

もう一つの月世界へ： 火星衛星探査計画MMX その10 ～LIDARとその周辺～

千秋 博紀¹

(要旨) 火星衛星探査計画(MMX)探査機搭載レーザ高度計(LIDAR)は探査機の高度を計測する装置で、装置の視野内に天体が含まれている際には継続的に測距を行う。測距可能範囲は100 mから100 kmと3桁に及び、測距の精度は高度100 kmでも1 m以下の見込みである。

MMXリレー記事としてレーザ高度計に関連する話題提供の依頼を頂いた。リレー記事なので査読無しで自由に書けるという。上に書いたような機器スペックの詳細や科学目標についてはすでに査読付きの論文として発表しているのでそちらをご覧ください[1,2]。また、機器開発で直面した困難や面倒ごとは、まだ生々しいので記事にするのは憚られる。これはもう少し時間が過ぎて優しい心をもって語れるようになった頃に、機会があれば紹介したいと思う。

本記事では少し視点を変えて、私がMMX探査機搭載LIDARの開発に携わることで勉強したLIDARの基礎知識やその周辺を紹介したいと思う。このような話題は科学論文のテーマにはなりづらく、査読者によってはバツサリ削除するよう指摘されてしまう。しかし実際の機器開発ではこれらの背景知識が必要であること、またこれらの背景を元に開発を進めていることがチーム外には伝わり難く、場合によっては「開発せずに買い物で済ませば良いんじゃないの?」という心無い言葉を頂く事もあり、この場を借りていろいろ披露したい。とはいえ紙面は限られているし、私の勉強も十分ではない。微に入り細を穿つ話を並べて読者を疲れさせるのも本意ではないので、表面的な話になる事はご容赦頂きたい。

ちょうど最近、LIDAR開発の工学的側面を担当

して下さっているJAXA宇宙科学研究所の水野先生がLIDAR技術に関する教科書を出版された[3]。興味がある方は是非そちらも参照して頂きたい。

・名称の話

LIDARとはLight Detection And Ranging(光検知と測距)の頭文字を取ったもので、私が「はやぶさ2」にかかわり始めた頃にはLIDARとすべて大文字で表記することが一般的だったように思う。近年、自動車の障害物検知機としてその名前が広く知られるようになったが、後発の車載装置ではLiDARとiを小文字にすることが多く、今となっては小さなiが主流となっているようだ。

名前の似ている装置にレーダーがある。レーダーはRadio Detection And Ranging(電波による探知と測距)の頭文字を取ったもので、こちらの方が長い歴史を持つ。また水中探査を行うソナーはSound Navigation And Ranging(音響誘導と測距)の頭文字を取ったものである。LIDAR、レーダー、ソナー(個人的好みで、LIDARだけアルファベット表記にした。以下同じ)は、いずれも最後がAR(And Ranging)であることからわかるように、距離を測定することを目的としている。装置から放出した光、電波、音波などがターゲット表面で散乱され、かえってくるまでの時間(Time of Flight; ToF)の計測から距離を計算するのだ。このため正

1.千葉工業大学惑星探査研究センター
senshu@perc.it-chiba.ac.jp

確には、これらの装置は距離を測る装置ではなくて時間を測る装置である。レーダーやソナーの場合には返ってきた波(シグナル)の強度を測ることも重要であり、対象物や魚群のサイズの推定に用いる。

LIDARはその語感から時々liderという誤記を見かける。実際検索してみると結構な数のサイトが(それも車載LiDARを製造・販売している会社のサイトまで)引っかかって、とても残念な気持ちになったりする。ちなみにドイツ語でleider(ライダーと発音する)は、「残念ながら」という意味の副詞(英語のunfortunatelyに相当)なのだそう。うーん、これもなんだか残念。

・レーザーとは

レーダーやソナーは1910年代から1920年代に実用化されているのに比べると、LIDARの歴史は浅い。これはレーザーの原理が提案されたのが1958年、実際にレーザー光を作り出すのに成功したのが1960年と、レーザーの歴史が浅いことによる。LIDARはその名前(定義)からすると射出するのはレーザーでなくても良いのだが、実際にはレーザーなしには難しい。レーザーは広がり角を小さく抑えることができるため、高いエネルギー効率と、太陽光の散乱などによる背景雑音に負けないシグナル強度が達成できる。

レーザーという名前もまた頭文字を取って作られた言葉で、元となっているのはLight Amplification by Stimulated Emission of Radiation(誘導放出による光増幅放射)である。LightがMicrowaveになるとメーザーと呼ばれる。残念ながらLIDAR同様、書き下した字面を見てもわかる人にしかわからない、原理を説明した名前になっているのだが、現象論的に言えば波長と位相が揃った(コヒーレントな)光のことで、結果として指向性と収束性に優れている。なぜコヒーレントだと指向性と収束性が高いのかについてちゃんと説明すると長くなるのでここでは踏み込まない。上に書いたように、LIDARにとっては光束を細く絞れることが重要である。

宇宙機搭載のLIDARではNd:YAGレーザーが使われることが多い。Nd:YAGはYttrium Aluminum Garnet結晶($Y_3Al_5O_{12}$)にNdイオンを

ドープして得られるレーザー結晶である。結晶をレーザー媒質とする固体レーザーは、LD(レーザーダイオード)を使う半導体レーザーに比べると大きな出力を得られ、また気体分子を使うガスレーザーに比べると装置が小型で済む。さらにNd:YAGは熱伝導率が高く経年劣化が少ないという特徴がある。

Nd:YAGレーザー光の波長は1064 nmで、赤外光のため肉眼では見ることができない。このため実験では、赤外線に反応して光るセンサーカードをかざすか、赤外線をとらえることができるカメラで撮影するなどして光路を確認する必要がある。肉眼で見ることができないにもかかわらず、レーザーが直接目に入ると失明の恐れがある。油断は禁物である。レーザーの励起に使うのは波長808 nmの光で、MMX LIDARの場合にはLDを使う。ただしLDの発振波長は温度依存性がある事が知られており、LD周辺部を適切な範囲内に温調する必要がある。

レーザー媒質は鏡で挟まれており、十分に励起された状態で一方の鏡を外すと外部にレーザーが出力される。単純にはシャッターを入れる方法や電気操作で透明になる鏡を入れる方法(アクティブQスイッチ)が考えられる。この方法は、射出タイミングは完全に調整できる一方、レーザー媒質中のエネルギー状態が保証されないため、レーザーのエネルギーにばらつきが生じる。また、はやぶさ(2ではなく小惑星イトカワを探査した初代のほう)搭載LIDARの経験によれば、アクティブQスイッチは保存温度条件が厳しい。これに対してMMX LIDARでは、鏡の一方を可飽和吸収体で構成するパッシブQスイッチを採用した。可飽和吸収体はレーザー媒質中のエネルギー密度がある値よりも高くなると急速に透明になり、光を透過させる性質がある。Nd:YAGレーザーの場合にはCr:YAGが可飽和吸収体として用いられる。この方法は、射出されるレーザーのエネルギーはほぼ一定になる一方で、レーザー媒質の励起速度のばらつきから発振時間の不定性が生じる。そこでMMX LIDARでは、送光と受光をそれぞれ検知して、シグナル間の時間差を計測している。

・測距の幾何学

細く絞られたレーザーと、レーザー広がり角よりは

視野が広い望遠鏡を備えた受光部とを組み合わせると、レーザーが照らす領域(フットプリント)を全て受光望遠鏡の視野に収めることができる。つまり装置からターゲットまでの間にはエネルギー損失がない。受信エネルギーはターゲット表面からの散乱光の幾何減衰、つまり距離の2乗による減衰で求められる。ちなみに、ターゲット表面にフットプリントより小さな鏡が置かれているケースでは、鏡に投入されるエネルギーが距離の2乗で減衰するため、受信エネルギーは往復で距離の逆4乗で減衰する。探査機がターゲット表面に近づく場合には受信エネルギーが距離の4乗で増加することになるため、装置がダメージを受けないように配慮する必要がある。

・測距精度

最初に述べたように、LIDARはレーザー送信からシグナル受信までの時間を正確に測る事で距離を得る。つまり測距精度は時間をどれだけ正確に測れるのかで決まる。はやぶさ2搭載LIDARの場合には、300 MHzのデジタル回路でシグナル検知を行った。つまり時間の精度は3.33 nsであり、往復距離に直すと測距分解能は0.5 mである。単純には、周波数を10倍にすれば測距分解能は1/10になる。地上品(車載LiDARなど)であればそれも可能だが、宇宙機に於いては高周波のクロックを使用すると放射線の影響を強く受けること、また高周波の回路は発熱が大きくなることなどあり、単純にデジタル回路の処理速度を上げて分解能を高めるというわけにはいかない。

MMX LIDARでは、シグナル検知部分にJAXAが開発したLIDARXという集積回路を使っている。その内部ではシグナルをアナログで検知したら三角波を立ちあげ、その高さをデジタルで(クロックのタイミングで)読みだす。三角波を逆にたどる事で、早いクロックを用いなくてもシグナルのタイミングを高い精度で求めることができる(挙動の詳細については[4]を参照して頂きたい)。

・パルス幅

高い時間分解能が達成されるようになると、改めてシグナルとは何か?を考える必要が出てくる。射出するレーザーのパルス幅は10 ns程度あるため、パル

スのどこを測るのかによって、1 m程度かそれ以上の不定性(ジッター)が生じる。送信光についてはレーザーの波形はあまり変化しないと思えば、ある強度を閾値としてそれを越えたところでシグナルと判断(立ち上がり検知)すれば不定性を抑えることができる。しかし受信光の強度はターゲットの反射率・ターゲットまでの距離によって変化する。ターゲットが傾いている場合には、レーザーフットプリントの中で距離に分布ができるため、返ってくる光は時間方向に引き伸ばされ、波高は低くなる。立ち上がり検知の場合、受信光の波形が予測できていないと不定性が除去できないが、そもそもターゲットまでの距離や反射率、ターゲットの状態を知りたくて観測を行うので堂々巡りである。はやぶさ2搭載LIDARでは、立ち上がり検知のタイミングの他に受信エネルギーを測定し、その値を使って距離補正を行っていた。しかしターゲットの傾きによってパルスが伸びる効果はきちんと考慮されているとは言えず、結局、解析ではレーザーの入射が大局的な地形に対して鉛直に近いものを選んで利用するなどの工夫が必要である。

パルスの立ち上がりではなくてピークを検知すれば良さそうだが、話は単純ではない。レーザーのエネルギー分布には高調波が乗る事があり、また測定にはノイズが乗り得る。このためどこでエネルギー分布が平らになったのか、または上昇から下降到に転じたのかを判別するのは容易ではない。MMX LIDARが採用したLIDARXでは、シグナルを時間方向にフィルターをかけて(帯域を絞って)積分することで滑らかにして、それを微分してピークを検出するという工夫を行っている(これも挙動の詳細については[4]を参照して頂きたい)。時間波形をいったん書き出して、それを読み直して演算するのであれば難しい話ではないかもしれないが、サイズも電力も限られた宇宙機にはもちろんそんな贅沢は許されない。アナログ回路で逐次処理しなければならない。

・基板設計

LIDARは数nsのごく短いパルスを検出したり、数fC(10^{-15} クーロン)というごく小さな電気パルスを検出したりする必要がある。このため基板設計の際には、パルス電流が流れる部分の近傍にはアンテナになってしまうような配線ができないよう気をつけ、ま

た特にノイズから守るべき場所は素子の配置や配線に気をつける。一方で宇宙機はなるべくサイズを抑える必要がある。さらに、金属の中を電流が伝わる速度は真空中の光の速度と同程度のため、測距精度が1 mよりもずっとよくなってくると、基板の中の回路長も気になり始める。余談だが、試験の際にオシロスコープの位置を変えたら測距値が変化してびっくりしたことがある。配置の都合でオシロスコープと装置を繋ぐBNCケーブルを長いものに替えたためと分かった時は、なるほど電流も有限の速度で伝わるのだと妙に感心したのを覚えている。

MMX LIDARチームには岡山大学(当時)の梅谷先生と梅谷先生の学生だった小西さんに入っている(2025年現在、梅谷先生は九州大学、小西さんは崇城大学にそれぞれ移られた)。彼らはアナログ基板の設計ができる貴重な存在で、先ず彼らがテスト基板を何通りか作り、その結果を元にメーカーがLIDARの基板を作ることにした。この方式が功を奏して、LIDARは雑音が少なく感度の高い装置に仕上げることができた。ケーブルの違いで結果が変わったことにびっくりするようなシロートの私から見ると、魔法のような技法であった。

・フィールド試験

装置が組み上がったなら試験を行う。LIDARはコマンドを受けたらレーザーを射出し、シグナルを待つ。シグナルを検知したら送光から受光までの時間を始めとする種々のデータを取りまとめて観測データとして出力する。これだけなら実験室で模擬試験をできそうに思える。しかし理想的な条件が揃った室内実験で達成できたことが、実際の条件ではうまくいかないというのも、よくある話だ。そこでMMX LIDARでは、フィールド試験を実施した。試験は北海道大樹町にある大樹航空宇宙実験場の長さ1 kmの滑走路を借り切って行った。

滑走路の一方の端にテントを立て、LIDARを設置。滑走路にライン引きで一定間隔ごとに目印を入れる。準備ができれば反射率が既知の拡散板を載せた台車を、ライン引きで付けた目印に沿って動かしてゆく。LIDARからのレーザーは直視すると失明の恐れがあるため、台車を押す係は防護用のゴーグルをかけ、念のため肌を守る厚手の服を着る。見るからに

アヤシイ。滑走路は1 kmしかないため、レーザーの出力をフィルターで調整しながら、滑走路の端から端まで1日に何度も台車を往復させる。近くを一般車が通過する際には速やかに実験を中断させるため、滑走路の隅には同じく緑色のゴーグルをかけ、ヘルメットをかぶった監視要員を配置する。

実にアナログな試験だが、こうして得られた結果を元に装置アルゴリズムが調整される。探査は実験室で行うんじゃない、現場で行うのである(ちと古いか)。

・最後に

MMX LIDARチームにはLIDAR開発専門家はもちろん、基板の専門家や、紙面の都合で紹介できなかったが集積回路の専門家、他ミッションでのLIDAR運用の経験者など、背景の異なる人々が含まれている。開発や運用に関連した基礎知識や注意点、嵌りやすいポイントは文章として残すこともできるが、不測の事態が生じた際に速やかに違和感を感じ取る事ができるか、問題の本質に気付けるか、解決方法に至れるかどうかは結局、経験の差が大きい。このため背景の異なる人々が協力して、一緒に頭を悩ませられる環境が望ましいし、開発を進めていて楽しい。

とはいえ、経験を積むためには開発や運用に参加する必要がある。本記事は、まだ経験が浅い人にとってLIDARの敷居が少しでも低くなればと思い、背景や周辺的话题を書き連ねた。これをもってLIDARの原理が全て分かったつもりになってもらいたいという事ではなく、本記事をきっかけにLIDARの開発や運用に興味を持ち「いっちょ参加してみるか」と思って頂けたら幸いである。一緒に経験を積んでくれる人、大募集。

- [1] Senshu, H. et al., 2021, EPS 73, 219.
- [2] Senshu, H. et al., 2025, PEPS 12:34.
- [3] 水野貴秀ほか, 2025, これで使える3D LiDAR技術 (科学情報出版)。
- [4] Mizuno, T. et al., 2024, IEICE Transactions on Electronics, 2024ECP5028.

著者紹介

千秋 博紀

千葉工業大学 惑星探査研究センター 主席研究員・副
所長. 東京大学 大学院理学系研究科 地球惑星科学
専攻 博士課程修了. 博士(理学). JAMSTEC, 東京
工業大学, サイバー大学, 北海道大学を経て, 2009年
4月より現職. 専門は惑星科学・惑星探査. 数値計算
で面白いことができそうなら何でも. 日本惑星科学会
情報化専門委員長.