

1E11 超小型テレメータ受信機実用化試験 イプシロンロケット F4 衛星分離確認信号カナダでの受信結果

○土屋直大^{†1} 砂見幸之^{†2} 笹生拓児[‡] 福島幹雄[‡]

^{†1} 宇宙航空研究開発機構 鹿児島宇宙センター 射場技術開発ユニット 〒891-3793 鹿児島県熊毛郡南種子町大字茎永麻津

^{†2} 宇宙航空研究開発機構 研究開発部門 第四研究ユニット 〒305-8505 茨城県つくば市千現 2-1-1

[‡] 株式会社 ドルフィンシステム 〒171-0014 東京都豊島区池袋 2-45-1 アークシティ池袋ビル 601

Development of Extremely Small Telemetry Receiver Using Software Defined Radio
Naohiro TSUCHIYA^{†1} Koji SUNAMI^{†2} Takuji SASOH[‡] Mikio FUKUSHIMA[‡]

Key Words: Space, SDR, Receiver, Tracking Station

Abstract

Future space launch projects will include missions with various flight paths is, creating a need for technology that can provides compact, low cost, and highly portable receiving station. In an effort to reduce costs and increase usability of rocket telemetry receiving station, we developed a specific telemetry receiver and mobile tracking station for JAXA rocket which utilizes SDR technology. At the launch operation of Epsilon F4, we conducted a verification test of our mobile station to receive the satellite separation signals in Canada.

1. 目的および背景

宇宙航空研究開発機構（JAXA）は、ロケット打上げ時の公共の安全を確保するためや、飛行中のロケットの状態等を把握するために、ロケットからテレメータデータを受信している。データを受信する設備は、打上げ場周辺に配置されたアップレンジ局とロケットが飛んでいく方向に配置されるダウンレンジ局に大別されるが、いずれの設備も大型かつ整備コストが高く、特にダウンレンジ局は遠隔地や海外に配置されるため、移設や新規整備を行うことが困難である。今後の宇宙輸送プロジェクトの多様な飛行経路のミッションや、データ取得要求に機動的に対応するためには、小型で可搬性に優れた受信設備を実現する技術が求められる。

JAXA ではこれらを実現する技術として、プログラムで送受信器の機能を自由に制御することが可能な、ソフトウェア無線（SDR：Software Defined Radio）の技術を活用した超小型かつ安価なテレメータ受信装置の開発を行ってきた。これまでに、この受信機とアンテナやネットワーク機器を組み合わせた簡易な超小型テレメータ受信局を構築し、ロケット打ち上げ時の信号を使った受信検証を行っている¹⁾。

今回は、イプシロン 4 号機に搭載される複数衛星の分離信号が、既存のテレメータ受信局のカバーする範囲では確認できないことを受けて、超小型テレ

メータ受信局をカナダ東部に設置し、衛星分離信号の受信を簡易的に行ったので結果について報告する。

2. 超小型テレメータ受信局概要

超小型可搬テレメータ受信局の構成を図 1 に示す。本受信局は、SDR 用ハードウェアである USRP-RIO（Universal Software Radio Peripheral - Reconfigurable I/O）を用いた超小型テレメータ受信機、空中線装置、校正系装置、ルータ及び衛星回線モデム等のネットワーク装置で構成している。非常に簡素な構成ながら、最低限のテレメータ受信局に必要な機能が集約しており、地球上の極域を除くエリアでテレメータの受信から種子島へのリアルタイムデータ伝送まで行うことができる。構成機器は全て汎用品で構成しており、調達や輸出入等の手続きに制約が少ない。また、輸送もキャリーケース 2～3 個で行えるため、海外ダウンレンジ局としての運用が非常に容易である。

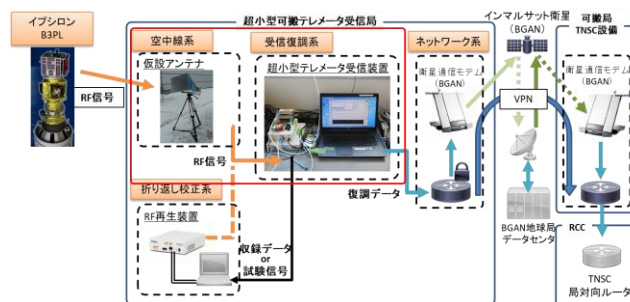


図 1. 超小型可搬テレメータ受信局 全体構成

今回は、運用に供するまでの準備期間 1 か月と短く、衛星分離信号の受信確認のみを優先することとし、受信復調に最低限必要な機材（図 1 中の赤線）のみを用いて運用を行った。アンテナには最低限受信が成立する 20dBi の標準ゲインホーンを選定した。運用時は AZ/EL を固定し、アンテナ主ビーム中を通過するロケットの信号の受信を行う。

使用した機材のリストを表 1 に示す。

表 1 使用機材リスト

名称	型番	諸元等
アンテナ	PE9864-NF-20	20dBi HornANT
LNA	PE15A1010	Gain:40dB、NF0.9
BPF	WFB-951	2289.6±7MHz
受信機	本体	USRP-2943R
	制御用 PC	Zbook17 G3
	ソフト	DolphinSF-5
		受信復調ソフト

3. イプシロン 4 号機衛星分離確認信号受信

3.1. 実験概要と受信局設置場所

イプシロン 4 号機飛行経路と衛星分離タイミングおよび、小型受信局設置場所を図 2 に示す。

イプシロン 4 号機にて打ち上げられる各種衛星は、南アメリカ大陸から北アメリカ大陸にかけて、順次高度を下げながら、所定の軌道に投入される。そのため JAXA が、ロケットの状態把握及び、衛星分離確認のため、南米のチリ（サンチャゴ）に配置している地上局の通信可能範囲内では、すべての衛星分離を確認することができない。通常このような場合は、ロケット内のメモリに分離時のテレメータデータを記録して、地球を周回し日本上空を通過する際にデータを地上に伝送する手法をとるが、実際の衛星分離からデータ取得まで時間を要することや、周回時にはロケットの姿勢制御がなされておらず、地上と通信ができないリスクがある。

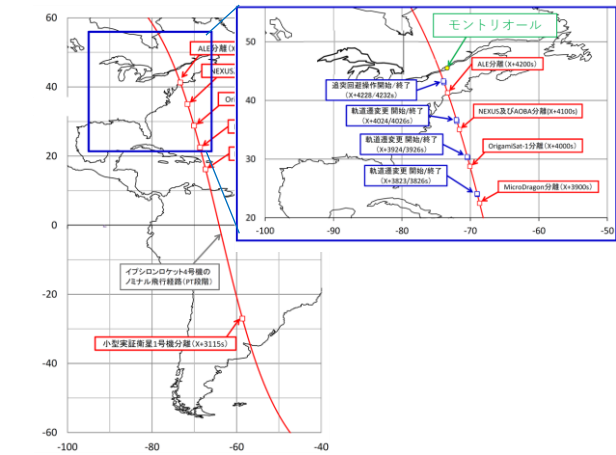


図 2. イプシロン F4 分離シーケンスと受信場所

そこで今回は、すべての衛星が正常に分離されたかをリアルタイムで確認するため、可搬性に優れ、容易に設置運用が可能な超小型受信局を、最後の衛星が分離された後かつ、姿勢が安定している、カナダ東部のモントリオールに設置しデータ受信を実施した。モントリオールには、カナダの宇宙機関である CSA（Canadian Space Agency）があり、今回のデータ受信のための機材設置を快諾いただいたため、敷地内での局の設置、運用を行った。

受信したテレメータデータは、その場で解析を行い、衛星分離の状態を電話にて種子島の打上げ管制へ情報を提供した。

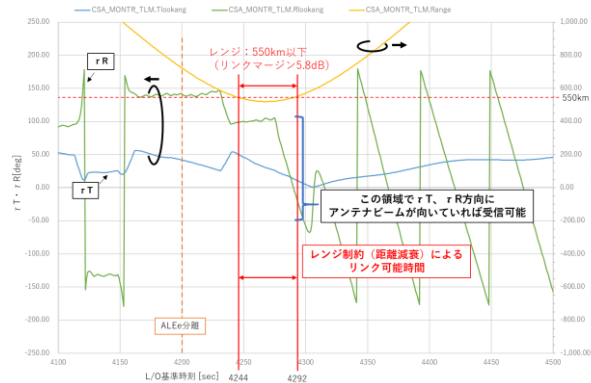
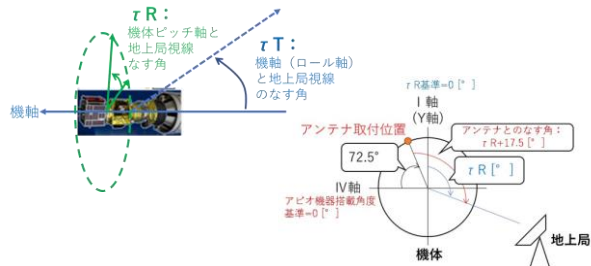
3.2. 受信環境の事前解析

機材設置場所をカナダのモントリオールとするにあたって、ロケットの姿勢、位置等を考慮して受信成立するか的事前解析を行った。受信機性能を考慮したリンク解析結果を図 3 に示す。また、ロケットから見た際の地上局可視性の解析結果及び、アンテナに対する受信可能範囲を解析した結果を図 4 に示す。

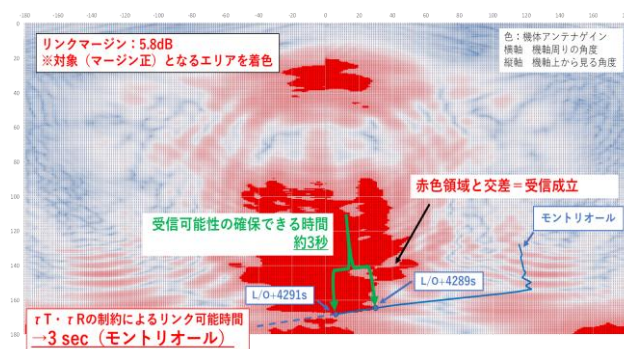
今回運用する受信局の構成及びロケットの飛行経路において、レンジ（550km 以内）による制約のみ考慮すると、受信可能時間は約 48 秒となるが（図 4(a)）、リンク成立にはロケットのアンテナが地上方向をむいている必要があり、ロケットの姿勢（ ϵT 、 ϵR ）によっても制約を受ける。これを考慮し、ロケットアンテナと地上アンテナの直視性を解析した結果、約 3 秒程度、受信可能時間を確保できる可能性があることを確認できた（図 4(b)）。

対象：2段UHF基本テレメータ		2289.6 MHz	$\lambda =$	0.13 m
回線種類：UHF-PM		131.072 kbps	$c =$ 3.00E+08 m/s	
項目		設計値	Unit	備考
1 実効放射電力 PE (内訳)	送信機出力 PTX	42.6	dBm	7.7 W 検査成績
	送信アンテナ利得 GATX	38.9	dBm	
	送信系給電損失 LFTX	6.0	dBi	
		-2.3	dB	
2 自由空間損失 Ld		-154.5	dB	550 km
3 各種損失 Lv (内訳)	偏波損失 Lp	-0.4	dB	直線vs直線 UHF帯
	大気吸収損失等	0	dB	
	その他損失	-0.4	dB	
		0	dB	
4 G/T (内訳)	受信アンテナ利得 GARX	-6.3	dB/K	標準ゲインホーン 想定
	受信給電損失 LFRX	-20	dBi	
	システム雑音温度 TS	-1	dB K	
	アンテナ雑音温度 TA	25.3	K	
	受信機雑音温度 TE	67.5	K	
5 受信電力レベル PRX		-93.3	dBm	0.9 dB Amp NF
6 雑音電圧密度 N0		-173.3	dBm/Hz	
7 C/N0		80.0	dB/Hz	
8 最低受信感度		-99.2	dBm	
9 マージン		5.9	dB	
要求C/N0		74.1	dB/Hz	
Eb/N0		22.94		
所要S/N		9.6	dB	@BER 10 ⁻⁵
変調損失		4.2	dB	
HW劣化量		9.14	dB	実測値(境界域を含む)

図 3. RF リンク解析結果



(a)機体姿勢とレンジによるリンク制約



(b)アンテナパターンに対する地上局可視性

図 4. 地上局可視性の解析結果

3.3. 設置運用

小型受信局のアンテナは CSA 敷地内の衛星追尾運用用の 11m アンテナ横に設置し運用を行った。アンテナ設置位置のパラメータを表 2、3 に示す。また、設置状況の写真を図 5 に示す。なお、アンテナは、図 5(b)に示すように、ロケットアンテナとの偏波面（直線-直線偏波）を合わせるために 11deg 傾けて使用している。

表 1 受信局設置場所位置座標 (WGS-84)

緯度 (deg)	45.518767
経度 (deg)	-73.396660
高度 (m)	26

表 2 アンテナ設置角

AZ (deg)	323.7
EL (deg)	63.7



(a)アンテナ設置状況 (11m アンテナとの位置関係)



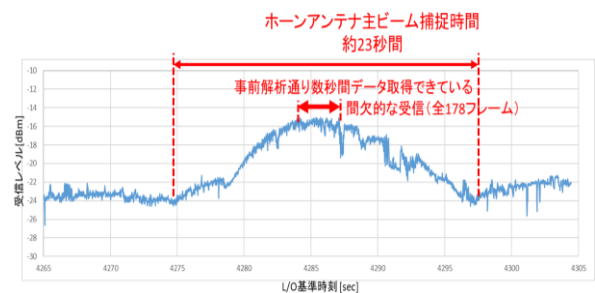
(b)アンテナ偏波面の補正状況

図 5. アンテナ設置状況

3.4. 受信結果

3.4.1. リアルタイム受信結果

イプシロン 4 号機フライト時にリアルタイムで取得した受信信号の AGC 及び、データの復調結果を図 6 に示す。



リアルタイムデータ復調結果(一部)

FA	F3	20	01	6C	FF	A9	FE	19	BF	74	E4	F0	5C	0C
FA	F3	20	01	1F	FF	FF	53	52	42	78	79	120	C8	D6
FA	F3	20	01	10	F8	07	FF	4D	6E	84	79	121	86	22
FA	F3	20	01	D9	FF	50	78	66	7C	C7	0C	01	57	ED

0101 0011 (HEX: 53)
 ++ RAPIS-1 分離ステータス
 一部確認できず (DAU-E3衛星分離ステータス)

1111 1111 (HEX: FF)
 ++ MicroDragon 分離ステータス (LIGHTBAND#2)
 ++ RISAT 分離ステータス (LIGHTBAND#1)
 ++ NEXUS & Aoba 分離ステータス (E-SSOD#2)
 ++ OrigamiSat-1 分離ステータス (E-SSOD#1)

5衛星全分離ステータス確認

図 6 リアルタイム受信時の AGC 値及び、復調結果

事前の解析のとおり、数秒間の間欠的なデータの取得ができており、受信レベルマックス付近で連続したフレームの受信が確認できた。データ復調結果としては、一部データが欠損したものの、5 衛星分の分離状況をリアルタイムで確認した。打上げ時はこの結果を第一報として種子島に伝達した。

3.4.2. RF データ事後解析結果

リアルタイム受信後に、小型受信局にて記録していた RF データを使い、事後解析を行った結果 (AGC、分離ステータス) を図 7 に示す。

受信レベルマックス付近でリアルタイム受信時よりより安定して連続したフレームの受信が確認できており、全衛星の分離状態も正常に確認できた。

リアルタイムより良好な結果が得られた理由として、解析には記録した FR データを使うため、ビット判定時に信号の相関が取りやすいことが考えられる。



事後解析による復調結果(一部)

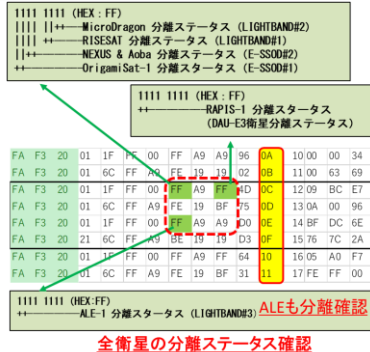


図 6 事後解析の AGC 値及び、復調結果

4. CSA 局 (11m アンテナ) での受信結果

今回 CSA の衛星運用用の 11m のアンテナでもイプシロンの追尾とデータの受信を行った。その結果を図 8 に示す。

CSA モントリオールはイプシロン 4 号機の軌道に対して、ほぼ直下に位置しており、スカイラインも開けているため低エレベーションから安定した追尾ができています。待受け角の 2deg から LOS まで、約 700 秒のデータ受信に成功し、受信時間内には、キューブサット 3 衛星と小型衛星 1 つの分離シーケンスが含まれている。

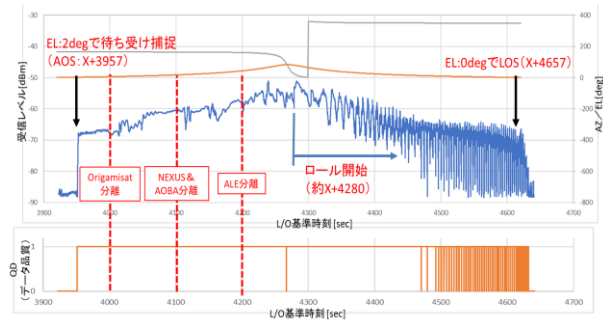


図 7 CSA11m アンテナの AGC 値及び、復調結果

5. まとめ

これまで開発を続けてきたソフトウェア無線技術を用いた超小型のテレメータ受信局を、ロケット打上げ時に海外で運用し、機材の輸出入から設置運用までトータルした実証を行った。実際にイプシロン 4 号機からの衛星分離信号をリアルタイムおよび、事後解析にて確認することができ、受信結果も事前の解析と一致することを確認することができた。また、ロケットの姿勢制御によるアンテナ指向や受信局の機能改善等により、あと数 dB 受信レベルが高くなれば十分に安定し連続したデータ受信が可能となることも受信結果から明らかとなった。

今回の実験を通して本受信局は、既存局に比べて受信能力や運用に制約がもの、今回のようなスポット的なデータ受信の要求に即対応し、必要なデータを受信するシステムとして運用が可能なことを実証できた。今後、さらなる受信局の性能改善を進めるとともに、柔軟なデータ取得要求に対応するための手段として本受信局を、ロケット打ち上げ時の運用に組み込むことを目指す。

参考文献

- 1) 土屋直大, 砂見幸之, 油谷崇志, 笹生拓児, 福島幹雄: ソフトウェア無線を利用した小型安価なテレメータ受信局の実証, 第 62 回宇宙科学技術連合講演会講演集, 2018.10