

3B06 衛星搭載用小型 GNSS スマートアンテナの開発

海老沼拓史 (中部大学)

A miniature GNSS smart antenna for space applications
Takuji Ebinuma (Chubu University)

Key Words: Small Satellite, GNSS receiver, Smart antenna

Abstract

There are an increasing number of small satellite and hybrid rocket projects proposed for miscellaneous space applications, many of which assume the use of Global Navigation Satellite System (GNSS) for precise position and time. This paper describes the adaptation of a miniature commercial-off-the-shelf (COTS) GNSS receiver for low Earth orbit applications, including navigation performance validation using a GNSS signal simulator.

1. まえがき

ESA の QB50[1]や NASA の EDSN[2]など, CubeSat に代表される超小型衛星のミッションは, 大型衛星では例のない数十機以上の衛星からなる swarm がひとつのトレンドとなりつつある. Swarm は小型・低コストである超小型衛星の特徴が生きるアプリケーションである一方, これほどの衛星を一度に運用するためには, 衛星に高度な自律化が求められる. 衛星の自律化において, その位置情報に加えて精密な時刻を提供できる GNSS 受信機は, キーコンポーネントのひとつである. しかし, 現在利用可能な宇宙機向けの受信機は, コストや性能面などで, 超小型衛星に最適化されているとは言えない.

そこで, 本研究では, 最新の車載用 GNSS 受信機アーキテクチャをベースに, 超小型衛星での利用に最適化した受信機の開発を行った. 本受信機モジュールは, 17mm×22mm の切手サイズで, 消費電力も 150mW と, 無理なく CubeSat に搭載することが可能である. さらに, この小型受信機モジュールを GNSS アンテナと一体化させた衛星搭載用のスマートアンテナを開発した. これにより, ユーザは RF ケーブルなどの配線を気にすることなく, スマートアンテナを衛星表面に設置するだけで, GNSS 受信機の位置・時刻情報にアクセスすることが可能となる.

本稿では, 低軌道における超小型衛星のダイナミクスを考慮した GNSS 受信機ファームウェアの最適化に加えて, GNSS 信号シミュレータと用いた性能試験結果について報告する.

2. Firefly GNSS 受信機

Firefly と名付けられた本受信機モジュールは, 最新の GNSS 受信機アーキテクチャをベースとして開発された超小型衛星向けの小型・省電力 GNSS 受信機である. その外観を図 1 に示す.

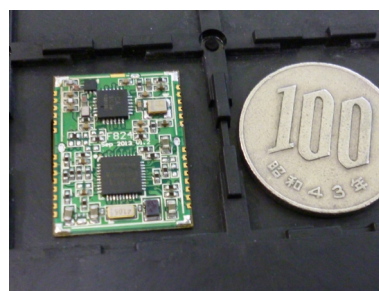


図 1 Firefly GNSS 受信機モジュール

Firefly は, GPS だけではなく, GLONASS と QZSS の L1 信号にも対応しており, 167 個の信号追尾チャネルにより, 最大 24 衛星を同時に追尾することが可能である. GNSS 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, 良好な可観測性を提供することができる.

また, 信号追尾チャネルとは別に, 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. これは, GPS L1 C/A 信号のコード長である 1ms で, 16,000 点の相関値を探索することになる. さらに, 拡散コードは 1,023 チップであることから, 一度に約 16 機分の相関値が得られる計算になる.

地上アプリケーションでは、信号捕捉エンジンで得られた相関値を時間方向に積分することにより、S/N 比を改善し、微弱な GNSS 信号の捕捉を実現している。しかし、低軌道衛星では、建築物や樹木などの S/N 比を劣化させる障害物がないため、微弱信号の受信機能は不要である。そこで、Firefly では、時間方向への積分の代わりに、周波数方向への信号探索幅を拡張している。これにより、低軌道衛星の速度による大きなドップラー周波数シフトがあっても、コールドスタートから 45 秒の TTFF (time to first fix) を実現している。

測位情報の出力としては、一般的な NMEA フォーマットを採用している。非同期シリアル通信によるテキストデータであることから、マイコンとのインターフェイスが容易であり、多くの解析ツールが公開されている。

このように、Firefly は機能的に地上であっても低軌道であってもほぼ同じように動作するように設計されている。そのため、ユーザは低軌道における特別な運用を気にすることなく、GNSS 受信機による測位機能を衛星に追加することが可能である。

3. 測位精度評価

Firefly の測位精度を評価するために試作した評価基板の外観図を図 2 に示す。受信機機能としては、モジュール単体で完結しており、外部部品としては、アンテナおよび USB シリアル変換 IC による PC とのインターフェイスのみである。



図 2 Firefly GNSS 受信機評価基板

GNSS 信号シミュレータを用いた低軌道衛星シナリオによる測位精度の評価結果を図 3 および図 4 に示す。どちらも同じ軌道のシナリオであるが、図 3 は GPS のみ、図 4 は GPS と GLONASS の両方を用いた結果となっている。なお、GNSS 信号シミュレータには、Spirent 社の GSS6700 Multi-GNSS Constellation Simulation System を用いている。

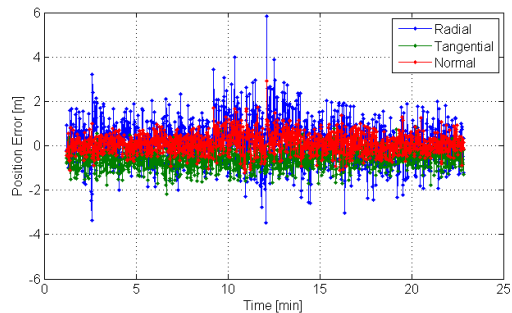


図 3 GPS のみの測位誤差

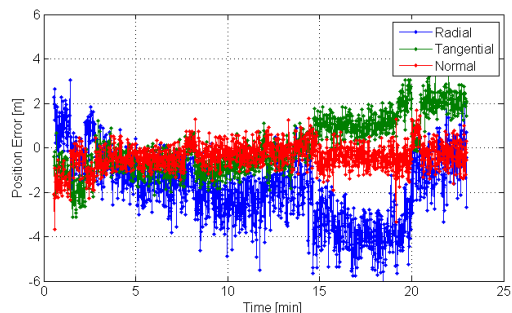


図 4 GPS+GLONASS による測位誤差

図 3 と図 4 はいずれも受信機の起動時刻を 0 秒して、軌道面の radial, tangential, normal 方向の測位誤差を示している。GLONASS を加えることで衛星数が増加し、さらに GLONASS の拡散コード長が GPS の半分であることから、図 4 の GPS+GLONASS による測位は GPS のみの場合より高速な TTFF が得られている。一方で、GLONASS は多重接続に FDMA を採用していることから、衛星間で中心周波数が異なり、inter-frequency bias と呼ばれるレンジ誤差が生じてしまう[3]。これにより、GPS のみの結果と比較すると、測位誤差が大幅に増大している。

しかし、GPS+GLONASS による測位誤差も各軸方向で 6m 以下と、実用上、小型衛星の運用には問題のない精度といえる。そのため、可視衛星数と測位精度のどちらを優先するのかは、ミッションごとのトレードオフとなる。常に姿勢が地球指向で、GNSS アンテナが天頂を向いているのであれば、周囲に障害物がない衛星軌道では GPS だけでも十分な衛星数が確保できる。一方で、超小型衛星には高度な姿勢制御機能がなく、姿勢が安定しないものも多い。例えば、衛星が地球指向から 90 度傾き、アンテナが水平線を向くと、単純に可視衛星数は半分となる。そのため、GPS のみでは測位に必要な可視衛星数が確保できず、GLONASS を併用することが必要となる。

4. 時刻精度評価

GNSS 受信機からは、位置情報だけではなく、高精度な時刻情報を得ることができる。このような時刻情報は、一般的に UTC 時刻に同期した 1 秒間隔のパルス信号 (PPS: Pulse Per Second) として提供される。理想的に、この時刻同期精度は、測位精度を電波の伝搬誤差に変換した値と同程度となる。例えば、測位精度が 3m であるとき、時刻同期精度は 10ns となる。実際には、受信機内部のパルス信号を発生させる回路の分解能や、受信機内部やアンテナケーブルでの遅延により、100ns 程度の同期精度が一般的である。

Firefly の時刻同期精度の評価結果を図 5 に示す。図中、黄色のラインは GNSS 信号シミュレータが生成する PPS 信号の rising edge であり、これが真の整数秒に相当する。これに対して、青いラインは Firefly が出力する PPS 信号の rising edge である。オシロスコープの persistence mode により波形を重ね描きしているが、ばらつきのない安定した PPS 信号の生成が確認できた。PPS 信号の遅延は約 50ns となっている。

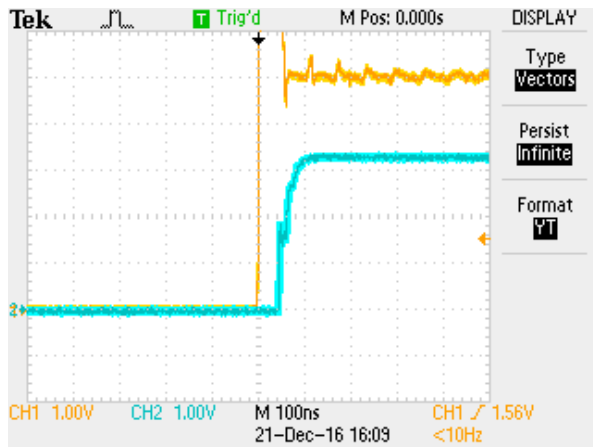


図 5 PPS 信号の同期精度

このような高精度な時刻同期は、個々の衛星内部の時刻管理だけではなく、衛星間通信など複数衛星の同時運用において、今後ますます重要となる機能と考えられる。

5. 放射線試験

GNSS 信号シミュレータによる測位機能評価によって、Firefly は機能的に低軌道衛星のダイナミクスでも動作することが確認された。しかし、Firefly はあくまでも COTS ベースの受信機モジュールであり、ハードウェアとして衛星軌道環境での動作を保証し

たものではない。そこで、本研究では、東京工業大学の協力のもと、コバルト 60 ガンマ線による TID 試験と、プロトンビームによる SEE 試験を実施している。

TID 試験では、高度 500km の軌道で放射線環境に 10 年間置かれた場合に累積する放射線量を 20krad と想定し、20 年分のマージンを取り、40krad までエネルギーを与えている。なお、放射線量率は 10krad/h とした。Firefly を 2 台並べて照射し、シリアル出力データおよび消費電力を計測した結果、40krad の放射線を蓄積してもリセットなどの異常は発生せず、消費電力の増加も見られなかった。

SEE 試験は、若狭湾エネルギー研究センターで実施した。このときの試験条件を表 1 に、試験の様子を図 6 に示す。

表 1 SEE 試験条件

照射強度	2.0×10^{19} protons/cm ²
照射レート	6.9×10^6 protons/cm ² /sec
照射時間	124分
軌道上換算時間	5.5年

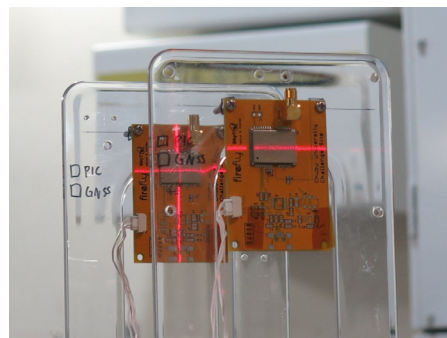


図 6 Firefly の SEE 試験 (東工大提供)

SEE 試験においても、TID 試験と同様に Firefly を 2 台並べて照射し、シリアル出力データと消費電流を計測している。照射時間中、電源のリセットによる再起動が 1 回、ソフトウェアによる信号捕捉のリセットが累計で 19 回発生している。これらは、軌道上換算時間で、電源のリセットが 4 年に 1 回、信号捕捉のリセットが 15 週間に 1 回の頻度で発生することになる。しかし、いずれの場合も、Firefly は正常に再起動および再補足を開始しており、永久故障には至らなかった。

これらの試験結果より、一般的な超小型衛星の数年から 5 年程度の運用期間において、Firefly の放射線耐性は十分であるといえる。

6. Fireant スマートアンテナ

機能的にもハードウェアとしても、衛星軌道上で動作することが確認された Firefly GNSS 受信機モジュールであるが、衛星搭載時には、別途 GNSS アンテナを準備する必要がある。一般的に、GNSS アンテナには、同軸ケーブルでの減衰を補償するために、LNA (low noise amplifier) の回路が組み込まれている。そのため、ユーザは各自で GNSS アンテナの環境試験を実施するなど、余計な手間が必要となる。また、同軸ケーブルは曲げ半径も大きく、CubeSat などのスペースの少ない超小型衛星内部での取り回しが困難である。

そこで、Firefly をより簡単に搭載できるよう、アンテナと一体化した受信機システムを開発した。このような受信機は、一般にスマートアンテナと呼ばれ、ユーザ側とのインターフェイスは、測位結果を出力するシリアル通信のみとなる。そのため、Firefly のユーザは、GNSS アンテナの選定や同軸ケーブルの取り回しを気にすることなく、スマートアンテナを衛星表面に取り付けるだけで、測位情報を取得することが可能となる。

図 7 にスマートアンテナの外観図を示す。Firefly は、パッシブアンテナによる受信にも対応できるように LNA が内蔵されており、受信機の RF 入力端に十分に近い場所にアンテナエレメントを実装することで、スマートアンテナを実現することができる。Firefly GNSS 受信機モジュール以外に必要なアクティブな素子はなく、耐放射線など追加の検証試験は不要である。なお、この Firefly を搭載したスマートアンテナは、antenna と小型を意味する ant (蟻) を掛けて、Fireant と名付けている。



図 7 Fireant スマートアンテナ

7. むすび

最新の GNSS 受信機アーキテクチャをベースとした Firefly GNSS 受信機モジュールは、受信機のサイ

ズや消費電力だけではなく、運用面においても、ユーザが煩雑な操作を必要とせずに、高精度な位置・時刻情報が得られるように設計されている。しかし、受信機ハードウェアは COTS 品であり、宇宙環境での動作は保証されていない。そのため、放射線試験を実施し、低軌道衛星への搭載に向けて検証を行ってきた。

その成果として、Fireant スマートアンテナが革新的衛星技術実証における小型実証衛星 1 号機の搭載ミッションのひとつに採択された。小型実証衛星 1 号機による宇宙実証では、超小型衛星の自律化におけるキーコンポーネントとなる GNSS 受信機の機能面だけではなく、ハードウェアとしても宇宙環境で長期間動作することを確認することを目的としている。これまでにない小型・低消費電力・低コストな本受信機の宇宙実証をいち早く実施することで、超小型衛星における GNSS 受信機の利用が促進され、swarm などの大規模な衛星群による新しいミッション創出へ繋がることが期待される。

謝辞

放射線試験の現地作業や解析を実施していただいた東京工業大学理工学研究科機械宇宙システム専攻松永研究室の渡邊輔祐太氏、松下将典氏、太田佳氏、古賀将哉氏のご協力に、深く感謝いたします。

参考文献

- 1) Thoemel, J., Singarayar, F., Scholz, T., Masutti, D., Testani, P., Asma, C., Reinhard, R., and Muylaert, J., “Status of the QB50 CubeSat Constellation Mission,” IAC-14-B4.2.11, 65th International Aeronautical Congress, Toronto, Canada, 2014.
- 2) 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,” SSC12-I-5, 26th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites, 2012.
- 3) Neumann, J., Bates, M., and Harvey, R., “GLONASS Receiver Inter-Frequency Biases – Calibration Methods and Feasibility,” Proceedings of the 12th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, Nashville, TN, September 14-17, 1999.