

超小型人工衛星運用支援システムの構築

超小型衛星の運用自動化による運用コスト削減と通信量の拡大

Construction of operation support system for Pico-satellite

Automation of Pico-satellite operation to reduce operation cost and increase traffic volume

宮崎・山崎研究室

Miyazaki・Yamazaki Laboratory

菊池秀乙

Hideto Kikuchi

Recently, the amount of communication data of pico-satellites such as CubeSat has become increasing more and more as their mission has become more sophisticated. However, many of those pico-satellites do not have high-speed communication equipment. Therefore, it is necessary to improve the efficiency of receiving data at the ground station. Besides, it is expected that the constellation mission and formation flight mission will increase all over the world in the near future, so that the operation costs will increase at the ground station. The goal of this research is to reduce the operation costs and to increase the amount of receiving data. In this study, a new ground station system is proposed that is based on the close cooperation between the satellite and ground station. The experimental results show that the fully automatic low-cost operation of pico-satellites is achievable and the proposed system has availability for any ground station.

1. 緒言

1.1. 背景

近年、企業や大学による低コスト・短期間での宇宙実証実験や学生の宇宙工学教育を目的とした超小型人工衛星の打ち上げ回数が増加している。(Fig. 1)

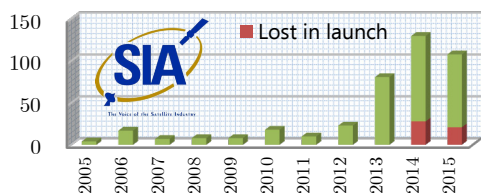


Fig. 1 Number of CubeSats Launched by Year (2005-2015) [1]

更に、ここ数年で急速に発展した集積回路技術により超小型衛星に搭載可能なセンサー類やマイクロコンピュータの性能が劇的に向上したことで、小型衛星に与えられるミッションの幅が広がった。日本大学理工学部航空宇宙工学科宮崎・山崎研究室(以下当研究室)でも、2014年にCMOSカメラを搭載した「SPROUT」の打ち上げに成功したが、違法無線の影響などから、アマチュア無線帯でのVGAサイズのデータ転送に約1か月を要した。この経験は、「データ通信速度の向上」が超小型人工衛星の課題の一つであり、急務であることを示した。これまで、小型衛星の通信速度向上は高周波数帯を用いた高速通信機器の搭載や、複数局で受信を行う地上局ネットワークなどの対策が進められてきた。しかし、高周波数帯の受信には大掛かりな地上局設備が必要なうえ、長期的な受信協力は他局への負担が問題となっている。

また、小型衛星の「運用コスト削減」も課題の一つである。当研究室はSPROUTに加え、2008年に打ち上げた「SEEDS-II」も運用している。これらの運用には1日あたり、1機につき4人が1時間程度の時間を衛星との通信とデータ解析などに要している。今後は世界的に見ても、超小型衛星の利点を生かし複数衛星を打ち上げ、コンステレーションやフォーメーションフライトを使用したミッションが普及することも十分予測される。この場合、1つの研究機関が複数衛星を運用する状況は避けられないため、運用コストの削減が求められる。

1.2. 目的

そこで本研究では、超小型衛星運用支援システムの構築により、「データ通信量の拡大」及び「運用コストの削減」を目指す。これまで、他研究機関においても衛星の運用自動化を図る研究が行われてきたが^[2]、現在のところCubeSatクラス衛星の運用自動化に関する研究は少ない。第2章では新たに開発した、小型衛星の自動運用に特化した地上局システムを「超小型衛星自動運用システム “STERA”」と名付け、紹介する。第3章では、自動運用に対応可能な衛星局システムの実例として2018年の打ち上げを目指し開発中の “NEXUS”を例に挙げながら、自動運用を目指した衛星局の設計思想を提案する。これらのシステムの構築結果は4章に示す。

将来的には、新たに小型衛星プロジェクトに参入する大学や企業に対し有用なシステム構成のガイドラインを作成すると同時に、既存の小型衛星よりも地上局との連携を密にした衛星局システムを開発し、軌道上実証を行う。これらをパッケージ化することで、STERAとその衛星局システムが新たな通信システムの選択肢となることを目指している。同時にこのシステムを利用し、複数局のデータを自動で統合する地上局ネットワークの実用化を目指す。

2. 地上局システム

小型衛星の自動運用に特化した「超小型衛星自動運用システム “STERA”」が「運用コストの削減」と「データ通信量の拡大」をどのようにして実現するのかを、機能とともに紹介する。Fig. 2は、小型衛星の運用スケジュールを示しており、その中の②、③は現在の地上局システムの自動化の課題であり、これらの改善を同時に目指す。

2.1. 地上局システムの自動化による運用コスト削減

地上局システムには、小型衛星の運用の完全自動化を目指すうえで、2.1.1項に示すような課題がある。2.1.1項ではこの課題への解決策を示す。また、Fig. 3は、運用自動化の動作検証を行う当研究室の地上局システムダイアグラムを示しており、図中の赤・青枠は本研究の過程で、主に「データ通信量の拡大」のため地上局システムの改修・新設した箇所である。

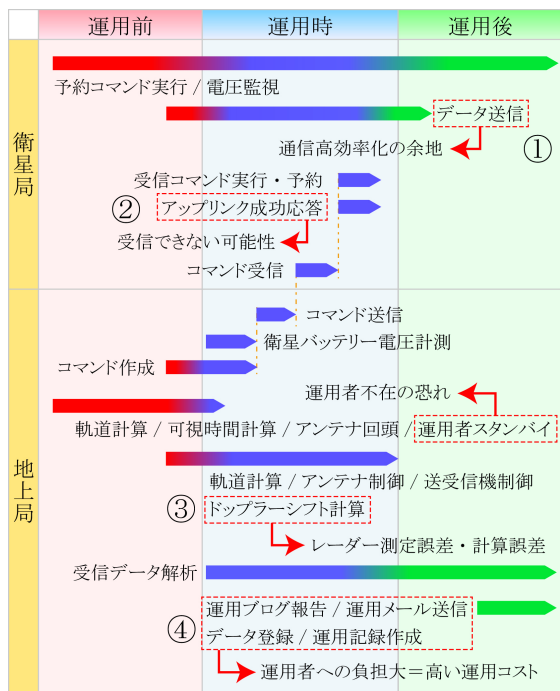


Fig. 2 Problems of the operation schedule

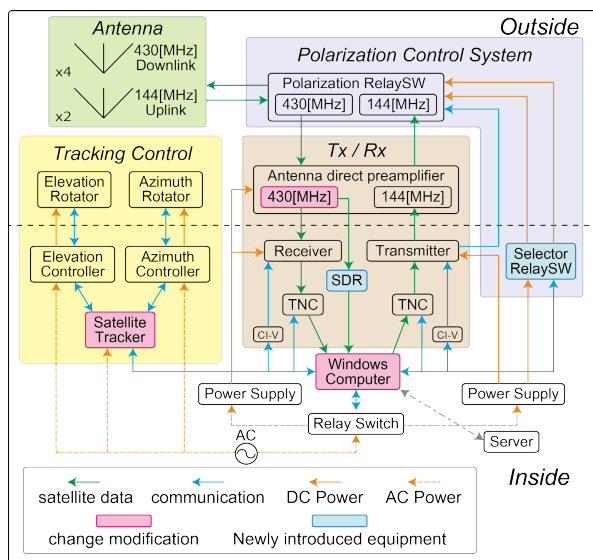


Fig. 3 Ground Station system diagram

2.1.1. 課題：CWモーリスの自動受信

ドップラシフトは高速で飛翔する物体から電波が射出される場合にも発生する。そのため地上局は、北アメリカ航空宇宙防衛司令部（NORAD）がレーダーで測定したデータからSGP4という計算モデルを用いて衛星の現在位置を推定^[3]し、衛星と地上局との相対速度から周波数の変化量を計算・補正する必要がある。しかし、計算による修正だけではCWの自動受信は実現できない。以下はその理由と対処法である。

CW送信機は他送信機に比べ省電力であるが、それ故に出力も小さく、通信帯域幅も狭い^[4]。実際の衛星運用の経験から、中心周波数が50[Hz]以上ずれているとモーリス信号を正常にデコードできないことが多い。現状では、中心周波数を50[Hz]以上の精度で計算することは、SGP4の計算誤差とNORADの測定誤差を考えると難しい。

これを解決するためSTERAは、CW受信時に受信周波数を故意に変動させ、CWビーコン音をサーチするという手法をとる。CW送信機は特有の矩形波を送信と停波を繰り返すことでモーリス信号を伝達する。この矩形波の周波数を事前に登録し、受信機が取得するビーコン音をFFTにて解析・比較することで、正確な受信周波数へ合わせることが可能となる。これをフィードバック制御することで、これまで難しいとされてきたCWの自動受信を実現する。Fig. 4は、中心周波数修正の様子を図にしたもので、FFTにより解析したビーコン音周波数が登録値よりも高い場合（上段）無線機の周波数を上げることで正しい周波数（中段）へ合わせるという動作を示している。逆の場合も同様、下段のような動作を行う。

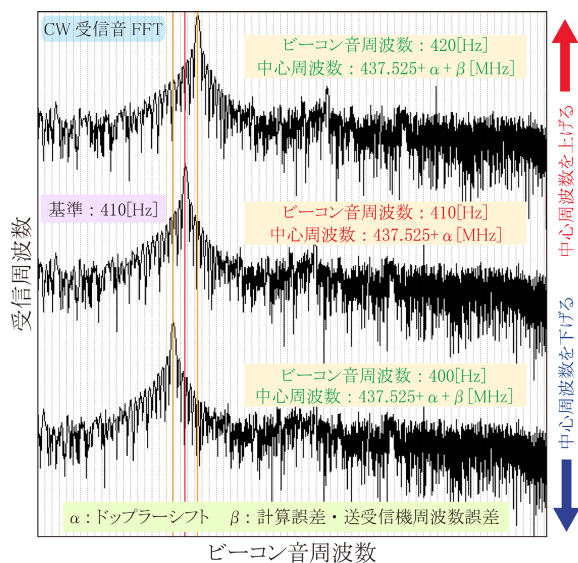


Fig. 4 Receiver feedback control by FFT of CW beacon

2.2. 地上局システムの自動化によるデータ通信量の拡大

衛星の運用自動化は、複数の無人のアマチュア局でのデータ取得を可能にし、データ通信量を拡大する。アマチュア無線帯を使用する場合、世界中に存在する数多くの無線局が地上局になり得る。そこで、将来的にSTERAを導入した地上局は、事前に受信協力を承諾した地上局に対し、自動運用を実施、取得したデータを自動で集約・統合可能なように設計している。これを実現するため、本システムは以下の項目に示すような、汎用性・拡張性・メンテナンス性を有している。

2.2.1. 汎用性：ハードウェアの開発

STERAに汎用性を持たせるため、本研究の過程でFig. 5に示すような様々なアマチュア局に対応可能なアンテナローテータコントローラ“ARC-01”を開発した。

ローテータの多くは、アナログ信号で動作するため、コンピュータから直接制御できない。これまで多くの大学・無線家がこのA/D変換にFig. 6のような装置を使用していた。しかし、現在この製品は、入手が難しい状態であるため、新規開局・既存アマチュア局の衛星対応化の際に問題となる。そこで開発したARC-01は、高分解能A/DコンバータとMicrochip社のPICマイコンをモジュール化したPICNIC^[5]という製品をベースにした。価格も比較的安価であり、汎用性としては申し分ないと考える。



Fig. 5 Flexible controller for antenna rotator “ARC-01”



Fig. 6 Discontinued controller “RAC-805” [4]

2.2.2. 拡張性：ソフトウェアTNC

現在，一般的な小型衛星が使用しているアマチュア通信プロトコルの多くは“AX.25”であるが，実例として開発中のNEXUSでは，通信高速化のため，AX.25に誤り訂正符号を加えた“FX.25”というプロトコルとQPSKという特殊な変調方式を利用して高速通信を実証するため，受信には専用のデコーダーが必要になる．そこでSTERAでは特殊方式にも対応可能な様，デコーダーを独立させた．この拡張性が，様々な環境の無線局へSTERAの導入を後押しする．結果的に導入局が増えることで，データ受信量も増大すると考えている．

2.2.3. メンテナンス性：月を利用したアンテナ自動校正

地上局のアンテナは，屋外の高い位置に設置され，これを平時から整備・維持することは一般的には難しい．そこで地上局受信設備の受信安定性を高めるため，ローテータの角度修正が行える機能をSTERAに実装した．この機能は，月の軌道計算を行いアンテナで追従することで，目視によりアンテナのオフセット値を調整できるというものだ．将来的には，自動で月からの反射波を利用して受信強度から正確に角度調整が可能かどうかを検討中である．

2.3. その他の手法によるデータ通信量の拡大

本項では，2.2項で示した手法以外にデータ通信量を増やすために日大局が行った改良点を示す．

2.3.1. アンテナ直下型プリアンプの高性能化

ここ数年の技術進歩により，アンテナに搭載するプリアンプ“Low Noise Amplifier”（以下LNA）にも進展があった．日大局も開局から10年以上経過しており，最新のLNA導入により，公称値でノイズ量は半分・ゲインは1.5倍となった．

3. 衛星局システム

運用自動化に向けては，Fig. 2 の①，②に示すような地上局側だけで解決できない課題も存在する．このため，開発中のNEXUSにも実装される衛星局の設計手法を紹介する．

3.1. 運用コスト削減のための運用自動化への課題

3.1.1. 課題：アップリンク (Uplink) 成功判定

小型衛星との通信は長距離通信を行うが故に，地上局が送信したコマンドは必ずしも衛星に受信されない．自動運用の際，Uplink成功の判定を誤れば，同じコマンドが何度も送信され，衛星の生存にも影響を与えかねない．そこで衛星局には，Uplink成功の返答を帯域幅の狭いCWではなくFMにて送信し，受信コマンドが前回の物と重複する度にFMでアラート音を送信する機能を持たせることが望ましい．また，重複コマンドを実行しない「自動運用モード」を搭載することで

自動運用時の衛星本体への影響は抑えられる．しかし判定自体は確実性を持たないため，地上局が誤った解析を行う可能性が残される．これに対する設計手法を3.1.2.項にて示す．

3.1.2. 課題：衛星の送信データ内容の明示

衛星局には，送信データにデータの種類の示す識別符号を含めることが望ましい．3.1.1.項の対策が判定を検知できなかった場合，Fig. 7のように別の運用モードのフォーマットで解析されることになる．誤った解析結果が出ないように設計することで修正の手間(コスト)とデータ量の拡大が見込める．

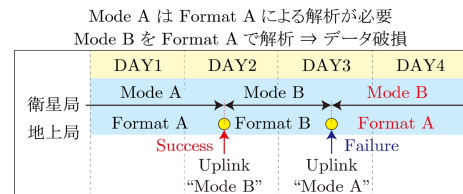


Fig. 7 Failure of parsing with wrong format

3.2. データ通信量拡大のための手法

3.2.1. 重複データの再送防止

アマチュア無線帯・高周波数帯のどちらの通信でも送信時にパケットというデータのまとまりを形成し，送信している．衛星との通信は3.1.1.項に示したように必ずしも受信できるわけではない．そのため，衛星は地上局がデータを受信できるまで，何度も同じパケットを送らなくてはならない．この過程で地上局が既に受信しているパケットも再度送信されることがある．地上局が受信できたパケット番号を衛星側に送信し，衛星側が該当パケット番号を再送しないよう，除外することでデータの受信量を拡大する．

3.2.2. 仰角による送信ビットレートの変更

あらかじめ，衛星側の送信ビットレートを変更可能な仕様にしておくことで，受信量の拡大が可能である．

実装例として，NEXUSは可変ビットレートに対応したFSK送信機を搭載しており，STERAが時刻における衛星との距離を計算・衛星に相対時刻と所望のビットレートを伝達することで，距離に応じて伝送速度を変化させることが可能となる．

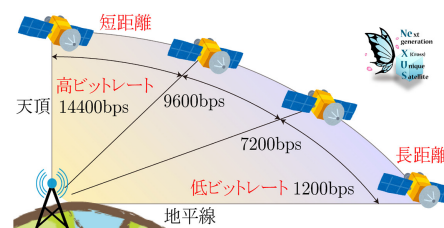


Fig. 8 Changing bit rate by distance from satellite

4. 構築結果

本研究の提案する小型衛星の自動運用に特化した地上局システムの構築結果を示す．

4.1. CWビーコンの自動受信

2.1.1.項で実現したCWビーコンのFFT解析による周波数自動調整機能の実験結果を示す．実験には電波法の都合上，衛星のデータ受信に使用する周波数ではなく，地上局からのデータ送信に使用する144[MHz]帯にて，開局済みのアイコム社「IC-9100」無線機を使用した．Fig. 9に実験結果を示す．

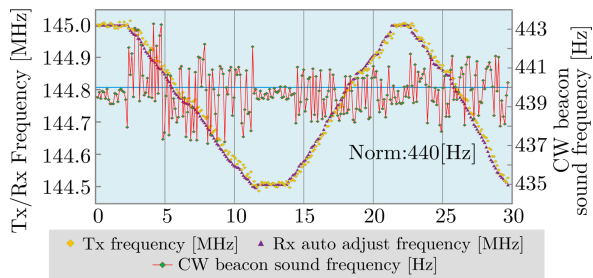


Fig. 9 Center frequency estimation by FFT analysis

ドップラーシフトを模擬するため送信機の周波数は手動で変動させ、受信機に接続したコンピュータが受信音をFFT解析し、自動で受信周波数を最適化させている。実験の結果、CWビーコン音の基準周波数である440[Hz]を追従できていることから、実際にCWを自動受信可能であることを示した。ただし、本測定は地上での通信のため信号強度・ノイズ量・周波数帯が異なるため、今後は軌道上の実機による実験を行う。

4.2. 月を利用したアンテナの校正

アンテナのキャリブレーションが実際に行えるかどうかの確認のため、日大局のアンテナにビデオカメラを搭載し、アンテナの誤差を測定した。この際、ローテータのコントロールには開発したARC-01を使用し、動作評価を同時に行った。



Fig. 10 Antenna angle check by moon tracking①

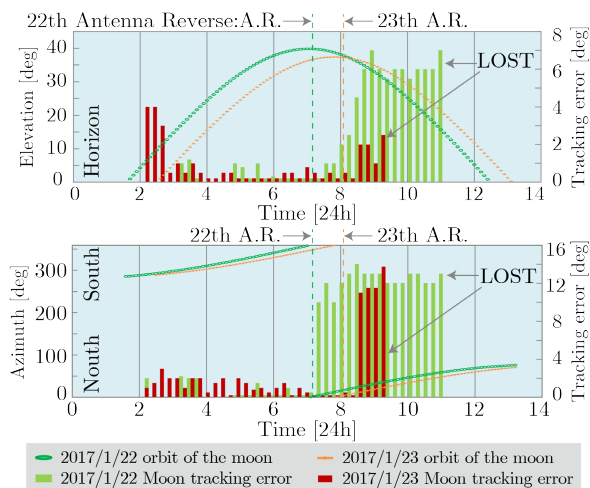


Fig. 11 Antenna angle check by moon tracking②

日大局のアンテナは360度以上回転しないため、真南で反転を行うよう制御している。Fig. 10の右図はアンテナ反転後の追尾の様子で、本来の方向とは大きくずれていることがわかる。Fig. 11は実際のアンテナの向きとその誤差量を示し、緑色と橙色の線が月の軌道であり、誤差量を示す棒グラフは第2軸（右側）を使用した。実験の結果、反転動作後の南西の追尾精度の低下が激しく、アンテナ性能に悪影響を与えていることが判明した。アンテナの指向性を考慮すると、南西側は1～2[dB]の損失があると考えられ、早急な対策が必要である。

4.3. LNA交換による性能評価

2.3.1項で交換したLNAによる受信アンテナの性能向上評価をスペクトラムアナライザにて行った。測定は各10回ずつ行い、主用周波数の周辺60[MHz]分のデータを平均した。測定の結果、交換後の新型LNAはノイズ量の増大を抑えつつ、衛星通信に使用する437[MHz]周辺の信号の大幅増幅に成功、実運用でもCWビーコンの大幅な明瞭化が確認できた。

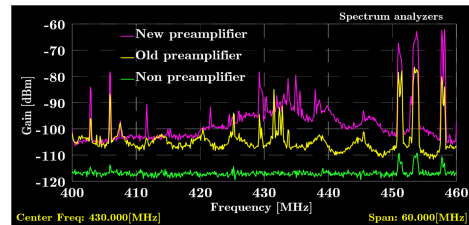


Fig. 12 Improved performance by replacing amplifier

5. 考察

地上局システムは、CWによる中心周波数推定の地上試験成功により、小型衛星の自動運用が可能な目途がたつた。また、受信量の拡大を狙った月によるアンテナキャリブレーションは、その目的を十分に達成し、実際に日大局アンテナの不具合を発見した。更に、LNA交換は実運用に効果を発揮し、出力の弱いCWビーコンの明瞭化に成功した。衛星局システムは、記載した手法により効率化と自動運用への対応を図り、実際の結果が出るまでに時間がかかるものの、実証の機会を得ることができた。しかし実際、アップリンクを含め完全に自動で運用するには、他にも電波法の問題が存在する。対応には、新たにサーバーの構築・暗号化通信等が必要になる。これらの問題を解決し、完全自動運用を実現した通信システムをパッケージ化したうえで、軌道上にて実証を行うまでにはより時間がかかり、研究の継続が必要である。

6. 結言

本研究では、汎用性・拡張性・メンテナンス性を持った小型衛星の運用を支援する通信システム（地上局・衛星局）を提案した。自動運用の要となるCWビーコンの自動化、データ受信量拡大に向けて実施したアンテナの自動校正、LNAアンプの導入に関して実験により有効性を示した。今後は、小型衛星の完全自動運用達成のため、システムに改良を加える。また、地上局と衛星局の両面から「運用コスト削減」と「データ通信量の拡大」を目指した連携が密な通信システムをパッケージ化する。パッケージ化した高効率衛星通信システムは、高周波数帯において軌道上実証を行い、評価する。同時に、地上局ネットワークを構築するために、実際に本システムの導入に賛同する試験局を募集・実装し、複数局の同時受信による通信量拡大を目指す。

参考文献

- [1] Satellite Industry Association, 2016 SIA State of the Satellite Industry Report. At <http://www.sia.org/wp-content/uploads/2016/06/SSIR16-Pdf-Comp-for-Website-Compressed.pdf> 2016
- [2] 永松弘行:「どこでも運用システム」による「れいめい」定常運用全自動化の試み。第60回宇宙科学技術連合講演会, JSASS-2016-4194
- [3] 宮崎康行: 衛星の軌道・姿勢の簡易計算マニュアル 2007
- [4] 一般社団法人 日本アマチュア無線連盟「アマチュアバンドプラン」 At http://www.jarl.org/Japanese/A_Shiryo/A-3_Band_Plan/bandplan20150105.pdf 2016
- [5] TriState: PICNIC At <http://www.tristate.ne.jp/picnic.htm>
- [6] クリエイトデザイン: RAC805 取扱説明書