

小型衛星同士と地球までの間をつなぐ レーザーリンク

ジェフ・ヘクト

レーザーによって小型衛星間を接続するには、まだ多くの課題を克服しなければならないが、その取り組みは進歩している。

初めての長距離海底光ファイバケーブルによって、遅延の低下と帯域幅の増加が実現され、それまで対地同期衛星を経由して伝送されていた国際通信トラフィックが、地球上で伝送されるようになったのは、30年前のことである。現在、小型衛星のコンステレーションを低地球軌道に打ち上げることによって、再び宇宙で通信を行い、さらなる遅延の低下と帯域幅の増加によって、ブロードバンドインターネットサービスが利用できない約半数の世界人口にインターネット接続を提供することが、計画されている。それらの衛星間のレーザーリンクは、このシステムのバックボーンを形成する(図1)。

宇宙におけるレーザー通信という概念は、1960年にレーザーが誕生し、セオドア・メイマン氏(Theodore Maiman)が

潜在的用途としてそれを提案したときにさかのぼる。しかし、最初の衛星間レーザーリンクが、低地球軌道上の2つの衛星(欧州のレーダー衛星 Terra SAR-X と米軍の衛星 Near Field Infrared Experiment[NFIRE])の間でようやく実証されたのは、2008年のことだったと、独テサット・スペースコム社(Tesat Spacecomm)のレーザー通信システム担当製品マネージャーを務めるフィリップ・ビラー氏(Philipp Biller)は述べた。テサット社が供給したレーザーターミナルは、平均で25秒未満で、互いにロックオンして5.6Gbpsの速度で双方向に伝送を開始することができたという。テスト実行は、2基の宇宙船が互いの見通し線上にある限り、平均で約20分間継続し、その間、両者の間のレーザーリンクは約80°回転した。

実験は数カ月間続けられ、符号誤り率(BER)は、最大8000kmの距離で10~8未満だった。

NASAは2013年、LLCD(Lunar Laser Communication Demonstration)によって月からのデータを622Mbpsで送信し、深宇宙における初のレーザーリンクを実証したことで、大きく報道された。それは、無線波で可能なデータ速度として大きな進歩だった。

最初の商用レーザー衛星間リンクである蘭仏エアバス社(Airbus)の「Space DataHighway」は、2016年に運用を開始した。テサット社のレーザー通信ターミナルを使用して、低地球軌道上の4基の衛星によって収集された優先度の高い画像データを、地上に無線伝送するための対地同期軌道上の中継装置に、最大1.8Gbpsの速度で送信する。低衛星軌道内の高速レーザーアップリンクは、対地同期衛星を追尾するため、画像をすばやく中継することができ、地上局に引き渡すために待つ必要がない。続いて同期軌道では、高速マイクロ波リンクによって、画像を地上のクラウドサーバーに中継することができる。2019年には2基目の対地同期衛星が追加され、中継速度が向上した。

一方、宇宙におけるレーザー通信をめぐっては、飛躍的な新しいビジョンが出現している。レーザーでリンクされた低地球軌道衛星を使用して、光ファイバケーブル網が敷設されていない地域にブロードバンドインターネットなどのサービスを提供しようというものである。主に2つの要因によってそのトレンドが推



図1 低地球軌道上の衛星間をつなぐレーザーリンクは、地球までの無線リンクとともに世界ワイヤレスネットワークのバックボーンを形成する。(提供: マイナリック社)

進されていると、米MITリンカーン研究所(MIT Lincoln Laboratory)のティム・ヤーン氏(Tim Yarnall)は指摘し、次のように述べた。「米スペースX社(SpaceX)が打ち上げサービス業界に破壊をもたらし、はるかに安価に低地球軌道にアクセスできるようになった。また、小型衛星開発の推進に伴い、低地球軌道で動作するシステムの構築に必要なすべての要素を開発するベンダー基盤が形成された」。

数千の衛星で構成される コンステレーション

数百または数千の小型衛星を地上300～2000kmの軌道で運用し、任意の時点で少なくとも1つの衛星が上空で必ず稼働している状態を維持するというのが、その概念である。衛星は、衝突を避けるために異なる高度と位置に配置された複数の軌道上で、地球の周りを周回する。各周回軌道上の衛星は等間隔に配置されるため、常に1つ、または2つの隣接する衛星が、レーザーリンクの視野内にある状態になる(図2)。個々の地上局は、上空を通過する衛星と接続して信号を送信し、その衛星が範囲外に移動すると、それと同じ軌道上の次の衛星に接続を切り替える。宇宙に送信された信号は、一連の衛星間リンクを介して、目的地の上空を通過する衛星まで中継され、その衛星からその場所の地上局に届けられる。

地上局と衛星の間は、雲や降雨によって大気中の光信号が遮られる恐れがあるため、おそらくマイクロ波リンクが採用される。衛星間にマイクロ波リンクを用いる構想も提案されている。しかし、大気圏外の衛星間リンクに対し、レーザーリンクには無線周波数を上回る重要なメリットがある。つまり、伝送帯域幅が広く、受信機が小さく、

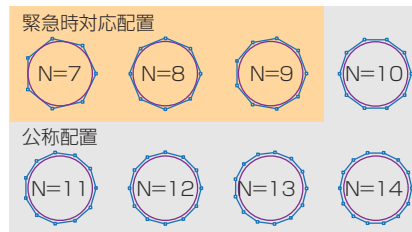


図2 低軌道衛星は、世界中に信号を中継できるように、等間隔に配置される。7～9基の衛星が配備された軌道上で、1つ前と1つ後の衛星が常に視野内に存在する。10～14基の衛星からなる軌道には、冗長性を持たせることが可能である。その場合は、各衛星を常に前2つと後2つの衛星にリンク可能とすることで、1基の衛星が故障してもリンクが途切れないようにする。(提供: MITリンカーン研究所のティム・ヤーン氏)

ビームの集束性が高いのでセキュリティが高いことだ。光帯域における最大の課題は、コンステレーション全体が宇宙空間を移動し、各衛星に最も近い衛星が変わり続ける中で、隣接する衛星の間のレーザー接続を維持しなければならないことである。

この計画により、今日の衛星電話システムの限られた帯域幅が飛躍的に拡大される予定で、既存のケーブルによって十分なサービスが提供されていない広い地域(アフリカのほぼ全域、中央アジア、北極圏、米国中部の農村地域)に、ブロードバンドサービスを提供したいと考える企業から広く関心を集めている。米フェイスブック社(Facebook)は当初、高空飛行ドローンからの伝送を提案していたが、現在は衛星を検討している。米グーグル社(Google)の「Project Loon」は、気球を18～25kmの高度に配置するもので、ケニアの通信事業者であるTelkom Kenyaと農村地域にサービスを提供する契約を交わしている。数百または数千の低軌道衛星群は、はるかに広い地域を網羅できる可能性があり、遅延も0.25秒という対地同期軌道までの往復時間よりもはるかに低くなる見込

みである。

米アマゾン社(Amazon)、米ボーイング社(Boeing)、スペースX社が、数千基の小型低軌道衛星に関する計画を発表しており、フェイスブック社もこれに関心を示している。2019年5月初頭のAviation Week誌の集計によると、32の企業によって合計1万3529基の小型通信衛星を低地球軌道に打ち上げる計画が提案されているという。その時点では、軌道上の実験衛星はわずか数基だったが、2019年5月23日にスペースX社が「Starlink」システム用の60基の実験衛星を打ち上げ、その後3回の打ち上げでさらに衛星を追加した。これらの衛星には、最終システムで予定されているレーザー送信機が搭載されていないが、内蔵エンジンによって440kmの切り離し地点から550kmの最終軌道までの移動に成功している。はるかに多くの衛星が打ち上げられる予定で、スペースX社は現在、当初計画していた4400基に約7500基を追加すると語っている。そうなれば、Starlinkコンステレーションを構成する衛星は、合計1万2000基弱となる。

レーザーハードウェア

無線周波数伝送のほうが安価だが、レーザーのほうが少し広い帯域幅を提供できる。そこでレーザー開発者は、マイクロ波のデータ速度を上回ることができるように、10Gpsのデータ速度を目指している。

計画されている衛星間レーザーリンクは、地上の光ファイバシステム向けに開発された技術に主に基づいている。MITリンカーン研究所のティム・ヤーン氏によると、開発中のほぼすべての送信機が、分布帰還型(distributed feedback:DFB)半導体レーザーにファイバ増幅器が続く構成をベースとしてい



図3 マイナリック社の地上配備ターミナル「Rhino」。(提供：マイナリック社)

るといふ。1550nmのエルビウム帯域と1030～1080nmのイッテルビウム帯域の両方が、検討されている。「1550nmの良好な製品が多数提供されているが、出力は1μmで生成するほうが容易だ」と同氏は述べた。テサット社は、対地同期軌道までの長距離中継に1064nmのLD励起固体(Diode Pumped Solid State：DPSS)レーザーを使用している。標準化団体である宇宙データシステム諮問委員会(Consultative Committee on Space Data Systems：CCSDS)は最近、波長を隔離するために、軌道からのダウンリンクに1550nm、アップリンクに1μmを使用することを推奨した。しかし、技術はまだ進化過程にある。

7～15kgのターミナルによって、4500kmの衛星間リンク上で10Gbpsの送信が可能だと、独マイナリック社(Mynaric)のポール・コーンウェル氏(Paul Cornwell)は述べている。マイナリック社は、航空宇宙向けのワイヤレスレーザーリンクを開発するために10年前に設立された企業である。「将来的にはテラビットの速度が実現される」と同氏は述べた。同社は100Gbpsを見据えているが、同社の現行製品は10Gbpsで動作する。図3は、マイナリック社の地上配備のレーザーターミナルである。

「指向、捕捉、追尾が、宇宙レーザー通信における最も難しい問題だ」とヤーマル氏は述べた。指向性と出力パワーの間に、基本的なトレードオフが存在する。ビームの拡がり角が狭いほど、標的に達するパワーは高くなるが、より厳しい要件が課されるのは指向性の方である。レーザー拡がり角は10μradにまで絞ることができる。「それで、当社が支援するNASAの(深宇宙)プログラムに対応できる可能性がある。サイズ、重量、出力は重要な問題であるため、全方向に出力パワーを放散するよりも、最大限の性能を引き出せるように、非常に複雑な指向制御システムを使用させてもらっている」と同氏は述べた。

低地球軌道上の数百または数千の衛星コンステレーションは、経済面においてかなり特異である。軌道は数年以内に劣化するため、衛星を頻繁に交換する必要がある。コストを制御するために、衛星は小型でなければならず、量産して大量に打ち上げなければならない。その一方で、軌道上の隣接衛星との通信に合わせて送信機を適切に調整できるように、十分に洗練されている必要がある。また、1基の衛星が故障しても機能し続けるか、直ちに復旧できるように、システムに十分なレジリエンスが求められる。

要するに、一連の厳しい要件が課される。計画されているコンステレーションは、重量500kg以下の「スモールサット」(smallsat)をベースにしなければならないというのが、一般合意のようである。その重量は、EuropeanDataHighwayの対地同期衛星の5300kgの10分の1弱で、十分に小さいので、一基のロケットで複数打ち上げてコストを削減することができる。スペースX社のStarlink衛星は227kgで、4本の中継リンクを搭載する予定である。中継リンクは、軌道上の前後の衛星までの2本と、他の軌道の最も近い衛星までのさらに2本である。各レーザーターミナルの重量が7～15kgであるため、中継リンクは30～60kgで、衛星全体の8分の1から4分の1に相当する。電源、指向と追尾、制御システム、推進などの装置が、残りの重量を占める。

ほとんどのアーキテクチャで、低地球軌道から地上局までの無線周波数ダウンリンクが必要になる。雲や降雨の中で、無線は信号伝送が可能だが、レーザーダウンリンクは信頼性に欠けるためだ。しかしテサット社は例外で、最大10Gbpsでの地上局への送信が可能で、受信機のロックオンを支えるアップリンクビーコンを備えた「Tosiris」レーザーダウンリンクを提供している。ピラー氏によると、天候に対応するために、信号が伝送される地域に複数の地上局を設置し、大気が最もクリアで信号が受信しやすいサイトをシステムが選択するという。システムは、衛星情報をダウンロードするように設計されているため、アップリンクは数Mbpsしか必要ではなく、こちらもレーザーによって伝送される。図4はテサット社のレーザー送信機で、一方は低軌道から地上用、もう一方は対地同期衛星間用である。

キューブサット通信

「キューブサット」(cubesats)と呼ばれる10×10×10cmのモジュールで構成される衛星は、レーザガイド星の研究などのプロジェクト用に、安価に宇宙にアクセスできるとして、脚光を浴びているが、通信用にも試験されている。MITのSpace Telecommunications, Astronomy, and Radiation Laboratoryのケリー・カホイ教授(Kerri Cahoy)のグループも、キューブサットからの指向レーザビームを最適化して、ビーコン追尾誤差を、平均16 μ radまで低減するツールを開発している。テサット社は、低地球軌道から地上局を経て不特定の米国顧客まで100Mbpsで伝送可能な、360g、9.5×9.5×3.25cmのレーザ通信ターミナルを供給済みである。

しかし、キューブサットは小さいため、コンステレーションでの有用性が限られる。「キューブサットはパワー不足であることがよく知られている」とヤーナル氏は言う。それが、送信機や、コンステレーション内の他の衛星と接続するための制御システムの設計に制約を与える。ピラー氏は、キューブサットの通信は、地球観測やモノのインターネット(Internet of Things: IoT)用の低データ速度のリンクに使えが、コンステレーションにはそれよりも大きな「スモールサット」が必要だと考えている。

計画と展望

一部の大規模計画の詳細は、いまだ漠然としている。ボーイング社は、約3000の低地球軌道通信衛星のコンステレーションに関する計画を米連邦通信委員会(Federal Communications Commission: FCC)に申請済みで、1550nm帯で動作する地上局と低軌道

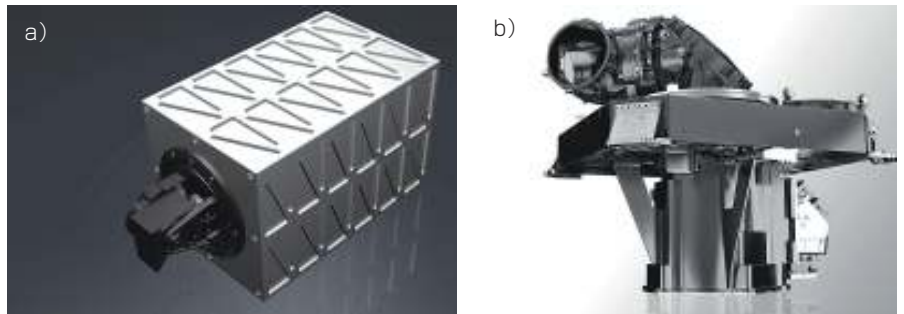


図4 テサット社のレーザターミナル。(a)は、低地球軌道から地上までの伝送用の10Gbpsターミナル「TOSIRIS」、(b)は、最大8万km離れた対地同期衛星間の伝送用のターミナル「LCT135」。(提供:テサット社)

衛星用のレーザ通信装置を開発する米ブリッジコム社(Bridgecomm)に出資している。アマゾン社は、「Project Kuiper Systems LLC」という3236基の衛星群に関する計画を申請済みである。高度590km、610km、630kmの軌道に衛星を打ち上げて、北緯56度から南緯56度までに居住する世界人口の95%にサービスを提供する計画だ。しかし、そのどちらの大規模コンステレーションについても、それ以外の詳細はほとんど明らかになっていない。他にも多数の企業が、装置を構築したりレーザリンク衛星を打ち上げたりの計画を、ひそかに進めている。

レーザを利用しない計画も存在する。米ワンウェブ社(OneWeb)は、882基(18の軌道面に49基ずつ)の低地球軌道衛星のコンステレーションを計画していたが、エンドユーザーを衛星経由で地上のゲートウェイまでマイクロ波で接続する予定で、衛星間接続は利用しない。ワンウェブ社は、2019年7月16日に6基の実験衛星を打ち上げ、2019年12月以降、30基以上を定期的に打ち上げることを計画している。

米国防高等研究計画局(DARPA)は、軍事通信と軍事活動が大型で脆弱な対地同期衛星に依存しすぎていることを懸念し、「Blackjack」プログラムで、低地球軌道にグローバルな高速ネット

ワークを構築する計画を進めている。商用技術が活用可能で、対地同期軌道上のいくつかの格好の標的に依存しない、より柔軟で弾力性のあるシステムを構築することがその目標である。

低地球軌道衛星用の第1世代の商用レーザ通信ターミナルが、現在開発されている。「予定を示すのは難しい」とコーンウェル氏は述べたが、2020年4月までに10Gbpsのレーザターミナルの認可を完了し、同年中に生産を開始したいと、マイナリック社は考えている。テサット社は2020年に、国際宇宙ステーションで10GbpsのTosiris衛星ターミナルの試験を行う計画である。実際のハードウェアの生産がまもなく開始されるはずだ。未来の5Gネットワークに、その能力が活用される可能性がある。

計画されている約2万の衛星のすべてが打ち上げられるとは考えにくい。しかし、そのすべてが10Gbpsで動作し、それぞれが1つのチャンネルを伝送するとすれば、合計容量は200Tbps規模となる。その容量は、現時点でケーブル1本あたりの容量が世界最大である「Pacific Light Cable」の6本すべてのファイバペアを合わせた144Tbpsよりも、約35%高いだけにすぎない。コーンウェル氏が「未来はテラビット速度だ」と述べるのも当然である。