

火星衛星探査機(MMX)用レーザ高度計(LIDAR)の FM 開発

生瀬 裕之¹, 黛 克典¹, 加瀬 貞二¹, 中島 雅浩¹, 檜根 久佳², 千秋 博紀³
水野 貴秀⁴, 名倉 徹⁵, 梅谷 和弘⁶, 小西 晃央⁷, 松本 晃治⁸, 野田 寛大⁸
荒木 博志⁸, 末次 竜⁹

¹ 日本電気株式会社 (〒183-8501 東京都府中市日新町 1-10)

² NEC プラットフォームズ, ³ 千葉工業大学, ⁴ 宇宙航空研究開発機構, ⁵ 福岡大学, ⁶ 岡山大学

⁷ 千葉大学, ⁸ 国立天文台, ⁹ 大島商船高等専門学校

Development of MMX (Martian Moons eXploration) LIDAR (FM)

Y. IKUSE¹, K. MAYUZUMI¹, T. KASE¹, M. NAKASHIMA¹, H. KASHINE², H. SENSU³
T. MIZUNO⁴, T. NAKURA⁵, K. UMETANI⁶, A. KONISHI⁷, K. MATSUMOTO⁸, T. NODA⁸
H. ARAKI⁸, and R. SUETSUGU⁹

¹ NEC Corp., 1-10 Nisshin-cho, Fuchu, Tokyo 183-8501

² NEC Platforms, ³ Chiba Inst. of Tech., ⁴ ISAS/JAXA, ⁵ Fukuoka Univ., ⁶ Okayama Univ.

⁷ Chiba Univ., ⁸ NAOJ, ⁹ NIT Oshima Col.

Abstract: LIDAR (Laser altimeter) for Martian Moons exploration (MMX) has been developed. It is based on HAYABUSA2-LIDAR (HY2-LIDAR). The dynamic range of the MMX LIDAR is from less than 100m to more than 100km, and wider than HY2-LIDAR. Therefore, it is necessary to increase output energy and improve laser quality compared with HY2-LIDAR. Furthermore, optical pulse detection circuit (ASIC including preamplifier, discriminator, and so on) of the MMX LIDAR is used “LIDARX” developed by ISAS/JAXA. This paper shows the configuration of the MMX LIDAR and the obtained test results.

Key Words: LIDAR, Laser altimeter MMX (Martian Moons eXploration)

1. はじめに

近年世界的に小惑星をはじめとした始原天体に対する小惑星探査機「はやぶさ」¹, 「はやぶさ 2」¹をはじめとした科学観測活動が行われている。これらの探査機には数十 km からの高度から距離測定が可能なレーザ高度計(以下 LIDAR)を搭載している。LIDAR はタッチダウン時の航法用センサ以外にも地形観測や重力測定等の科学観測にも利用される³。他にも時間方向に連続して観測を行うことで取得できるデータと天体形状モデルを 3 次元的に合わせることで探査機軌道を補正することも可能である。実際「はやぶさ 2」では精度の良い軌道として LIDAR データが他搭載機器のデータ解析にも利用されている⁴。

現在、日本では探査機による火星衛星の探査(Martian Moons eXploration: 以下 MMX)の開発が行われている⁵。MMX LIDAR は「はやぶさ 2」LIDAR の開発で 25km であった測距範囲をより遠距離である 100km とし、回線成立のためのレーザ出力増加と幅広いダイナミックレンジが必要となる。

2. MMX LIDAR

MMX LIDAR の要求性能を実現させるためレーザ発振器の設計を変更し、レーザ出力を増大させた。受信光検知器(APD)のプリアンプとして CSA (Charge Sensitive Amplifier)回路を内蔵している ISAS/JAXA 開発の光パルス用 ROIC (LIDARX)⁶を用いることで、幅広いダイナミックレンジを実現した。LIDARX を用いることで「はやぶさ 2」LIDAR では遠近 2 系統の光学系分離方式であったところを MMX LIDAR では 1 系統の光学系として回路によるゲイン制御によりダイナミックレンジを確保した。

MMX LIDAR の諸元を Table 1 に、外観を Fig. 1 に示す。

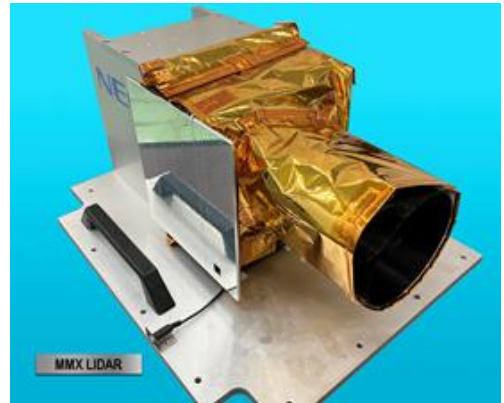


Fig. 1 MMX LIDAR

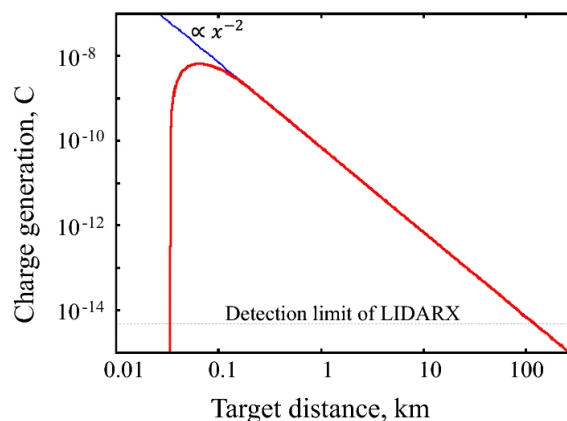
Table 1. Specifications of MMX LIDAR

Size, Weight, and Power consumption	
Size	$\leq 300 \times 300 \times 360 \text{ mm}^3$
Weight	$\leq 4.7 \text{ kg}$
Power consumption	$\leq 15 \text{ W @1Hz (Nominal)}$ $\leq 25 \text{ W @1Hz (Maximum)}$
Specifications	
Range	100m~100km
Resolution	$\leq 0.5\text{m}$
Range Accuracy	$\pm 2\text{m (@100m)}$ $\pm 22\text{m (@100km)}$
Repetition Frequency	$\geq 1 \text{ Hz}$
Output Energy	$\geq 20 \text{ mJ @EOL}$
Beam Divergence	$\leq 0.5 \text{ mrad}$
Pulse width	FWHM: $\leq 10 \text{ ns}$ 10% pulse width: $\leq 25 \text{ ns}$
Field of View	$1 \text{ mrad} +0.1\text{mrad}/-0\text{mrad}$
Energy Accuracy	$\leq 10 \%$

3. MMX LIDAR の設計

3.1 回線計算

MMX LIDAR では高度 100km 程度での軌道上運用を予定しており、回線が成立していることを示す。Table. 1 の主要性能及び「はやぶさ 2」LIDAR での実績をもとに受信エネルギーを計算し、LIDAR としての回線の成立性を検討した。計算結果を Fig. 2 に示す。100km において回線に余裕が 3 倍程度あることを確認し、レーザ発振器の出力を 20mJ 以上(EOL)として設計を行った。

Fig. 2 Link budget calculation⁷

3.2 レーザ発振器

「はやぶさ 2」LIADR では宇宙空間での熱真空環境で安定発振させるためパッシブ Q スイッチを採用した⁸。可飽和吸収体には、Cr:YAG を使用し、放射線耐性に優れた Cr コドーブの Nd:YAG (Nd,Cr:YAG) との接合により共振器内の部品点数を最小限にした。MMX LIDAR 用レーザ発振器でも本構成を踏襲して設計を行った。

MMX LIDAR 用レーザ発振器の主要諸元を Table. 2 に示す。

レーザ発振器は「はやぶさ 2」LIDAR では単結晶 YAG を用いたが、MMX LIDAR ではレーザ媒質の国産化を狙い、セラミックス YAG を用いたコンボジット結晶を採用した。

Table 2. Specifications of the Laser Oscillator

Laser Oscillator	Passive Q-Switch Cr: YAG
Wave length	1064 nm
Repetition Frequency	1 Hz
Output Energy	23 mJ
Pulse width	9 ns
Weight	250 g
Beam Divergence	~3.6 mrad

3.3 LIDARX

MMX LIDAR は APD のプリアンプとして LIDARX を採用した。LIDARX は幅広いダイナミックレンジを有しており、さらに内蔵の CSA ではのこぎり波の立ち上がりを利用して時間の内挿を行う。このため「はやぶさ 2」で行っていたデジタルサンプリングとは異なり、高速クロックを必要としない。また測距分解能も「はやぶさ 2」LIADR の 0.5m から 0.26m 以下に向上した。

なお内挿の計算には回路特性や温度依存性等を考慮した補正式を使用するチャンネル・ゲイン毎に事前に求めておく必要がある。入力電荷と LIDARX 出力電圧の関係の一例を Fig. 3 に示す。

Fig. 3 のようにチャンネル(AIN0, AIN1)・ゲイン(G0, G2, G8, G15)を変化させることで 1 チャンネルあたり 1 桁以上の (LIDARX には全部で 5 チャンネルあるため 5 桁以上) 入力電荷に対するダイナミックレンジを有する。チャンネル・ゲインの切り替えはコマンドによるマニュアル制御のほか、受信レベル (AOUT 出力値: Output Voltage) を検出して LIDAR が自律的に切り替える AGC (Auto Gain Control) 機能も有している。

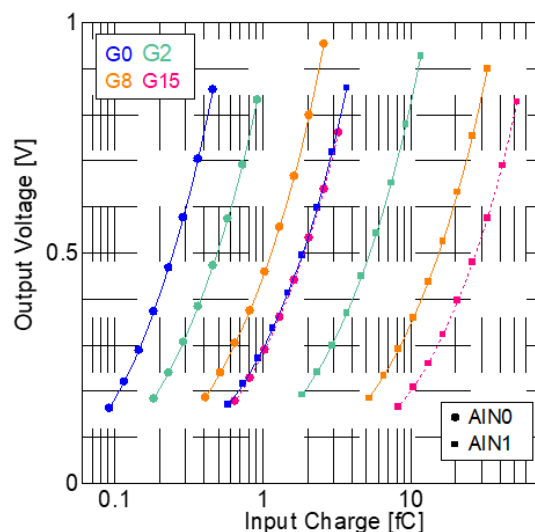


Fig. 3 Input Charge vs. Output Voltage of LIDARX

4. MMX LIDAR の試験結果

4.1 性能試験

MMX LIDAR ではテレメトリされる値を用いて距離計測やエネルギー測定を行うが、測距精度やエネルギー測定精度の補正式を取得する目的でミッション機器チーム(PI チーム)による較正試験を実施した。較正試験は Fig. 4 に示すコンフィギュレーションで行った。

MMX LIDAR からの送信光を光検知器で受信し、ディレイジェネレータ(Delay)のトリガとする。ディレイジェネレータで任意の遅延時間を設定することで測距距離を模擬する。任意波形発生装置(Pulse)では MMX LIDAR の送信光波形を模擬した波形を生成し擬似光源から MMX LIDAR の受信光学系に入力する。擬似光源と MMX LIDAR 受信光学系の間にスライドアッテネータを挿入することで任意のエネルギーを MMX LIDAR に入力することが可能である。測定に基づき、LIDARX の出力に応じた距離の補正式を各チャンネル・各ゲインで導出した。なお本測定では絶対量(システムオフセット・入力電荷量)までは模擬できないため、近距離の実測距を行い絶対量の測定も実施し補正式に盛り込んだ。

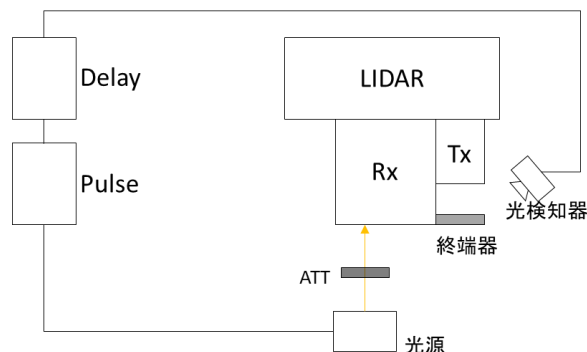


Fig. 4 Measurement Configuration

4.2 環境試験

宇宙環境で MMX LIDAR の性能が確保されることを確認するため、環境試験として振動試験及び熱真空試験を実施した。

4.2.1 振動試験

振動試験では印加前後での通信機能、レーザ性能および送受信光軸ずれの評価を行った。また印加中の通信機能も確認を行い、ロケットの打ち上げ環境に耐えうることを確認した。

4.2.1 熱真空試験

熱真空試験では打ち上げから発生する熱真空環境を模擬した試験を行った。MMX では遷移軌道でも LIDAR の運用が想定されるため、「はやぶさ 2」LIDAR では実施しなかった遷移軌道(高温⇄低温の遷移)を模擬した環境でも MMX LIDAR を動作させて試験を行った。試験は熱真空環境の高温時、低温時並びに遷移軌道においてレーザ性能及び送受光軸ずれの評価を行った。送受光軸ずれ評価の結果を Fig. 5 に示す。熱真空環境の低温時及び高温時に置いての送受光軸のずれは約 0.15mrad となっており、環境温度が変化しても送信光が受信視野内に収まることを確認した。

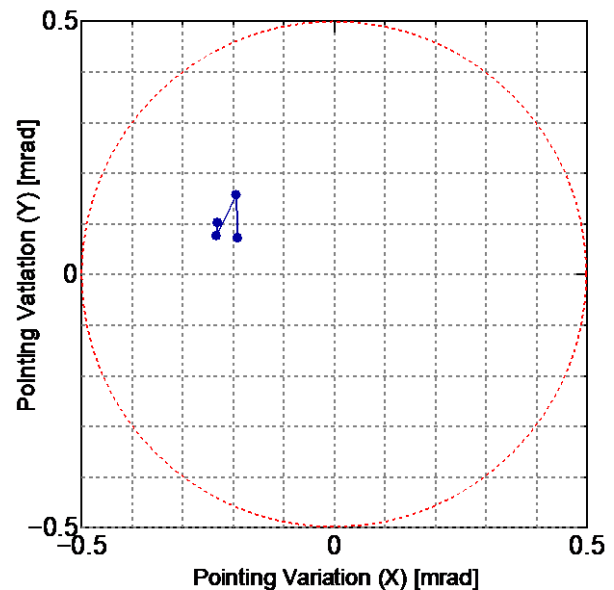


Fig. 5 Result of pointing variation

5. おわりに

「はやぶさ 2」LIDAR 等での実績をもとに MMX LIDAR 開発を行った。LIDARX を使用することにより、「はやぶさ 2」LIDAR では 2 系統あった受信光学系を 1 系統に集約したうえで「はやぶさ 2」LIDAR より幅広い測距レンジ(長距離からの測距)を実現することができた。LIDARX 採用にあたり、微弱な受信信号を検知できるよう回路設計のみならず構造も見直しを行った。長距離測距については、レーザ発振器の出力エネルギーを増大させることで開発仕様を満足した。LIDAR としてフライトモデルの開発は完了しており、今後システム試験を実施する予定である。本 LIDAR での測定が科学観測の発展に寄与することを期待する。

謝 辞

東海大学の青沼祐介氏、葛西海渡氏、渡部亜士阿氏には、校正用 LD 装置の製作および校正試験の実施にあたってご支援いただいたことを感謝いたします。

参考文献

- 1) T. Mizuno, et al.: Evaluation of LIDAR System in Rendezvous and Touchdown Sequence of Hayabusa Mission, Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences Vol.53 No.179 (May, 2010).
- 2) T. Mizuno et al.: Development of the Laser Altimeter (LIDAR) for Hayabusa2, Space Science Reviews Vol. 208, pp 33-47, (July, 2017).
- 3) H. Araki et al.: Observation of the lunar topography by the laser altimeter LALT on board Japanese lunar explorer SELENE, Advances Space Research, 42(2), pp317-322, (July, 2008).
- 4) K. Matsumoto, et al.: Improving Hayabusa2 trajectory by combining LIDAR data and a shape model, Icarus 338, 113576, 2020.
- 5) 川勝康弘, 他: 火星衛星探査計画 MMX の探査シナリオと概要, 第 64 回宇宙科学技術連合講演会 3D01, 2020.
- 6) 小川誠仁, 他: 光パルス検出用 IC "LIDARX" のシングルイベント特性評価実験, 電子情報通信学会ソサエティ大会, C-12-9, 2019.
- 7) H. Senshu, et al.: Light detection and ranging (LIDAR) laser altimeter for the Martian Moons Exploration (MMX) space craft, Earth, Planets and Space, 73: 219, 2021.
- 8) 加瀬貞二, 他: 「はやぶさ 2」LIDAR の開発, 第 58 回宇宙科学技術連合講演会, 3C17, 2014