制約のない観測が可能となる。

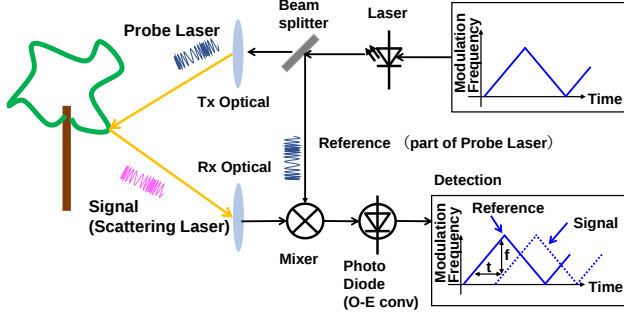


Figure 1 FMCW-LiDAR basic theory

$$\gamma(\tau) = \exp \left\{ -(\pi\tau)^2 \int_0^\infty S_v \cdot f \cdot \frac{\sin^2(\pi f\tau)}{(\pi f\tau)^2} df \right\} \quad (1)$$

$$v_c(t) = v_0 + v_n(t) + \frac{2v_0V}{c} \quad (2)$$

$$v_{sc}(t) = v_0 + v_n(t) + (f_{RF} + v_m(t)) + \frac{2(v_0 + f_{RF}) \cdot V}{c} \quad (3)$$

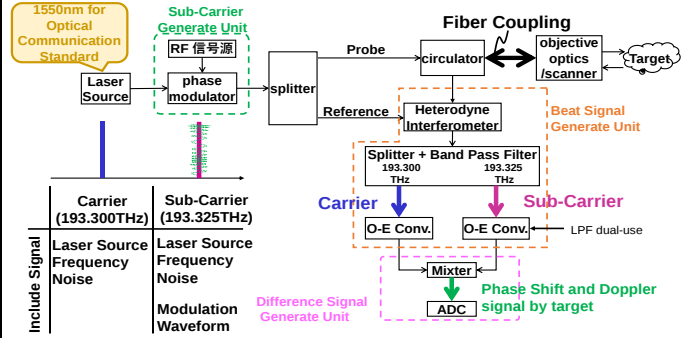


Figure 2 Functional block of digital coherent FMCW-LiDAR

$$f_D(t) = \{v_{sc}(t) - v_{sc}(t - \tau_L)\} - \{v_c(t) - v_c(t - \tau_L)\} \\ = v_m(t) - v_m(t - \tau_L) + \frac{2f_{RF}V}{c} \quad (4)$$

$$\tau_L = \frac{2L}{c} \quad (5)$$

$$\Delta L = \frac{c}{2\Delta v_m} \quad (6)$$

3. FMCW-LiDAR の BBM 試作と動作確認

デジタルコヒーレント式 FMCW-LiDAR の原理確認のため、Figure 2 に示した光学回路を持ち波長 1550nm (193.3THz)、チャープ帯域幅 640MHz、チャープ周波数 2kHz で動作する BBM とガルバノミラー方式の二次元ビームスキャナを試作した。サブキャリアの周波数は部品入手性の観点から光ファイバ通信の標準仕様に合わせキャリアとの周波数差を 25GHz に設定した。試作した装置の概要を Figure 3 に示す。

デジタルコヒーレント式による光周波数雑音の補正結果を Figure 4 に示す。本 BBM で使用したレーザー光源は Agilcom 製の DFB レーザでコヒーレンス長は約 70m である。コヒーレンス長より十分短い 18.9m における反射光のスペクトルでは目標に起因した鋭い線スペクトルが観測されるがコヒーレンス長を超える 124m では目標起因の反射スペクトルは雑音に埋もれまったく観測されない。一方、本提案の差動検出によれば、18.9m でも 124m でも目標による極めて明瞭な反射スペクトルを検出していることが分かる。また本方式ではヘテロダイン干渉計を用いていることから最小検出感度も距離に関わらず非常に高感度で、単体部品のみで構成し最適化を行っていない BBM の光学回路においても光周波数雑音の影響を除去しながら最小受光パワー：-60 ~ -70dBm 程度で目標からの反射光を検出可能である。続いて本 BBM を用いた 2 次元観測結果について示す。評価系のセットアップを Figure 5 に、取得した距離画像を Figure 6 に、定点に対する定量評価結果を Table 1 にそれぞれ示す。チャープ帯域幅 640MHz なので理論上の最小距離分解能は 23cm であり、いずれの距離に対しても理論値以内に収まっている。また繰返し誤差については最大で 6mm 程度であり、一般的な TOF 法 LiDAR と比しても同等かそれ以上の観測性能が得られている。以上より、設計最適化は必要であるが、本方式は宇宙用外環境センサとして使用可能な精度が得られると考える。

Table 1 Quantitative evaluation results of 2D observation

Imaging object	Reference distance	Detection distance	Absolute error (offset Scanner optical length:70mm)	Repeatability Error(1σ)
Wall	4.514 [m]	4.671 [m]	87 [mm]	2.1 [mm]
Quadrangle	3.739 [m]	3.920 [m]	111 [mm]	3.5 [mm]
Triangle	3.226 [m]	3.423 [m]	127 [mm]	6.1 [mm]

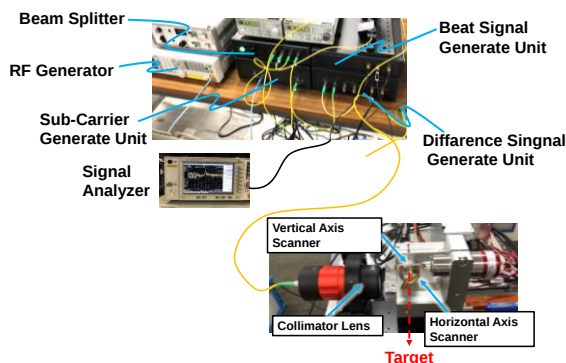


Figure 3 Digital coherent FMCW-LiDAR BBM Equipment

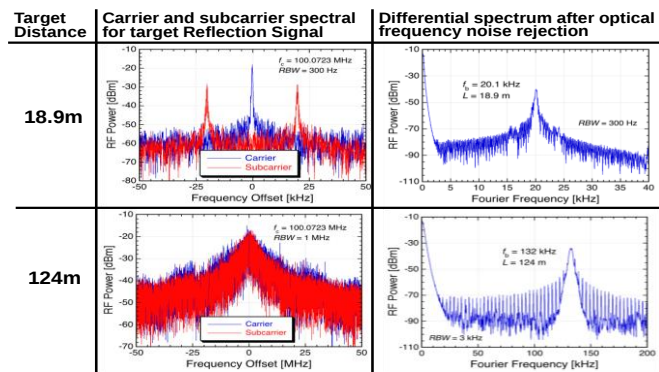


Figure 4 Target reflection signal and results of optical frequency noise correction by differential detection

※ : Coherence length in this example: about 70 m

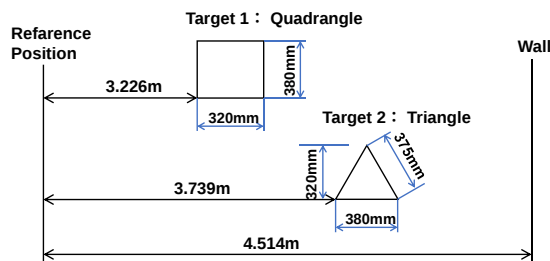


Figure 5 2D imaging evaluation setup

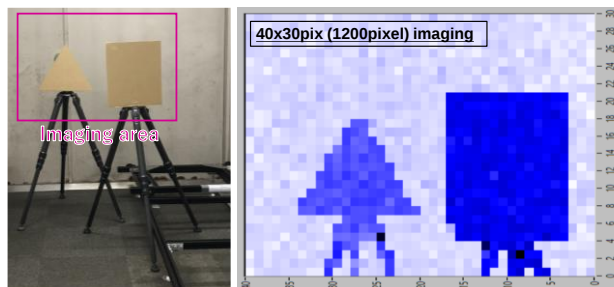


Figure 6 2D Observation evaluation results

4. メカレススキャナ（液晶スキャナ）の成立性検討

これまで述べた通り、本方式の LiDAR はスキャン機構を用いて二次元距離画像を生成する。そのため TOF 法 LiDAR と同様、スキャン機構が必要である。他方、TOF 式 LiDAR では検出回路の感度や、外乱影響に対して受信光強度を高く確保する必要から損失の少ないメカ式スキャナが主に採用されてきた。実績のある宇宙用メカ式スキャナは 6kg を超える重量であり更新レートも最大で 1Hz 程度と遅く大きな搭載／運用上の制約となっている。そのため本方式の特徴の一つである高感度化の利点を最大限生かし、損失が比較的大きく従来は採用が困難であった液晶スキャナの採用検討を行った。液晶スキャナは、ブルー相などの偏光制御が可能な特殊な液晶と偏光膜を組み合わせた素子で、単位セルひとつで 2 値のビームシフトが可能なデバイスである。ビーム光軸上に液晶や偏光膜、制御用の透明電極等の材料が存在するため透過損失は比較的大きく、近年技術革新が進んで改善傾向にはあるものの 1 セルあたり ~1dB 程度である。液晶スキャナの単位セルの基本構造を Figure 7 に、液晶 (LC) スキャナ ASSY の基本構成を Figure 8 にそれぞれ示す。

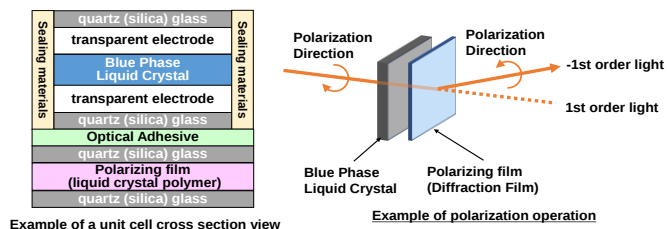


Figure 7 Basic structure of the liquid crystal scanner unit cell

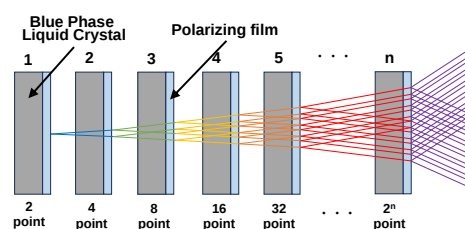


Figure 8 LC scanner ASSY (1 axis) basic configuration

液晶セルは非常に薄い石英ガラスに有機材料を含む材料をサンドイッチした構造である。また ASSY としては薄膜ガラス製の素子を、例えば視野角 40deg、0.1deg ピッチのスキャナを想定すると 400point/軸が必要であることから 9 枚 (512point) x2 軸の合計 18 枚をスタックした構造となる。前例のない構造であることから、設計成立性、環境耐性を評価する必要がある。そこで本検討では Table 2 に示す環境要件を仮定して試設計を行い、熱制御、機械構造、耐真空、紫外線防護については大きな問題が生じないことを確認した。一方で放射線影響については先行研究⁴⁾が少なく影響の程度が不明である。そのため耐放射線評価の初期評価として γ 線を用いたトータルドーズ効果による材料への影響評価を実施した。評価条件を Table 3 に示す。有機材料に対する評価であることからセルバイアスあり/なしの 2 条件で照射を行い、照射前後でのセル

のインピーダンス、駆動電圧ごとの透過損失の変化を評価した。セルインピーダンスはキーサイト製 precision LCR meter (E4980A) を使用して駆動周波数 2kHz に対して 4 端子法で測定を実施した。照射によるセルインピーダンス変化を Figure 9 に、位相の変化を Figure 10 に示す。また透過損失は Figure 11 に示す測定系を構築し、-1 次の透過損失を印加電圧を可変しながら測定を行った。照射前後での透過率の変化量と変化傾向を示す一次近似を Figure 12 に示す。評価結果より、照射直後で Bias あり：26%、Bias なし：33%程度の抵抗値低下が生じた。また照射 2 週間後の評価で Bias なし：10%、Bias あり 7%程度の回復が認められる。一方で位相には大きな変化は認められないことから、素子の交流特性に致命的な影響はないと考える。また 1550nm 透過率変化については、照射後に電圧が高いほど透過率が高くなる傾向が認められ、本セルの標準動作条件である 30V で約 3%程度の透過率向上が認められた。2 週間後の再測定でインピーダンスの回復とともに透過率の変化幅が約 1%程度まで縮小し傾きも緩和されていることから回復傾向が認められる。以上よりセルの状態に変化は認められるものの、軌道上でのドーズレートを考慮すると致命的な劣化影響はないと考えられる。採用に向けた詳細設計と性能評価などの具体的検討を進めるべきと考える

Table 2 Tentative environmental requirements

Radiation	TID:1 [Mrad] (exposure), 50 [krad] (3mm shield) SEE:80MeV/(mg/cm2) latch-up free
Templature	Storage : -40 to 60 deg / operation : 0 to 60 deg
Vibration	Max : 20.1Grms (not included structure damping)
Shock	Max : 152Grms (not included structure damping)
Charging	Relative:100Vconstant-max / Absolute:1000Vmax
Insolation	200—400nm UV exposure assumption

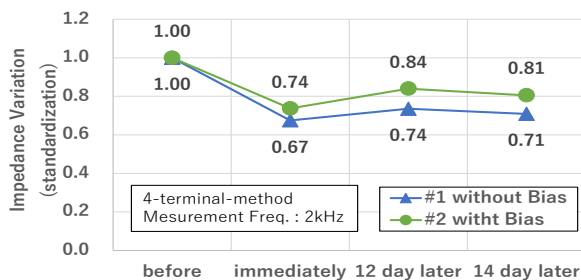


Figure 9 Single cell impedance variation due to irradiation

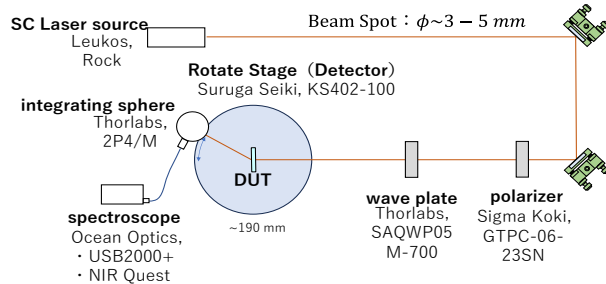


Figure 11 1550nm Transmittance measurement setup

Table 3 Total dose test conditions

Dose rate	5 [krad/h]
Total Dose	100 [krad]
Irradiation time	20 [hour]
Bias	2kHz rectangular, Duty:50%, 30Vp-p

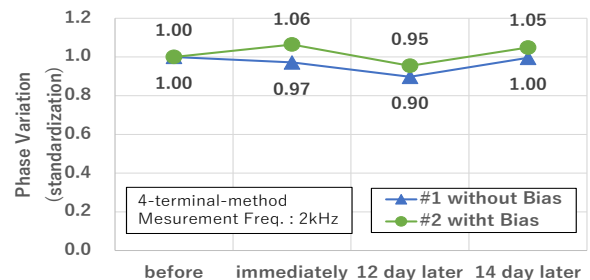


Figure 10 Single cell phase variation due to irradiation

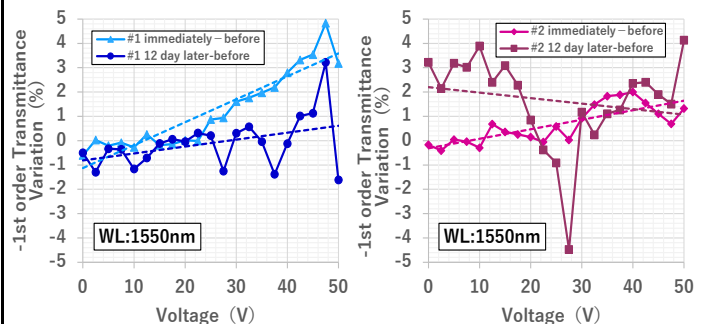


Figure 12 Transmittance variation of single cells in the 1550 nm due to irradiation

5. まとめ

デジタルコヒーレント式 FMCW-LiDAR の BBM と二次元スキャナを試作し、原理検証、二次元観測特性の初期評価を実施し、本方式の LiDAR を宇宙機へ適用できる水準の性能が得られることを示した。またデジタルコヒーレント式による高感度化を利用し液晶スキャナの適用による完全メカレス化に向けた初期検討と放射線照射試験を実施し、詳細評価と設計具体化は必要であるが採用の可能性が十分あることを確認した。本提案による宇宙用 LiDAR の実用化で従来の課題の多くを解決できる可能性があると考えられる。

6. 引用文献

- 1) 山川猛, 土田英実, 米田修, 宇宙空間における FMCW-LiDAR の成立性と軌道上実証に向けた検討, IEICE 総合大会, 2024.
- 2) 山川猛, 土田英実, 大野克巳, 宇宙空間におけるコヒーレント LiDAR (FMCW-LiDAR) の有効性, 第 67 回宇科連, 2023.
- 3) H.Tsuchida, Differential FMCW-LiDAR for breaking the limit of laser coherence, Electron. Lett., vol.56, no.12, pp.614-616, 2020.
- 4) Eva Oton, et. al., Reliability of Liquid Crystals in Space Photonics, Volume 7, Number 4, 2015