低軌道衛星を用いる衛星IoTプラットフォーム技術

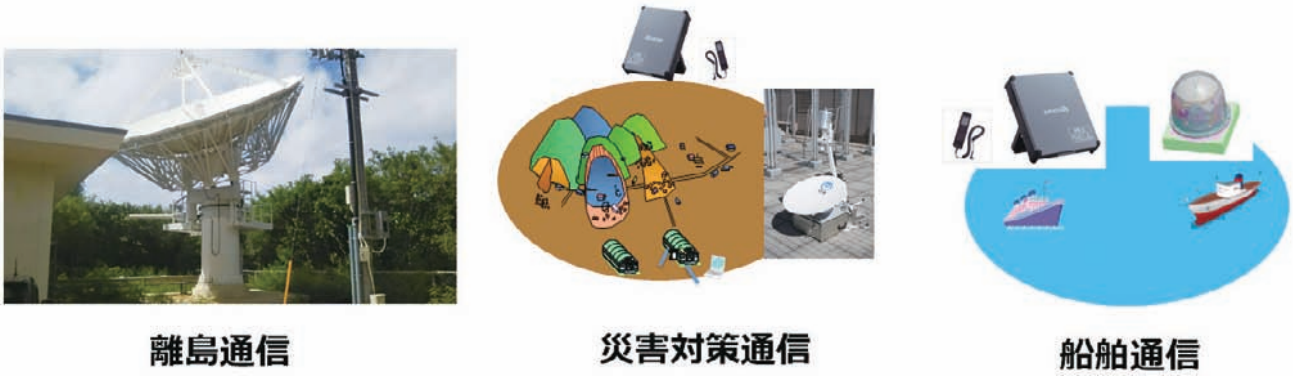
日本電信電話株式会社　アクセスサービスシステム研究所 主幹研究員　山下（やました）　史洋（ふみひろ）

1. はじめに

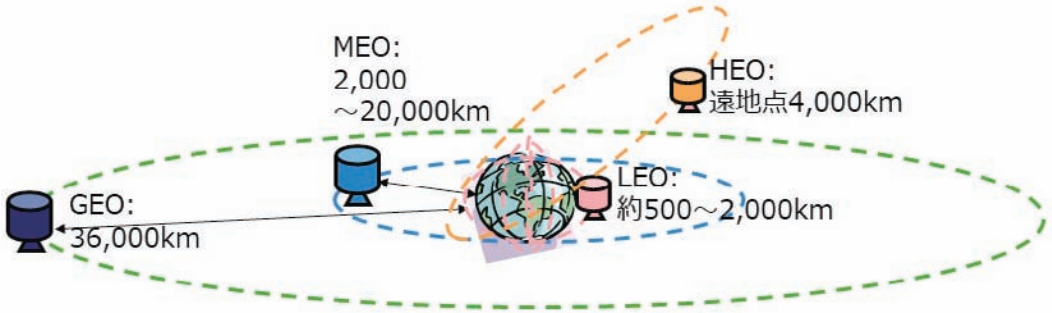
一般に衛星通信の特長は、災害時に有効な通信手段となる耐災害性、屋外に端末を設置するだけで通信できる機動性、サービスエリアが広く上空が見えれば通信できる広域性、の3つに大別される。NTTグループではこの耐災害性、機動性、広域性に優れた衛星通信を用い、離島、被災地、船舶など地上インフラではサービス提供が難しい地域に対して1980年代からサービス提供してきた（**図1**）。しかしながら2000年代になると国土が狭い日本では光ファイバや携帯網が急速にインフラとして発展し、その結果、衛星通信の需要が徐々に縮退した。衛星通信は災害時や船舶など他に代替えできないサービス領域では社会的意義が高いため、通信手段としては今後も必要とされるが、日本における平時需要の縮退を受け、NTT研究所においても通信衛星そのもののR&Dから、限られた周波数帯域でより多くのユーザを収容する効率的な通信方式や可搬性に優れた地球局装置のR&Dに方針転換した。

一方、世界においては日本と事情が少し異なる。2000年代になると携帯電話の急速な普及に対して地上インフラが十分に追従できず、機動性・広域性の特長を有する衛星通信の利用が増加した。現在は5G通信サービスを、衛星を介して提供するための標準化が3GPPで進められている。今後、6G時代の超カバレッジサービスでは携帯電話と衛星通信の親和性が増し、衛星通信の重要性がより高まることが予想される。

次に、衛星通信だけでなく宇宙利用・ビジネスの観点で考察すると、近年世界的に宇宙ビジネスが拡大し、市場規模も約37兆円（2016年度）から約120兆円（2040年度）への成長が期待されている。日本においても宇宙計画基本法を約10年ぶりに更新し、日本の宇宙産業を2030年代早期に倍増させる計画を打ち出している。この宇宙計画基本法は4つの柱で構成されており、キーワードとして宇宙安全保障、災害対策・国土強靭化、宇宙科学・探査、経済成長とイノベーション等が上げられている。宇宙安全保障は、通信・測位・観測等を活用した情報収集であり、災害対策・国土強靭化は、地震等の大規模災害のみならず、近年深刻化している台風や洪水等においても衛星を活用して被害を最小限にすることを目的としたものである。さらに宇宙科学・探査としては、『はやぶさ2』のような宇宙探査技術による世界貢献であり、経済成長とイノベーションでは、これまで国主導で蓄積した地球観測データを民間に開放し、AI等と組み合わせて新たな経済成長を目指す。いずれの分野においても、衛星－地上や衛星－衛星間をつなぐ衛星通信は重要な役割を果たすことから、今後の宇宙利用・ビジネス成功の鍵と考えられる。



■図1. NTTグループにおけるインフラ衛星通信



・静止軌道衛星　(GEO：Geo-Stationary Orbit)
・低軌道衛星　(LEO：Low Earth Orbit)
・中軌道衛星　(MEO: Medium Earth Orbit)
・長楕円軌道衛星 (HEO: Highly Elliptical Orbit)

■図2. 主な衛星軌道種別

2. 低軌道衛星を取り巻くトレンド

一般に、衛星軌道は下記4つの軌道に大別される（**図2**）。

・静止軌道衛星（GEO：Geo-Stationary Orbit）
・低軌道衛星（LEO：Low Earth Orbit）
・中軌道衛星（MEO：Medium Earth Orbit）
・長楕円軌道衛星（HEO：Highly Elliptical Orbit）

静止軌道は上空高度約36,000km、低軌道は500km～2,000km、中軌道は2,000km～20,000km、長楕円軌道は遠地点で～4,000km程度と規定されている。本稿では高度500km程度の低軌道衛星を前提に話を進めるが、近年の低軌道衛星のトレンドは2つに大別される。1つは数十～数千の通信衛星を用いてグローバルにサービス提供するコンステレーションであり、もう1つは小型衛星を用いた地球観測である。前者の代表的なものは古くはIridiumであり、最近ではStarlinkやAmazon Kuiperである。近年コンステレーションが本格化してきたのはロケットの再利用等による衛星打ち上げコストの低減や、工場における衛星製造のFA化が大きい。1回に60機の衛星を同時に打ち上げる様子もWebで公開されている。

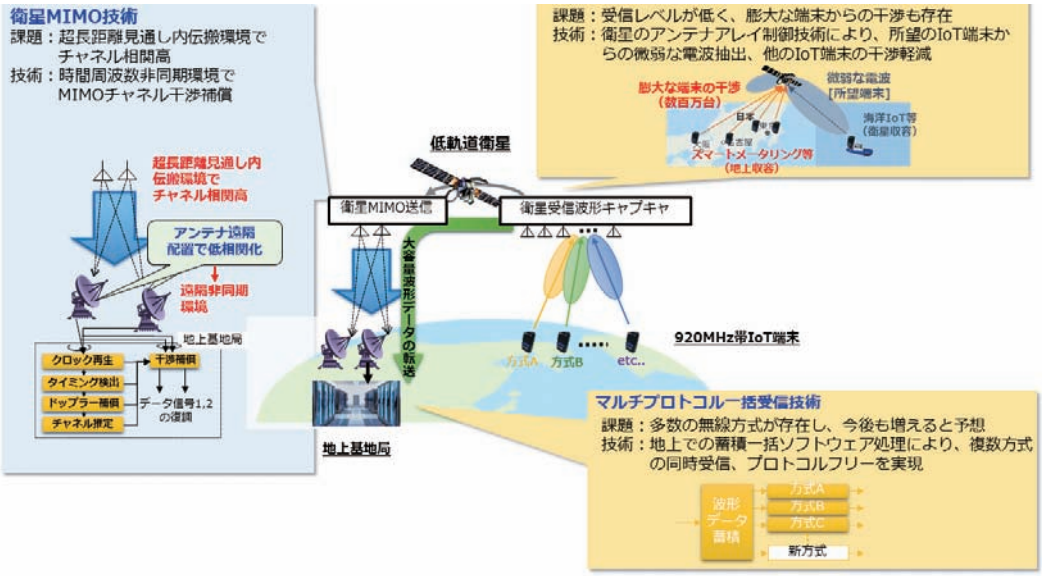
一方、小型衛星を用いた地球観測については、前述の衛星打ち上げコストの低減に加え、衛星搭載カメラの高精細化、センサの高度化、撮影可能衛星機数の増加に伴い、これまで上空から分からなかった情報が分かるようになった。代表的なものとして、災害時の被災状況とか、都市・建造物の変遷、工事現場の進捗等が考えられる。電話のようなリアルタイム性を求めなければ、地球観測は少ない衛星機数で実現できるため、近年ベンチャー企業や大学等も参画し、多くの衛星打ち上げ計画が立案されている。

なお、低軌道衛星を用いたサービスにおいて、周波数権益は重要である。特にコンステレーションでは数多くの衛星が上空を動きながら電波を送信するため、同一周波数を利用する他システムに対する干渉評価は重要である。現在、既存の静止衛星の地球局や地上無線局に対する干渉評価がITU-R等で研究されており、国内においても、サービス提供時の技術基準が議論されている。

3. 低軌道衛星を用いる衛星IoTプラットフォーム技術

近年様々な物に通信機器を装着し、データを定期的に収集するIoT（Internet of Things）需要が急速に伸びている。NTT研究所では地上網ではカバーできない、超カバレッジのIoT需要に応えるべく、衛星IoTプラットフォームの検討に着手している。これまでも衛星を経由したデータ通信は存在したが、多くは衛星専用装置や周波数を用いており、コストが高止まりしていた。NTT研究所では、地上IoTと同じ周波数、同じ電力で低軌道衛星を介して小容量データを収集する920MHz帯を用いた衛星IoTプラットフォーム技術を研究開発している。

具体的なシステム構成とキー技術を**図3**に示す。コンセプトとして、あらゆる場所でつながるIoT端末であり、海洋など、超広域かつ低頻度のセンシングデータ収集といった新たな市場の開拓を目指している。ハードウェアとしては一般的な地上用IoT端末を利用することで、端末調達コストを抑制する。



■図3. 低軌道衛星を用いた920MHz帯衛星IoTプラットフォーム

衛星はシンプルな構造で受信した920MHzの信号波形をサンプリングして衛星搭載メモリにストアし、基地局上空を飛来するタイミングでデータを地上にダウンリンクする。この際、同一周波数の異なる信号を複数アンテナで送受信するMIMO（Multi-Input Multi-Output）技術により、ダウンリンクの大容量化を図る。

以下に衛星IoTプラットフォームを実現するキー技術を紹介する。

(1) 衛星ブラインドビーム制御技術

近年920MHz帯を用いた地上IoT端末の台数はスマートメータの利用等により都市部で急速に伸びており、衛星IoTプラットフォームでは都市部からの干渉電力が大きくなることが予想される。そこで衛星に複数のアンテナを搭載し、大きな干渉源に対して衛星アンテナ指向性のヌル方向を向けるよう、ビーム指向性を制御する。ただし、衛星が移動することで衛星IoT端末と干渉源の相対関係も時々刻々変化するため、リアルタイムのビーム制御は困難である。そこで、衛星に搭載された複数アンテナで衛星IoT端末からの信号を一旦受信し、衛星を介して地上にダウンリンクした後、オフラインで端末単位にビーム制御する方法を検討している。この地上オフラインビーム制御処理により、受信SINR向上を図る。

一例として高度550kmの太陽同期軌道を想定した低軌道衛星のサービスエリアを回線設計で評価した。前提として他端末からの干渉はなく、衛星搭載された3アンテナで受信された信号を最大比合成する。端末アンテナボアサイト方向の仰角が90°となるように IoT端末を設置した場合、

－端末上空の半径640km以内に低軌道衛星が位置する際は衛星とIoT端末間で通信可

－半径110km以内では18dB以上の高SNRが得られる

という検討結果が得られている。

(2) マルチプロトコル一括受信技術

通常、衛星上で受信信号を復調するには復調器を搭載する必要があり、処理可能な通信プロトコルが限定される。一方で、現在地上で利用されている920MHzのIoT通信プロトコルは多種多様であり、プロトコルを決めれば、提案プラットフォームで利用できる衛星IoT端末種別が限定される。そこで、現在検討している衛星IoTプラットフォームでは、衛星には復調器を搭載せず、地上で復調処理を行うこととした。さらにこの地上における復調処理をソフトウェアで実施することで、多様なIoT通信プロトコルに柔軟に対応する。

(3) 衛星MIMO技術

携帯電話や無線LANで使われているMIMO技術は、アンテナを複数用いて限られた周波数で伝送容量を改善する技術であるが、マルチパス環境でMIMOチャネルの相互相関が低い時に伝送容量が改善されるため、衛星通信のような見通し環境では適用が難しいとされてきた。この課題に対し、NTT研究所では、衛星に複数アンテナを搭載し、地上にも複数アンテナを設置するが、その地上のアンテナ間の距離を物理的に離すことで、チャネル相関を下げる方法を提案している。物理的に地上アンテナを離せばチャネル相関を

下げることができるが、トレードオフとして受信チャネルの関係が相対的に非同期となる課題がある。NTT研究所では、この非同期受信環境においてMIMO干渉補償できる技術を現在研究開発している。

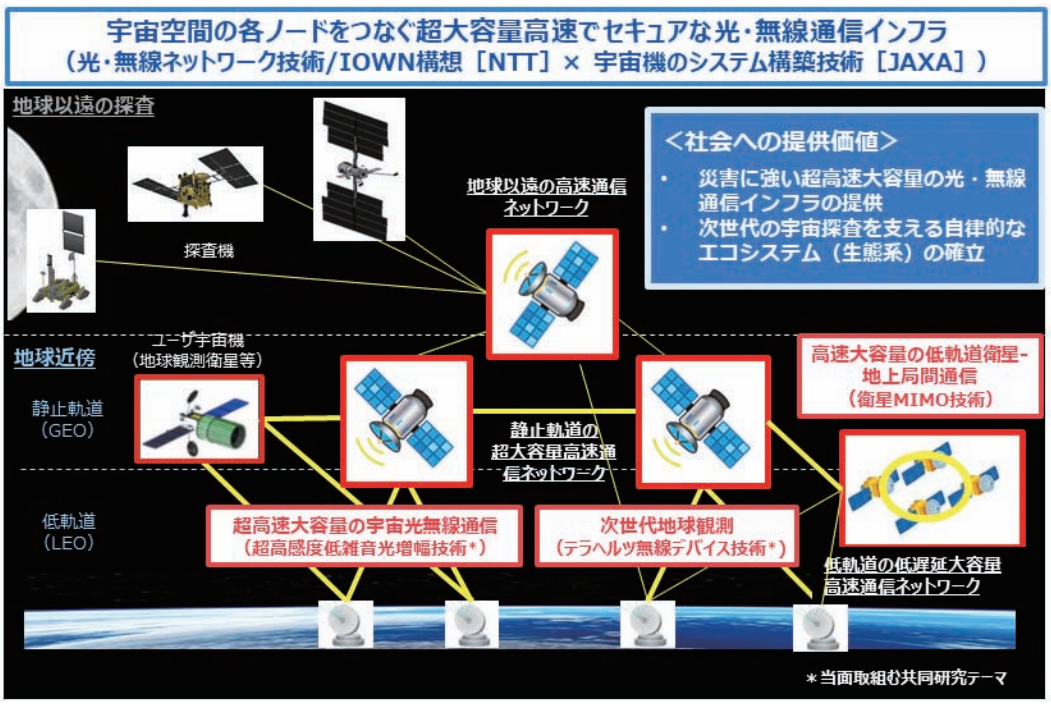
一例として衛星搭載アンテナ間隔を0.7mとし、基地局を70km離した場合、シミュレーションの結果、従来の送受1アンテナを用いるSISO（Single Input Single Output）伝送と比べ、送受2アンテナを用いるMIMO伝送の方が平均2倍の伝送容量の向上を達成できることを確認している。原理的にはアンテナ数を増やせば、スケーラブルに容量が増えるのもMIMO伝送の大きな魅力の1つである。

NTT研究所では上記衛星MIMO技術を用いた衛星IoTプラットフォームの実証のため、JAXAの革新的衛星実験プログラム3号機に応募し、研究テーマの1つとして採択された。現在2022年度の衛星実験に向けて、衛星搭載装置の開発を進めている。本実験では他ミッションとの相乗りのため、利用可能なスペース・重量・電力が限られており、スケールモデルを用いた原理確認を実施する予定である。具体的にはサービスリンクとして920MHzのIoT受信アンテナを3つ搭載し、まず、所望の衛星IoT端末からの信号を受信し、地上で復調処理できることを確認する。その後、海上や山地などIoT送信環境を変化させて通信実験をする予定である。一方、フィーダリンクとしてはX帯の送信アンテナを3つ搭載しており、MIMOアンテナ数に応じて伝送容量をスケーラブルに変更できることを確認する予定である。

4. おわりに

NTT研究所では最先端の光関連技術及び情報処理技術を活用した未来のコミュニケーション基盤として2019年からIOWN（Innovative Optical and Wireless Network）構想を掲げ、“Digital to Natural”と“Electronics to Photonics”の2つの進化により、持続的成長、安心安全信頼及び個と全体の最適等、様々な価値を生み出していく研究開発を推進している。このIOWN構想におけるWirelessの柱の1つとして宇宙通信の拡張が位置付けられており、JAXAとも連携して**図4**に示す電波や光を用いた宇宙通信インフラ構築を目指している。本誌では、衛星IoT信号を地上に高速にダウンリンクする技術として衛星MIMO技術を紹介したが、他にも高精細画像を撮影する観測衛星や、6G時代における通信衛星においても、宇宙と地上を結ぶ衛星回線の高速化は必須となるため、衛星MIMO技術の活用が期待できる。さらに、NTT研究所では、通信回線にとどまらず、宇宙にデータセンタを配備し、宇宙空間にあふれる膨大な情報をエッジ処理するIOWNスペースコンピューティング構想についても議論を開始している。

（2020年12月10日　ITU-R研究会より）



■図4. IOWN技術を用いた電波や光を用いた宇宙通信インフラ（NTT/JAXA報道発表資料：2019年11月5日）