

航空機を対象にしたデータ伝送実験

平良真一 佐藤正樹 山本伸一

技術試験衛星VIII型は、Sバンドによる移動体用の衛星通信機器を搭載した大型静止衛星である。今回、本衛星を用いた航空移動衛星通信実験を実施する機会を得て、パケット信号によるデータ伝送試験を実施した。飛行試験による性能評価の結果、信号のスループット性能は、航空機の水平飛行時には、地上での静止状態とほぼ同様の特性を示し、また、傾斜角 20 度での旋回飛行時には、C/No 値で約 2dB の性能劣化が認められた。

1 はじめに

技術試験衛星 VIII 型 (Engineering Test Satellite VIII: ETS-VIII, 愛称: きく 8 号) は、平成 18 年 12 月に H-II A ロケットにより打ち上げられた 3 トン級の大型静止衛星である^[1]。衛星には、移動体衛星通信実験用に S 帯 (2.6/2.5GHz) の通信機器が搭載されており、これまでに、衛星搭載機器の性能評価や陸上移動衛星通信実験等を実施してきている^{[2]-[4]}。今回、航空移動衛星通信実験を実施する機会を得、航空機上から合成開口レーダによる地上の撮像を行って、その撮像データを衛星経由で地上へと送るデータ伝送実験を実施し、約 100kbps での画像データ伝送に成功した^[5]。また、飛行中の伝送路における基本特性を把握するため、パケット信号による伝送試験を行い、スループットや受信電力等のデータを取得した。本文では、実験に使用した航空移動衛星通信システムの概要、並びに、実施した伝送実験の結果について述べる。

2 航空移動衛星通信システム

今回の実験にて使用した航空機は、Gulfstream II 型機である。航空機地球局のアンテナには、車載用に開発した平面型のアクティブフェーズドアレーアンテナ (Active Phased Array Antenna: APAA) を使用し^[6]、航空機の機体上部へと搭載した。アンテナレドームは、以前に実施した Ka 帯による移動体衛星通信実験^[7] に用いたものをそのまま流用した。なお、航空機の下部には、撮像用の合成開口レーダが搭載されている。実験システムの構成図を図 1 に示す。基地局は、鹿島宇宙技術センター内に設置され、直径 3.6m のパラボラアンテナを持つ、S 帯基準局を用いた。航空機地球局の諸元を表 1 に示す。変復調器は、変調方式として BPSK、QPSK、Offset QPSK を持ち、また伝送速度が

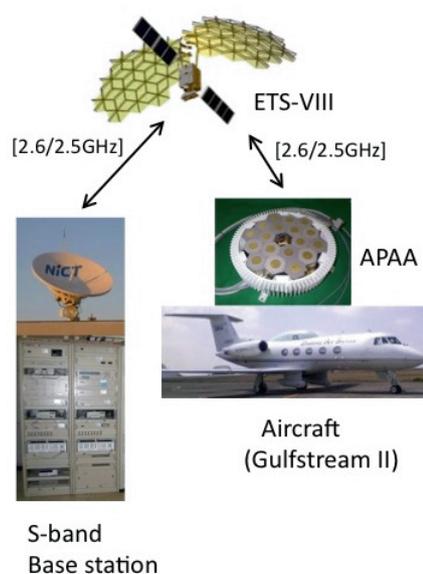


図 1 航空機実験システム構成図

表 1 航空機地球局の主要諸元

* アンテナ部
アンテナ形式: セルフダイプレクシングアンテナ
上層: 円形パッチ (送信)、下層: 円環パッチ (受信)
素子数: 18
移相器: 無限移相器 (ダブルバランスドミクス型)
寸法: $\phi 440 \times H117\text{mm}$ 重量: 18.7kg
周波数: 2655.5~2658.0MHz (送信)
: 2500.5~2503.0MHz (受信)
偏波: 左旋円偏波
アンテナ利得: 12.3dBi(送信) 14.5dBi(受信)
EIRP: 26.3dBW G/T: -12.3dB/K
追尾方式: クロースドループ追尾
及びオープンループ追尾方式
追尾角速度: 最大 30° / 秒
* 変復調部
変調方式: BPSK, QPSK, Offset QPSK
伝送速度: 5kbps~3Mbps
誤り訂正符号: 畳み込み符号、ターボ符号、
リードソロン符号

表2 回線設計例

Up-link (2.6 GHz)		Down-link (2.5 GHz)	
Aeronautical earth station		Satellite	
HPA output power	25.0 W	HPA output power	20.0 W
Feed loss	0.0 dB	Feed loss	1.8 dB
Antenna gain	12.3 dBi	Antenna gain	40.8 dBi
Mobile station EIRP	26.3 dBW	Satellite EIRP	52.0 dBW
Propagation loss	192.8 dB	Propagation loss	192.3 dB
Satellite		Kashima S-band earth station	
Rx antenna gain	23.8 dBi	Rx antenna gain	33.5 dBi
Feed loss	2.8 dB	Feed loss	0.8 dB
Rx power (at LNA in)	-115.5 dBm	Rx power (at LNA in)	-77.6 dBm
System noise temp.	510 K	System noise temp.	265 K
System G/T	-6.1 dBK	System G/T	8.5 dBK
Up-link C/No	56.0 dBHz	Down-link C/No	96.8 dBHz
		Return Link Total C/No	56.0 dBHz

5kbps～3Mbpsの範囲で設定が可能な、市販の汎用品である。

衛星は、打ち上げ直後に実施した初期性能試験において、大型展開アンテナ受信系に不具合が見つかり^[8]、通信実験におけるS帯アップリンクの衛星での受信には、本来は測位実験に用いる開口径1mのパラボラアンテナを用いており^[9]、衛星における受信系の性能指数(G/T)は、大型展開アンテナにて予定していた約14dBKに比べて20dB程低い値である約-6dBKとなっている。アップリンク、ダウンリンク共にS帯を用いて、衛星をベントパイプモードにし、水平飛行を想定した場合の回線設計例を表2に示す。表2に示すようにダウンリンクの回線品質は十分に高く、回線品質は航空機地球局から衛星へ向かうアップリンクにより決定される。回線で設定できる標準的な信号電力対雑音電力密度比(C/No)の値は、約56dBHzである。

3 飛行実験

3.1 実験パラメータ

水平飛行で予想される回線のC/No値は56dBHz程度と大きくはなく、また飛行中の測定時間は限られるため、変調方式にはQPSK方式を選択して、統計データ収集のための情報伝送量を確保しつつ、パケット信号の伝送速度は10kbpsに設定し、受信電力の測定にあたっては、電力測定用の無変調波信号を別の周波数で同時送信することなく、受信したパケット信号の変調波電力を、スペクトラムアナライザの分解能帯域幅を30kHzに設定して、そのまま変調波の受信電力を計測した。なお、誤り訂正符号は用いておらず、伝送に用いたパケット信号の信号長は100byteである。航空機地球局における衛星の追尾には、ステップトラックに

よるクローズドループ方式と、航空機からの機体位置及び方向の情報を用いて制御を行うオープンループ方式があり、飛行実験においては、比較のため、双方を用いて受信電力の測定を実施した。衛星回線の評価としては、水平飛行中のデータ受信特性、並びに傾斜角20度における旋回飛行中のデータ受信特性を取得した。また、同じ飛行中に実施した画像伝送実験においては、信号の伝送速度を128kbpsに設定し、誤り訂正符号として、符号化率3/4のターボ符号を用いた。したがって、画像伝送実験での情報伝送速度は、96kbpsとなる。画像信号としては、サイズが654Kbyteの画像ファイルを、汎用のプロトコルであるFile Transfer Protocol (FTP)により転送し、その転送時間を測定した。

3.2 実験結果

(1) 受信信号特性

信号伝送中の通信波状態を把握するため、航空機地球局から信号を送出し、衛星経由で、鹿島宇宙技術センター内にあるS帯基準局で受信して、その受信電力を測定した。図2に、水平飛行時の受信電力の変動の様子を示す。アンテナの制御は、航空機からの姿勢等の情報により衛星追尾を行うオープンループ制御方式を用いている。図2より、信号の受信レベルは安定しており、変動幅は1dB以内に収まっていることがわかる。

図3には、航空機が傾斜角20度で旋回中における、測定した受信電力値の変化の様子を、実線にて示してある。こちらも、アンテナの制御は、オープンループ方式を用いている。旋回は茨城県潮来市の上空で行い、航空機は、東向きから、右回りで360度旋回している。また、点線はS帯基準局において予想される受信電力

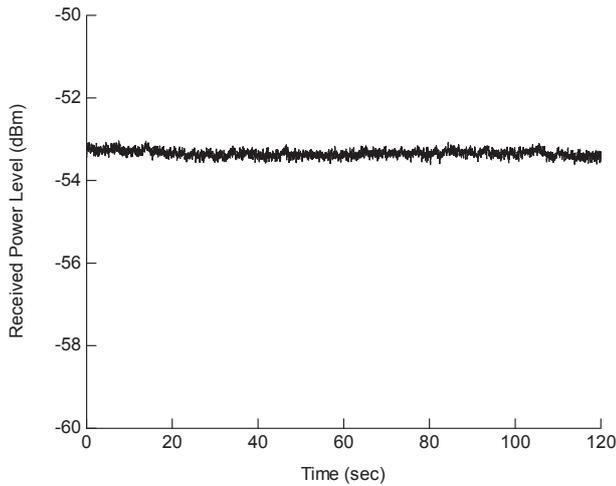


図2 水平飛行時の受信レベル (オープンループ制御)

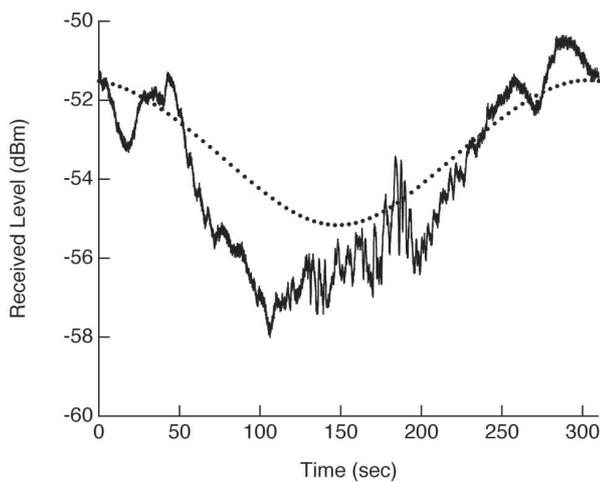


図3 オープンループ方式における受信レベル (旋回時：傾斜角 20 度)

値を計算した結果を示している。

図3における計算値算出の手順は、次の通りである。航空機上からの衛星の相対的な仰角は、約30度から70度の間で、航空機の進行方向(ヨー軸)に対して、正弦波曲線に近い変化をする。図4に航空機が潮来市上空にて旋回する場合の、航空機からみたETS-VIIIの相対的な仰角を計算した結果を示す。アンテナはフェーズドアレー方式による平面アンテナであり、アンテナが水平面上にあれば、アンテナ利得は、衛星の仰角が低くなるほど小さくなる。図5に、アンテナが水平状態時の衛星仰角に対するアンテナ送信利得の実測値を丸印にて示す。図5における点線は、実測値から推定した関数曲線である。図4及び図5のデータより、旋回中の航空機の進行方向に対するアンテナの送信利得を求めることが可能で、求めた利得と表2の回線設計表並びにS帯基準局のレベルダイアを用いれば、予想される飛行中における受信信号電力値が算出できるこ

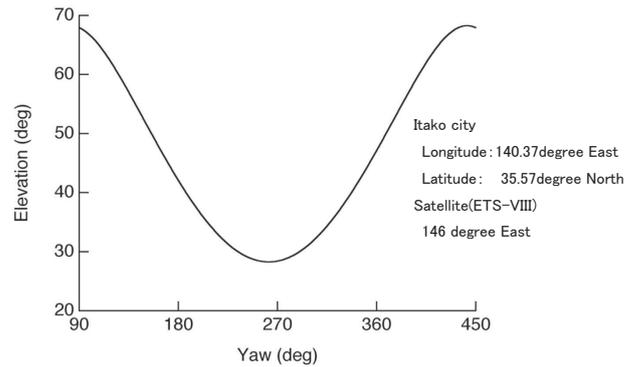


図4 旋回する航空機上からの相対的な衛星仰角 (傾斜角 20 度)

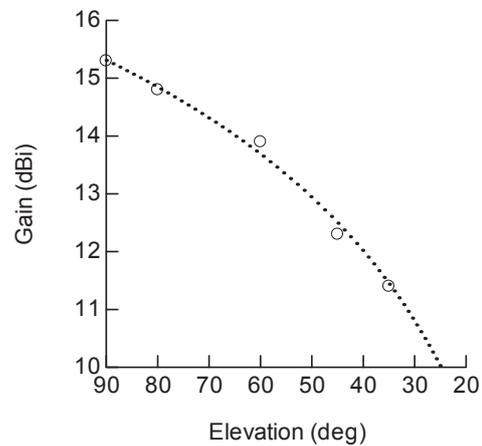


図5 送信アンテナ利得

とになる。

アンテナ部では、18個のアンテナ素子の配置は円対称となっており、方位角方向のアンテナ利得が一定であれば、算出した点線のカーブのような正弦波曲線に近い電力値の変化を考えると考えられるが、図3の実線で示してあるように、受信レベル変化の様子は、正弦波曲線とはやや異なった形となっている。誤差の原因については、飛行姿勢のロール軸、ピッチ軸でのずれ、送信アンテナ利得の方位角方向のばらつき等が考えられる。航空機地球局アンテナの送信利得については3次元的な測定をしていないが、仰角45度において、方位角が0度、90度、180度、270度における送信利得は測定しており、その実測値は、12.3dBi、13.9dBi、13.1dBi、13.5dBiと、測定した点だけでも約1.5dBの幅があることが確かめられている。

アンテナの衛星追尾には、ステップトラック方式によるクローズドループ制御もあり、同様に傾斜角20度での測定を実施している。結果を図6に示す。ステップトラック方式により衛星追尾を行うためビームが常に動いているのでオープンループに比べて受信レベルの変動が大きくなっているが、レベル変動は似たような特性を示していることがわかる。

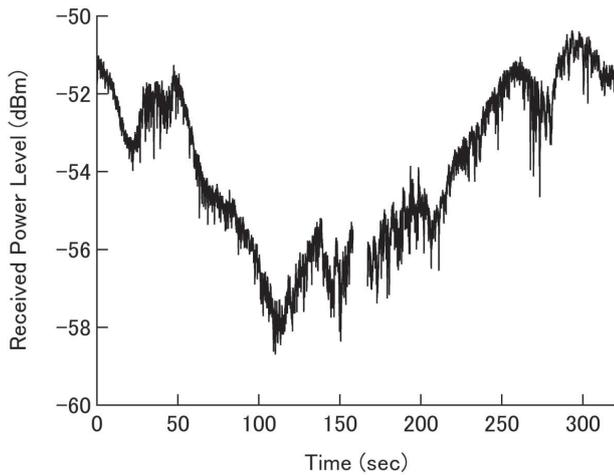


図6 クローズドループ方式における受信レベル
(旋回時：傾斜角 20 度)

図6の約160秒から170秒にかけては受信データが欠落しているが、これは地上局でのデータ収集系のトラブルによるもので、この期間においても航空機側では衛星からの信号を受信していることが確認されている。クローズドループ制御の場合、地上における車両での走行実験により、1秒当たり30度程度の角度変化があっても十分に衛星追尾が維持できることがわかっており、一方、今回の旋回飛行中は、1秒あたり5度以下での角度変動に限られるため、クローズドループ方式においては、アンテナが衛星を見失うことなく追尾しているものと推定される。オープンループ方式での受信特性とクローズドループ方式での受信特性が、ほぼ同様の特性を示していることから、オープンループ方式においても衛星を追尾していると考えられる。

(2) パケット信号伝送特性^[9]

伝送路の基本特性として、オープンループ制御による衛星追尾の飛行中に、受信 C/No に対するパケット信号のスループットを測定した。図7に結果を示す。丸印は、静止状態の特性を示している。なお、各丸印の測定時間は3分から5分間である。逆三角印は、水平飛行状態での特性で、各印の測定時間は10秒間である。受信レベルはほぼ一定で安定しており、測定したパケット数が少ないことからスループットには若干のばらつきがあるものの、平均化すれば、C/No 値に対するスループット値は、静止状態のときの特性とほぼ等しくなる。×印は、傾斜角が20度の旋回時における特性で、こちらも各印の測定時間は10秒間である。航空機の姿勢変化が大きいので、受信レベル、スループットには、共にかなりのばらつきが認められる。図7より、スループット特性が劣化する C/No 値は、移動しない場合や水平飛行時の場合と比べて、2dBほど低く

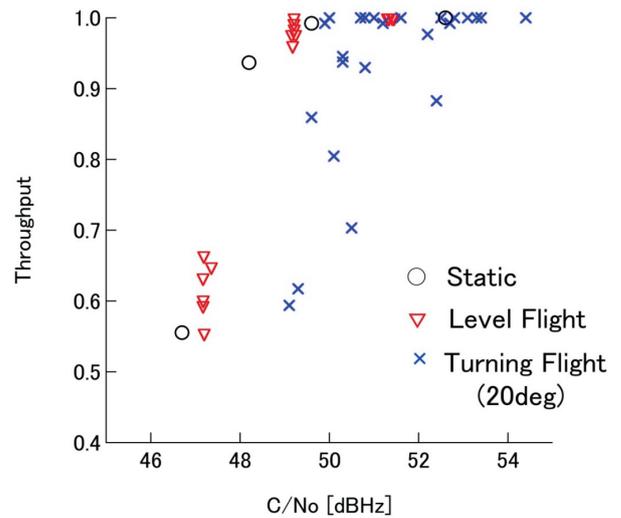


図7 スループット特性

なっていることが読み取れるが、S帯という周波数は、技術的には航空移動衛星通信に使用可能である見通しを得ることができた。

(3) 画像信号伝送特性

画像信号伝送実験の目的は、災害に強いという特徴を持つ衛星通信システムを用いて、被災地状況の把握に役立つ合成開口レーダの撮像データを伝送することであった。表3に実験条件と実験結果を示す。表3における伝送は、航空機の姿勢が安定した水平飛行時に実施されたものである。回線品質が低く、実現できたデータ伝送速度は約100kbpsと低速度に留まったが、これまでは、データの収集のためには航空機が一旦着陸する必要があり、航空機上から衛星回線を介して地上へとデータを転送することで大幅な時間短縮をはかれ、より早期の情報収集が可能となることが確認できた。なお、航空機の旋回時は、信号レベルの変動幅が大きく、ファイルの転送が完了せずに伝送の途中で中断してしまい、転送できないという結果を示した。レベル変動にも十分に対応するようなデータ転送のプロトコル検討は、今後の移動体衛星通信での課題となる。

表3 画像データファイル転送実験

変調方式：QPSK
伝送速度：128kbps
誤り訂正符号：ターボ符号 (符号化率3/4)
情報速度：96kbps
画像データサイズ：654Kbyte
転送プロトコル：FTP
伝送時間：62秒
実効速度：86.4kbps
回線効率：90%

4 まとめ

技術試験衛星Ⅷ型を用いたS帯における航空移動衛星通信実験を実施した。信号レベルが安定している水平飛行時のデータ伝送特性は、静止状態での特性とほぼ等しいことが確認された。また、傾斜角20度の旋回時における特性は、水平飛行時や静止状態での特性よりC/No値で約2dBの劣化が認められた。今回の実験により、航空機の姿勢変動が大きい場合には、伝送特性に若干の劣化があるものの、S帯という周波数は、技術的には航空移動衛星通信に使用可能である見通しを得た。また、画像伝送実験においては、回線品質が低く、実現できたデータ伝送速度は約100kbpsと低速度に留まったが、今後は、現在運用中の超高速インターネット衛星(WINDS)を用いて、10Mbps以上の高伝送速度にて航空移動衛星通信を実現するシステムを構築する計画である。

謝辞

今回の実験実施にあたり協力頂いた川崎和義主任研究員並びにデータ処理に協力頂いた小林摂子さんをはじめとして関係各位に深く感謝致します。

【参考文献】

- 1 浜本直和, 吉本繁壽, 今江理人, “技術試験衛星Ⅷ型(ETS-Ⅷ)計画の概要,” 通信総合研究所季報, Vol. 49, Nos. 3/4, pp. 3-10, Sept./Dec. 2003.
- 2 藤野義之, 渡邊宏, 川崎和義, 山本伸一, 織笠光明, 尾島孝, 松浦幹浩, “ETS-Ⅷ実験用車載アクティブフェーズドアレーアンテナの走行受信実験,” 信学会2009年総合大会, B-3-18, March 2009.
- 3 佐藤正樹, 織笠光明, 藤野義之, “軌道上におけるETS-Ⅷ衛星の大形展開アンテナ放射パターンの評価,” 信学誌B, Vol. J94-B, No. 3, pp. 344-352, March 2011.
- 4 S. Taira, S. Yamamoto, and M. Yoneda, “Regenerative Repeating Performance of an Onboard Packet Switch for the Fading Channel in Geostationary Satellite Orbit,” 62nd International Astronautical Congress, IAC11-B.2.4.8, Oct. 2011.
- 5 J. Uemoto, S. Uratsuka, T. Umehara, S. Yamamoto, S. Taira, M. Satake, S. Kojima, T. Kobayashi, M. Satoh, K. Kawasaki, T. Matsuoka, A. Nadai, and R. Suzuki, “Development of the onboard processor for PI-SAR2,” 2011 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Paper Number 2656, July 2011.
- 6 A. Miura, Y. Fujino, S. Taira, N. Obata, M. Tanaka, T. Ojima, and K. Sakauchi, “S-band Active Array Antenna with Analog Phased Shifters using Double Balanced Mixers for Mobile SATCOM Vehicles,” IEEE Trans. Antenna and Propagation, Vol. 53, No. 8, Aug. 2005.
- 7 Huan-Bang Li, A. Miura, M. Satoh, and H. Wakana, “Disaster Information Collection and Transmission Experiments using Ka-band Aeronautical Satellite Communications,” Proceedings of The 14th IEEE 2003 International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communication, pp 395-399, Sept. 2003.
- 8 田中正人, 浜本直和, 平良真一, 鈴木良昭, 大森慎吾, “ETS-Ⅷ受信給電部の不具合,” 第51回宇宙科学技術連合講演会, 1J13, Oct. 2007.
- 9 野田浩幸, 佐野和彦, 浜真一, “高精度時刻基準装置(HAC),” 通信総合研究所季報, Vol. 49, No. 3/4, pp. 89-94, Sept./Dec. 2003.
- 10 S. Taira, S. Yamamoto, and M. Satoh, “Aeronautical mobile satellite

communications experiments using the Engineering Test Satellite Eight,” 29th International Symposium on Space Technology and Science, 2013-j-17, June 2013.



平良真一 (たいら しんいち)

ワイヤレスネットワーク研究所宇宙通信システム研究室副室長
移動体衛星通信、交換システム

佐藤正樹 (さとう まさき)

産学連携部門連携研究推進室マネージャー
衛星通信、アンテナ



山本伸一 (やまもと しんいち)

ワイヤレスネットワーク研究所宇宙通信システム研究室主任研究員
移動体衛星通信