

〈一般研究課題〉 超小型衛星群による新しい地球観測に向けた
高精度時刻同期システムの開発
助成研究者 中部大学 海老沼 拓史



超小型衛星群による新しい地球観測に向けた 高精度時刻同期システムの開発

海老沼 拓史
(中部大学)

GPS Disciplined Oscillator for Distributed Earth Observation Small Satellite Systems

Takuji Ebinuma
(Chubu University)

Abstract :

One of the new trends in Earth observation applications is to use cooperating groups of small satellites instead of a traditional single, large, and multifunctional satellite. Such distributed satellite systems have the innovative potential to provide higher temporal and spatial resolutions in Earth observation data and to achieve higher availability. These robust capabilities are especially important in emergency surveillance tasks. In addition, modern miniaturization technologies enable realization of electric and mechanical components at very small size and mass. Many small satellites of few kilograms of mass have already provided valuable missions and services. However, distributed satellite operations also raise challenging control and coordination requirements for time synchronization of heterogeneous sensors.

Precise time synchronization has also become essential for today's mobile network systems. GPS disciplined oscillators (GPSDO) are becoming more popular as a reliable and accurate timing and frequency source for many network applications. The GPSDO is a powerful device that consists of a high-quality crystal oscillator and a GPS receiver. Although the timing signals generated by the GPS receiver have excellent long-term stability, the short-term stability is often degraded by many factors including multipath interference and atmospheric conditions. On the other hand, the high-quality crystal oscillator offers better short-time stability, but it is exposed to thermal, aging, and

other long-term effects. The combined efforts of the GPS receiver and the high-quality crystal oscillator make a GPSDO an excellent source for overall timing and frequency stability.

Many small satellites have already carried GPS receivers for their real-time positioning, but none of them has GPSDO capability. The main purpose of this study is to develop a low cost, yet accurate and precise GPSDO for small satellite applications. This paper describes the development and evaluation of a prototype space-capable GPSDO and a brief introduction of our newly proposed space mission using the precise timing and frequency synchronization provided by the onboard GPSDO.

1. はじめに

従来の大型衛星に代わり、超小型衛星の群れによる地球観測が注目を集めている。一機だけで運用される大型衛星とは異なり、数百から数千機もの超小型衛星を軌道上にまんべんなく配置することで、いつでも、どこでも、即座に観測可能な地球観測システムを構築することができる。これにより、例えば地震災害など、いつ、どこで発生するか予想できない災害に対して、被災状況を即座に知ることが可能となり、安心・安全な新しい社会基盤として期待されている[1]。

しかし、これら多数の衛星群を従来の大型衛星のように、ひとつひとつ地上の運用局から制御することは困難となる。そこで、本研究では、超小型衛星がお互いに情報を交換し合い、自律的に群れとして運用される群制御システムの実現を最終的な目標としている。そのコアとなる技術として、それぞれの超小型衛星の時刻が同期し、送受信の衝突のない相互通信を実現するために、GPSによる時刻同期システムの研究開発を進めている。

このようなシステムはGPSDO (GPS Disciplined Oscillator) と呼ばれ、地上アプリケーションではすでに精密な時刻同期が必要とされる移動体通信基地局などに広く利用されている[2]。GPSDOは、GPS受信機と高品質な水晶発振器を組み合わせたユニークな基準周波数発生器である。GPS衛星から発信される電波は衛星に搭載された精密な原子時計によって生成されており、その電波に同期したGPS受信機も原子時計と同レベルに長期間安定な時刻情報を提供することができる。しかし、GPS受信機の受信環境により、周りの障害物からの反射や干渉、大気による電波の遅延などの影響を受けるため、短期的には時刻情報が不安定となる欠点がある。一方、水晶発振器は、周囲の温度変化や経年劣化により長期的な安定性の確保が難しいものの、短期的には安定した周波数発生器である。GPSDOは、これら2つがお互いの短所をカバーすることで、長期的にも短期的にも安定した原子時計レベルの高品質な基準時刻および基準周波数発生器を低コストで実現している。

地上アプリケーションでは、時刻同期のために広く利用されているGPSDOであるが、超小型衛星に搭載可能な小型・省電力な宇宙用GPSDOは例を見ない。一方、本研究室では、切手サイズの小型・省電力な宇宙用GPS受信機を開発し、JAXA革新的衛星技術1号機にて軌道上実証実験を実施中である[3]。そこで、本研究では、この宇宙用GPS受信機に時刻同期機能を追加することにより、超小型衛星にも搭載可能な小型GPSDOの開発を試みた。

本稿では、宇宙用GPSDOの試作と動作試験に加えて、高精度な時刻同期および基準周波数を利用した将来の超小型衛星群による地球観測ミッション計画について紹介する。

2. 小型衛星用GPSDOの開発

2.1 Firefly GPS受信機

本研究室では、コストや性能面で超小型衛星に最適化したGPS受信機であるFireflyを開発している。Fireflyは、最新の車載用GPS受信機アーキテクチャをベースとしており、受信機モジュールの大きさは17mm×22mmの切手サイズと小型で、消費電力も150mWと、無理なくCubeSatなどの超小型衛星に搭載することが可能である。その外観を図1に示す。

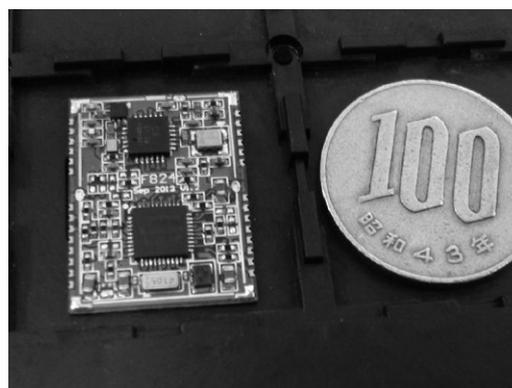


図1. Firefly GPS受信機モジュール

Fireflyは、米国の衛星測位システムであるGPSだけではなく、ロシアのGLONASSと日本のQZSSにも対応しており、167個の信号追尾チャンネルにより、最大24衛星の信号を同時に追尾することが可能である。GPS以外の衛星測位システムへの対応による可視衛星数の増加は、衛星の姿勢が不安定な状況においても、良好な観測性を提供することができる。また、信号追尾チャンネルとは別に、専用の信号捕捉エンジンを搭載しており、毎秒1,600万点の相関値を計算することができる。これにより、高速に移動する低軌道衛星においても、受信機の電源を入れてから45秒ほどで信号を捕捉し、測位を開始することが可能である。Fireflyは、機能的に地上でも低軌道でもほぼ同じように動作するように設計されており、ユーザは低軌道衛星における特別な運用を気にすることなく、GPS受信機による測位機能を衛星に追加することができる。

2.1 1PPS信号出力の実装

GPSは、位置情報だけではなく、精密な時刻情報を利用する分野においても広く利用されている。GPSによる時刻情報の取得方法としては、GPS受信機から出力される1PPS(Pulse Per Second)信号と呼ばれるパルス信号を利用するのが一般的である。GPS受信機内部で実行される測位演算において、受信機の位置だけではなく、受信機に搭載されている基準クロックの時刻オフセットも同時に計算される。この時刻オフセットによって1PPS信号のタイミングを補正することで、協定世界時(UTC: Coordinated Universal Time)の整数秒に同期した時刻情報を得ることができる。本研究では、宇宙用GPSDOの実現に向けて、高速に移動する低軌道衛星においても地上と同様に高精度な1PPS信号を生成する機能をFirefly GPS受信機に追加することを試みた。

GPS受信機内部には、受信機に搭載されている基準クロックによってカウントアップされる数値制御発振器(NCO: Numerically Controlled Oscillator)と呼ばれるカウンタが複数個準備されている。このうちのひとつを、1秒周期の1PPS信号の生成に利用することを考える。しかし、NCOをカウントアップ

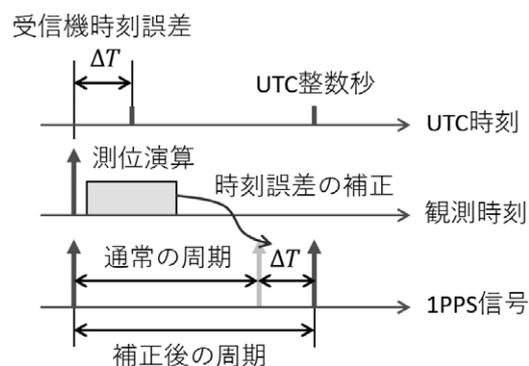


図2. PPS信号出力タイミングの補正

する基準クロックはGPS受信機に搭載されている水晶発振器であるため、発振器が持つ周波数オフセットによってNCOの周期もドリフトし、1秒周期から離れていってしまう。また、周囲の温度によっても周波数オフセットが変動してしまうため、定期的に1PPS信号を発生するタイミングを補正する必要がある。

一方、GPS受信機で測位演算を行うことによって、観測値を取得したタイミングでの基準クロックの時刻オフセットが、

測位結果と同時に計算される。これにより、観測値を取得したタイミングにおける時刻誤差が推定される。この推定値により、次の1PPS信号の発生タイミングを補正することで、UTC時刻の整数秒に同期した1PPS信号を実現している。図2に1PPS信号発生タイミングの補正手法の概要をまとめる。

Firefly GPS受信機に実装された1PPS信号の精度を評価するために、模擬的なGPS信号を生成するGPS信号シミュレータを用いて、Fireflyが出力する1PPS信号と、リファレンスとなるGPS信号シミュレータの1PPS信号の比較実験を行った。そのときに観測された両者のパルス信号の観測結果を図3に示す。図中、中心でパルスの立ち上がりを示している信号がリファレンスとなるGPS信号シミュレータの1PPS信号であり、それより遅れて立ち上がっている信号がFirefly GPS受信機が出力する1PPS信号である。横軸は時間軸であり、1目盛りが100ナノ秒である。これにより、Fireflyから出力される時刻補正後の1PPS信号のオフセットは、約50ナノ秒であることが確認できた。さらに、1PPS信号はオシロスコープのパーシスタンスモードを用いて、すべての観測波形を重ね書きしている。これにより、Fireflyから出力される1PPS信号のばらつきは10ナノ秒以下であることも見て取れる。このばらつきは、1PPS信号の生成に利用したNCOの分解能や受信機に搭載されている水晶発振器の周波数などで制限される値であるためこれ以上の改善は難しい。一方、約50ナノ秒のオフセットの値は、主にアンテナケーブルや受信機回路内部におけるGPS信号の伝搬遅延によるものであり、受信機のセットアップに変更がなければ、ほぼ一定値を示す。そのため、受信機のセットアップに応じて固定値として補正することで、さらなる時刻同期精度の改善が可能である。

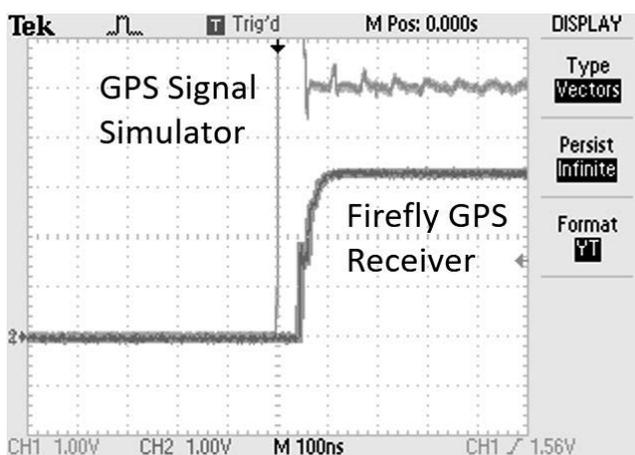


図3. 1PPS信号発生タイミングの計測

2.1 GPSDOの試作と動作試験

Firefly GPS受信機に実装された1PPS信号出力により、ばらつきが10ナノ秒以下の1PPS信号が取得できることが確認された。このばらつきは長期的には安定しているものの、短期的には水晶発振器の安定性に劣ってしまう。そこで、TCXO (Temperature Compensated Crystal Oscillator) やOCXO (Oven Controlled Crystal Oscillator) など短期安定性を確保し、GPS受信機の1PPS信号によって長期安定性を補完するGPSDOが、移動体通信基地局など精密な時刻同期および基準周波数を必要とする地上アプリケーションに広く利用されている。

図4にGPS受信機が出力する1PPSに同期した10MHzの基準周波数を生成するGPSDOの仕組みを示す。この例では、電圧制御TCXO (VCTCXO: Voltage Controlled TCXO) が出力する10MHzの信号を10,000,000分の1に分周して1Hzの信号を生成し、その位相を位相周波数比較機(PFC: Phase Frequency Comparator)によってGPS受信機から出力される1PPS信号と比較している。この位相差からループフィルタによりVCXOの周波数誤差を推定し、VXCOの電圧を制御することで長期的にも安定した10MHzの基準周波数を得ることができる。

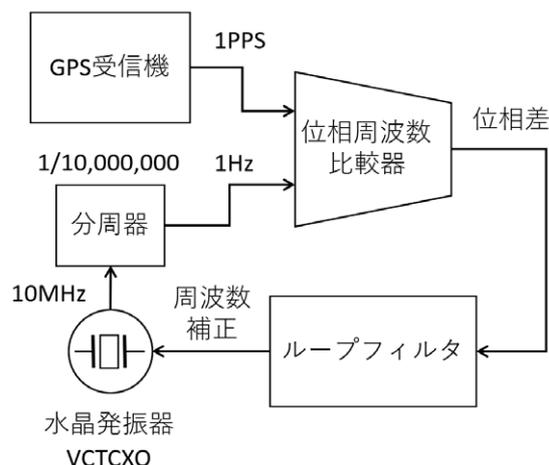


図4. GPSDOの原理

本研究では、切手サイズのGPS受信機であるFireflyに実装された1PPS信号出力を利用することで、CubeSatなどの超小型衛星に搭載可能なGPSDOの試作を行った。GPSDOに必要なPFCやループフィルタなどの回路は、汎用的なロジック回路で構成することも可能であるが、小型・省電力化のために、専用の位同期回路(PLL: Phase Locked Loop)であるAnalog Devices社のAD9548を採用した。AD9548は、1Hzから750MHzの入力リファレンス周波数に対応しており、Firefly GPS受信機が出力する1PPS信号を入力することが可能である[4]。

今回試作したGPSDOの構成を図5に示す。Firefly GPS受信機基板には、Firefly GPS受信機本体に加えて、受信機からの測位情報などをPCでモニタリングするためのUSBインターフェイスが実装されている。AD9548評価基板には、AD9548本体に加えて、10MHzのVCTCXOを実装している。AD9548のループフィルタなどのパラメータは、評価基板のUSB経由でAnalog Devices社が提供するPCソフトウェアによって設定することができる。

図6に、Firefly GPS受信機の1PPS信号に同期したAD9548評価基板からの10MHz出力のスペクトラムを示す。これより位相雑音もスプリアスもともに低い良好な基準周波数が得られていることが確認できた。一方、GPSDOの最大の特徴である長期安定性を評価するためには、原子時計など高精度な基準周波数源との比較が必要となる。今回はこれらの高価な測定器を使用できる機会がなく、長期安定性の定量的な評価は実施できていない。長期安定性の評価については、市販のGPSDOとの比較を実施するなどの間接的な評価方法も含めて、今後の課題である。

また、AD9548に制御されるVCTCXOの10MHzの出力が、GPS受信機からの1PPS信号に同期するためには、1時間近い時間が必要となってしまふ。この収束時間の短縮には、同期信号となる1PPS信号を1Hzのパル

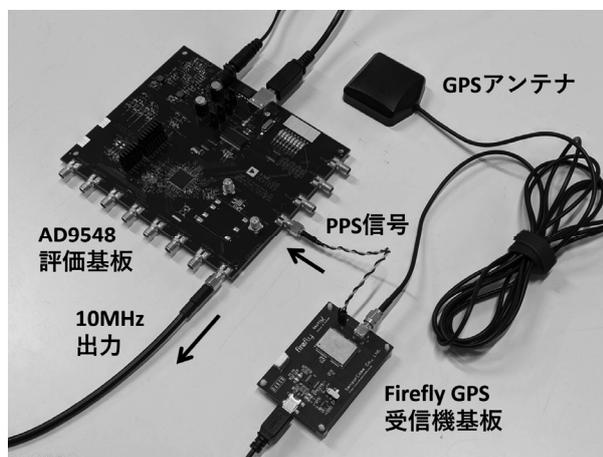


図5. GPSDOの構成

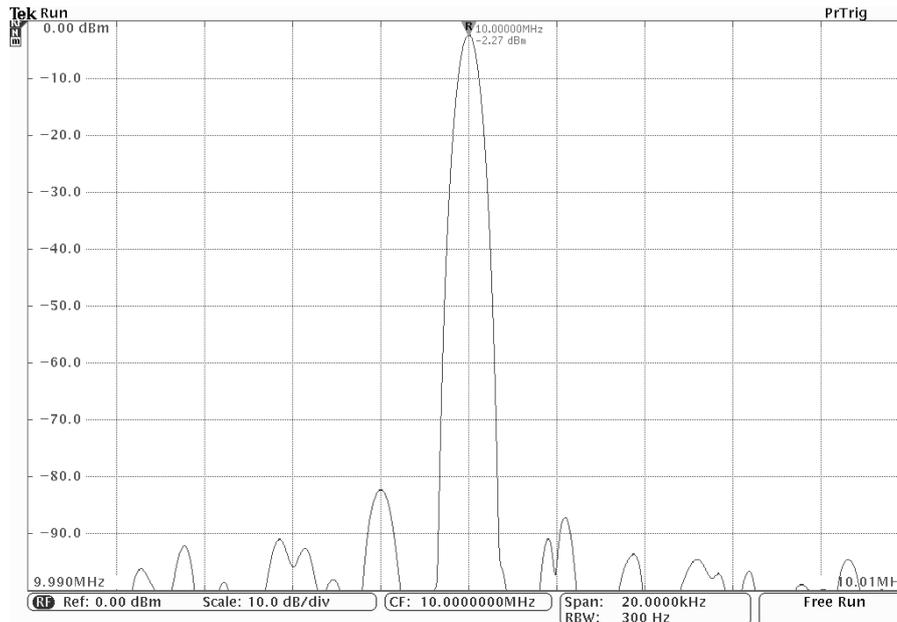


図6. GPSDO出力信号のスペクトル

スではなく、1kHz以上の高周波のパルス信号とする手段が考えられる。残念ながら、Firefly GPS受信機のアーキテクチャとしてはPPS信号の出力周波数を10Hz程度までしか上げることができず、同期信号の高周波数化による収束時間短縮を実現することはできない。しかし、GPSDOの省電力化により、超小型衛星においても常にGPSDOが起動した状態であれば、基準周波数の収束を待つのは最初の電源投入のときだけであり、その後はGPS受信機が衛星信号を追尾し、測位演算が実施されている限り、長期安定した基準周波数を出力することができる。

3. 超小型衛星による地球観測ミッション

本研究室では、九州工業大学と共同で、高精度の時刻同期および基準周波数を活用した超小型衛星群による地球電離圏の電子密度計測ミッションの実現に取り組んでいる。全球規模で時々刻々と変化する電離圏の電子密度の情報は、太陽活動、磁気圏、電離圏、大気、地表面の相互作用を理解する上で極めて貴重であり、宇宙天気予報、衛星測位、衛星通信といった実利用分野での信頼性および精度向上にとっても重要である。そこで、電離圏の電子密度の3次元的时间変動を地球規模で観測する手法の実現を目指し、超小型・低コストで高精度なGPSDOを基準周波数源とするUHF送受信機を搭載した超小型衛星同士の衛星間測距システムの開発を行っている。

電波が電離圏を伝搬すると、プラズマ中の電子やイオンが電波の伝搬速度や偏波面に影響を及ぼす。そのため、位置が既知である2つの衛星間の距離を電波の伝搬遅延から計測することによって、その遅延量から伝搬経路の

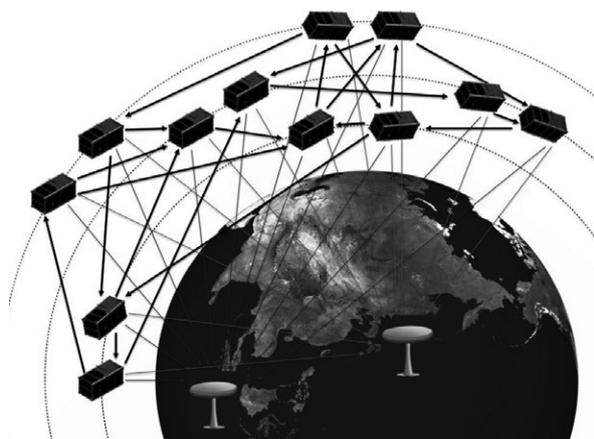


図7. 超小型衛星群による電離圏の3D観測

電子密度を推定することができる。この衛星間測距を衛星群の複数衛星間で行うことにより、図7に示すような3次元的な電離圏の電子密度観測を実現することができる。各衛星の位置は、衛星に搭載されるGPS受信機によって計測され、さらにそのGPS受信機に同期したGPSDOが高精度な基準周波数を測距用の送受信機に提供する。電離圏の観測には周波数の低いUHF帯が有効であることが知られており、本ミッションでは400MHz帯の電波を衛星間測距に利用する。

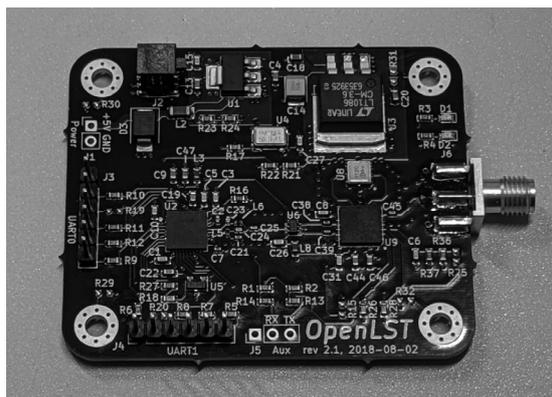


図8. OpenLST UHF送受信機

このような測距機能を持つUHF送受信機として、本研究では軌道上実証の実績のあるPlanet社のOpenLSTを採用し、試験機の製作を行った。OpenLSTはオープンソースの無線機として回路図などが公開されており、ユーザは自由に製造または機能拡張をすることができる。図8に本研究で製作したOpenLSTの外観を示す。衛星間通信を模擬するために2機のOpenLSTを同軸ケーブルで接続し、その間に宇宙空間での電波の伝搬損失を模擬するための減衰器を挿入し、通信機能の確認を実施している。測距機能の評価については、伝搬距離に等しい長さの同軸ケーブルで接続するか、アマチュア無線局として実際に電波を発信するなどの工夫が必要であり、今後の課題である。

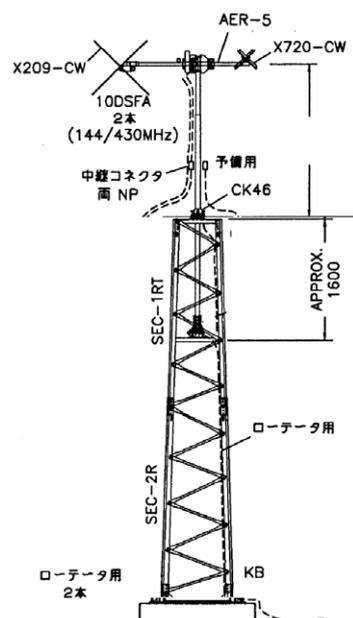


図9. 地上局アンテナシステム

さらに、本研究では、これら超小型衛星の運用に向けて、地上局の検討を実施した。CubeSatなど、大学研究室で開発・運用される超小型衛星では、アマチュア無線の周波数帯を利用することが多い[5]。本研究でも、すでに運用されている超小型衛星の例に倣い、アップリンクに144MHz帯、ダウンリンクに430MHz帯のアマチュア無線周波数帯を利用することとした。図9に本研究で検討した地上局アンテナシステムの構成図を示す。新型コロナウイルス感染拡大防止のため、大学構内での活動が制限されており、アンテナタワーの設置作業は一旦保留となっているが、2020年度内の運用開始を目指して、作業スケジュールを調整中である。

4. おわりに

本研究では、お互いに同期した超小型衛星群による新しい地球観測ミッションの実現を目指し、CubeSatなどの超小型衛星にも搭載可能な、小型・省電力・低コストで高精度な時刻同期および基準周波数を提供するGPSDOの開発を実施した。本研究室で開発したFirefly GPS受信機と、Analog Devices社のAD9548を利用した評価基板による動作試験では、位相雑音もスプリアスもともに低い良好な基準周波数が得られることが確認できた。今後はCubeSatへの搭載を目指し、Firefly GPS受信機と一体化した名刺サイズの超小型衛星用GPSDOの設計開発を進める予定である。

さらに、GPSDOによる高精度な時刻同期および基準周波数を応用した新しい地球観測ミッションとして、超小型衛星群による電離圏の3次元観測の検討を進めている。地球規模の電離圏の電子密度観測は、サイエンス面において太陽活動、磁気圏、電離圏、大気、地表面の相互作用を理解する上で極めて貴重であると同時に、実用面でも宇宙天気予報、衛星測位、衛星通信の信頼性および精度向上への貢献が期待される。本ミッションは、JAXA革新的衛星技術3号機などの技術実証機会での打ち上げを目指し、GPSDOだけではなく、衛星間相互通信のための送受信機や、衛星運用のための地上局システムの準備を進めている。

本研究で開発した超小型衛星用GPSDOで高精度に同期した衛星群により、いつでも、どこでも、即座に観測可能な地球観測システムが構築され、より効率的な災害監視などによる安心・安全な新しい社会基盤の実現の一助となれば幸いである。

参考文献

- [1] Cockrell, J., Alena, R., Mayer, D., Sanchez, H., Luzod, T., and Klumper, D., “EDSN: A Large Swarm of Advanced Yet Very Affordable, COTS-based NanoSats that Enable Multipoint Physics and Open Source Apps,” SSC 12-I-5, 26th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites, 2012.
- [2] M. Lombardi, A.N. Novick, and V. Zhang, “Characterizing the Performance of GPS Disciplined Oscillators with Respect to UTC(NIST),” IEEE Frequency Control Symposium and Exposition, 2005.
- [3] 海老沼拓史, “超小型・省電力GNSS受信機の軌道上実証結果,” 第63回宇宙科学技術連合講演会, 2019.
- [4] Ken Gentile, “The AD9548 as a GPS Disciplined Stratum 2 Clock,” Application Note AN-1002, Analog Devices, 2009.
- [5] 中村壮児, 山田晃一郎, 佐藤陸, 中村涼太, 藤井瞳, 宮崎康行, “CubeSat「NEXUS」によるアマチュア衛星通信評価,” 電子情報通信学会ソサイエティ大会, 2019.