

高出力中継器性能評価実験

川崎和義

2006年12月に打ち上げられた技術試験衛星VIII型(きく8号、ETS-VIII)は、Ka帯及びS帯の実験用通信機器を搭載している。この実験用通信機器の経年変化を調査するために、5回の性能評価実験を行った。

本実験結果は、軌道上での衛星搭載機器の経年変化に対する評価であり、今後、衛星搭載機器を設計・製作する上で一助となるものである。

1 まえがき

技術試験衛星VIII型(以下、ETS-VIII)は、衛星搭載用大型展開アンテナ及びそれを使用した小型移動体地球局との間の衛星通信に必要な技術開発とその実証を目的とした衛星で、2006年12月18日にH-IIAロケット11号機によって打ち上げられた。

この衛星には、地上基地局と衛星間を結ぶフィーダリンク用としてKa帯(30GHz/20GHz帯)、小型移動体地球局と衛星間を結ぶサービスリンク用としてS帯(2.6GHz/2.5GHz帯)の通信機器が搭載されており、これらの通信機器の接続経路を変えることにより多

様な実験を行うことが出来る。また中継方式として、交換機を介して信号を中継する再生中継と、交換機を介さず無処理で信号を中継するベントパイプモードを選択出来る。

本稿では、初期性能評価実験及び定期性能評価実験の概要と、実験で得られたデータから中継器の性能及び機能についての評価結果を述べる。

2 高出力中継器の概要^{[1]-[3]}

高出力中継器は、フィーダリンク装置(FLCE)、パケット交換機(PKT)、オンボードプロセッサ(OBP)、

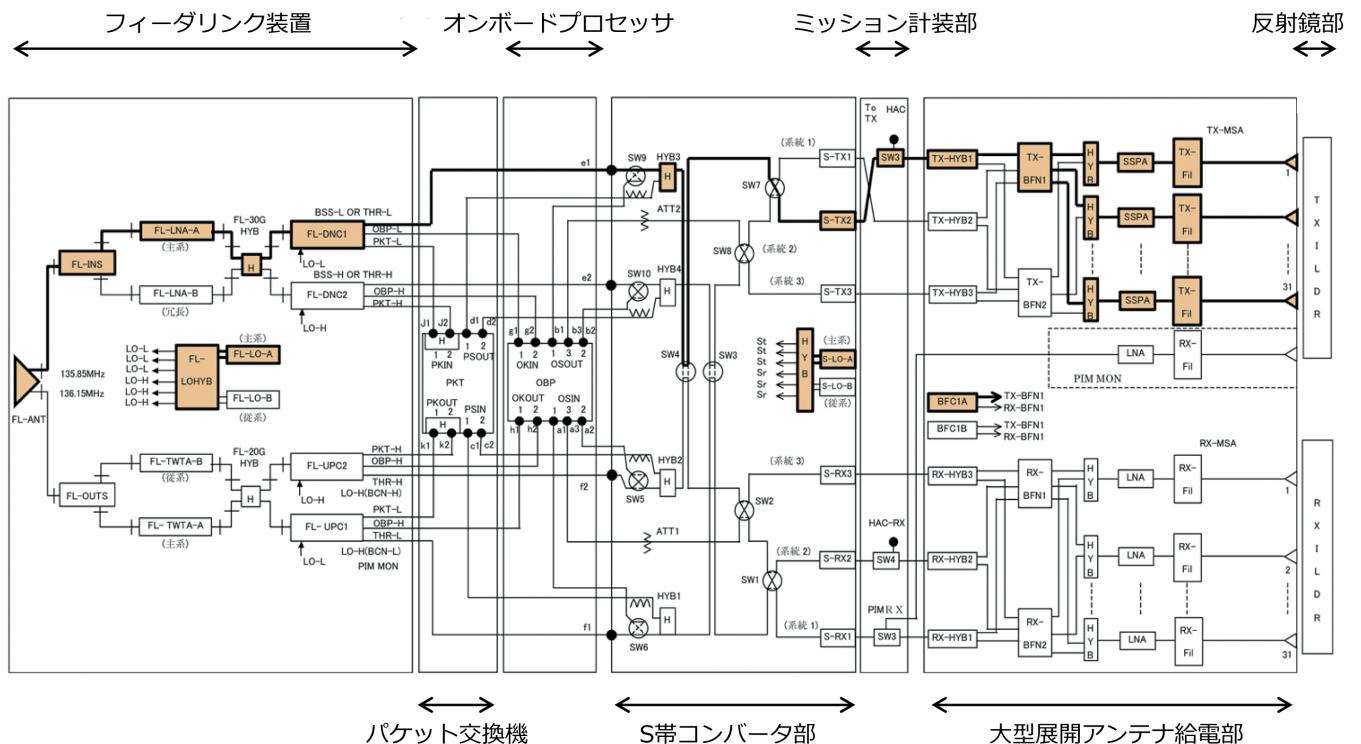


図1 中継器構成

2 通信実験用衛星搭載機器評価実験

表 1 中継器サブシステムの機能概要

サブシステム	機能概要
フィーダリンク装置 (FLCE)	Ka 帯送受信、周波数変換
パケット交換機 (PKT)	パケット交換制御、変復調
オンボードプロセッサ (OBP)	音声通信用交換機能
S 帯コンバータ部 (SCNE)	S 帯周波数変換、経路切換
大型展開アンテナ給電部 (LDAF)	S 帯送受信
大型展開アンテナ反射鏡部 (LDR)	アンテナ・リフレクター (送受別に 2 面)

表 2 中継器の主要諸元

	フィーダリンク	サービスリンク
RF 周波数	30.6GHz 帯 (Uplink) 20.8GHz 帯 (Downlink)	2.6GHz 帯 (Uplink) 2.5GHz 帯 (Downlink)
IF 周波数	140MHz 帯	
偏波	右旋円偏波 (Uplink) 左旋円偏波 (Downlink)	左旋円偏波
アンテナ	0.8mφ オフセットパラボラ	1.0mφ パラボラ (HAC) (Uplink) 大型展開アンテナ (Downlink)
給電方式	31 素子フェーズドアレイ	
ビーム数	最大 3 ビーム	

S 帯コンバータ部 (SCNE)、大型展開アンテナ給電部 (LDAF)、大型展開アンテナ反射鏡部 (LDR) から構成されている。図 1 に中継器の構成を、表 1 に各中継器サブシステムの機能概要を、表 2 に中継器の主要諸元を示す。

FLCE は、30GHz 帯の受信信号を低雑音増幅器 (FL-LNA) で増幅後、ダウンコンバータ (FL-DNC) により 140MHz 帯の中間周波数信号 (IF 信号) に周波数変換し、パケット交換機、オンボードプロセッサ、及び S 帯コンバータ部へ出力する機能、並びにパケット交換機、オンボードプロセッサ、及び S 帯コンバータ部から出力された IF 信号を、アップコンバータ (FL-UPC) により 20GHz 帯の送信信号に周波数変換し、進行波管増幅器 (FL-TWTA) で電力増幅を行った後、地球局へと送信する機能を持つ。FL-TWTA は 8W の送信出力を持つ。FL-UPC 及び FL-DNC は利得可変機能を持つ。また、FL-UPC 及び FL-DNC 用の局部発振器は周波数可変機能を持つ^[4]。

PKT 及び OBP は、衛星上でパケットや音声信号の交換処理を行う機能を持つ。

SCNE は、S 帯受信信号を 140MHz 帯の IF 信号へ周波数変換するダウンコンバータ (S-RX)、及び IF 信号を S 帯送信信号へ周波数変換するアップコンバータ (S-TX)、並びに経路切換を行う 10 個の IF スイッチ (IF SW) で構成される。S-TX 及び S-RX は利得可変機能を持つ。また、S-TX 及び S-RX 用の局部発振器は周

波数可変機能を持つ^[5]。

LDAF は、マルチビーム用フェーズドアレイアンテナを実現するために送信用・受信用それぞれ 2 組のビーム形成回路 (BFN) や 31 台の固体電力増幅器 (SSPA) 等で構成されている。SSPA は 20W 級が 8 台、10W 級が 23 台の合計 31 台が搭載されており、合計で 355W の送信出力を得ている^[6]。また、給電素子として送信用・受信用それぞれに 31 個のカップ・マイクロストリップアンテナ (MSA) が搭載されている。

LDR は、世界最大級の大きさ (外形約 19m×17m、開口径約 13m) のものを送信用・受信用にそれぞれ 1 面ずつ搭載している。

3 実験の概要

中継器性能評価実験として Ka 帯 (30GHz/20GHz 帯) 及び S 帯 (2.6GHz/2.5GHz 帯) 用通信機器の基本性能評価データを取得するため、定期的に各通信機器の入出力特性、振幅周波数特性、スプリアス特性、周波数可変特性等の測定を行い、得られたデータから各通信機器の性能及び経年変化について評価を行った。

実験は、衛星打ち上げ直後の 2007 年 2 月に初期性能評価実験を行い、その後 2008 年 9 月に第 1 回、2010 年 1 月に第 2 回、2011 年 1 月に第 3 回、2012 年 4 月に第 4 回の定期性能評価実験を行った。

なお、S 帯受信用 LNA (Low Noise Amplifier) であるが、電源系で発生した不具合が回復せず、この装置を使った実験は未実施のままである。そのため、この装置の代替として、高精度時刻基準装置 (HAC: High Accuracy Clock) の S 帯 RF 部を使用して実験を行っている^[7]。

4 実験システムの構成

地球局として、鹿島宇宙技術センターの Ka 帯フィーダリンク地球局と S 帯基準地球局を使用し、測定用の信号としては無変調波 (CW) を用いた。

中継器内の経路 (以下、中継リンク) は、図 1 で示す SCNE にある 10 個の IF スイッチ (IF SW1 ~ 10) を用いて設定した。また S 帯の送信に使用した LDAF と HAC 装置の S 帯送信部の切換は、S 帯用アップコンバータ (S-TX2) の出力側にあるミッション計装部の RF スイッチ SW2 を用いた。S 帯の受信には LNA の不具合により大型展開アンテナが使用出来ないため、HAC 装置の S 帯受信部を使用した。経路の切換には、S 帯用ダウンコンバータ (S-RX2) の入力側にあるミッション計装部の RF スイッチ SW4 を用いた。

4.1 中継リンク

実験で使用する中継方式はベントパイプモードとし、中継リンクは次に示す5つの経路を用いた。

4.1.1 フィーダリンク・クロスリンク

アップリンク（地上から衛星方向のリンク）及びダウンリンク（衛星から地上方向のリンク）の両方に Ka 帯フィーダリンクを用いるフィーダリンク・クロスリンク（FL-CRS）は、主に FLCE の性能評価実験で使用了。図2にフィーダリンク・クロスリンクの経路を示す。

4.1.2 フォワードリンク

アップリンクに Ka 帯、ダウンリンクに S 帯の大型展開アンテナを用いるフォワードリンク（FWD）は、主に S 帯送信部の性能評価実験で使用了。図3にフォワードリンクの経路を示す。

4.1.3 フォワードリンク (HAC 送信)

アップリンクに Ka 帯、ダウンリンクに HAC 装置の S 帯 RF 部を用いるフォワードリンク (HAC 送信) は、主に HAC 装置の S 帯 RF 部の性能評価実験で使用了。図4にフォワードリンク (HAC 送信) の経路を示す。

4.1.4 サービスリンク・クロスリンク

アップリンクに HAC 装置の S 帯 RF 部、ダウンリンクに S 帯の大型展開アンテナを用いるサービスリンク・クロスリンクは、主に S 帯受信部の性能評価実験で使用了。図5にサービスリンク・クロスリンクの経路を示す。

4.1.5 リターンリンク

アップリンクに HAC 装置の S 帯 RF 部、ダウンリンクに Ka 帯を用いるリターンリンクも、主に S 帯受信部の性能評価実験で使用了。図6にリターンリンクの経路を示す。

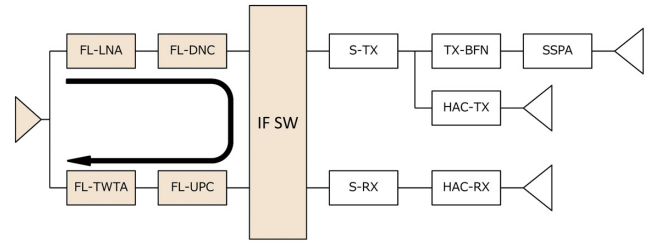


図2 フィーダリンク・クロスリンク

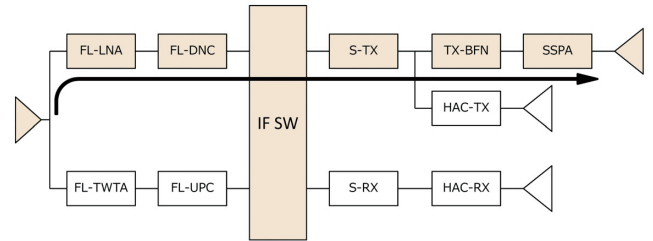


図3 フォワードリンク

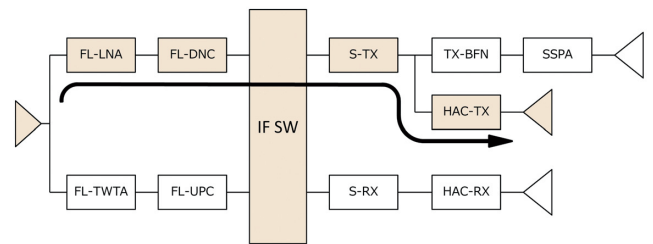


図4 フォワードリンク (HAC 送信)

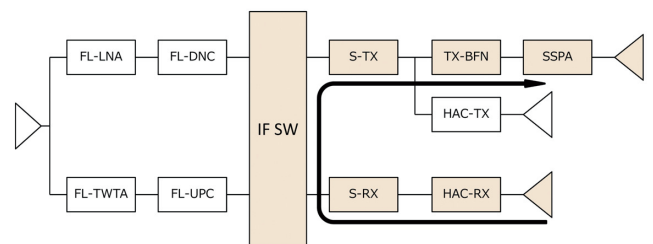


図5 サービスリンク・クロスリンク

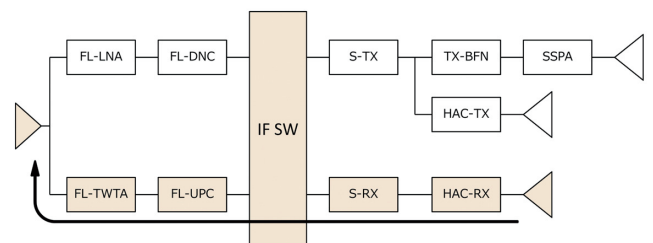


図6 リターンリンク

5 実験内容

5.1 入出力特性

フィーダリンク・クロスリンク（図2）、フォワードリンク（図3）、フォワードリンク（HAC 送信）（図4）の各中継リンクについて入出力特性を測定した。

実験では、CW を衛星へ送信し、衛星からの受信信号の強度をスペクトラムアナライザで測定した。この測定を送信信号レベルを変えながら繰り返し行い、測定結果の値を換算することにより衛星入力電力と衛星出力電力を求めた。なお、フォワードリンクでは、31 台ある SSPA 全てについて1台ずつ測定を行った。

5.2 利得

フィーダリンク・クロスリンク（図2）、フォワードリンク（図3）、フォワードリンク（HAC 送信）（図4）、

サービスリンク・クロスリンク（図5）、リターンリンク（図6）の各中継リンクについて利得を測定した。実験では CW を用い、衛星中継器で折り返されてく

2 通信実験用衛星搭載機器評価実験

る信号の強度を測定した。次にその値を使って衛星入力電力と衛星出力電力に換算し、その差を中継器利得とした。

なお、フォワードリンクでは、31台あるSSPA全てについて、またサービスリンク・クロスリンクでは、3組あるS帯用S-TX全てについて1台ずつ測定を行った。

5.3 振幅周波数特性

フィーダリンク・クロスリンク (図2)、フォワードリンク (図3)、フォワードリンク (HAC送信) (図4)、サービスリンク・クロスリンク (図5)、リターンリンク (図6) の各中継リンクについて振幅周波数特性を測定した。

実験では、中継器雑音の受信スペクトルをスペクトラムアナライザ上で100回平均をとり平滑化したものを取得し、このデータを用いて振幅周波数特性の評価を行った。

5.4 スプリアス特性

フィーダリンク・クロスリンク (図2)、フォワードリンク (図3)、フォワードリンク (HAC送信) (図4)、サービスリンク・クロスリンク (図5)、リターンリンク (図6) の各中継リンクについてスプリアス特性を測定した。

実験では、CWを衛星へ送信し、その受信スペクトルを測定することにより、不要スプリアス発射の有無を評価した。

5.5 利得可変特性

フォワードリンク (図3)、リターンリンク (図6) の各中継リンクについて利得可変特性を測定した。

ETS-VIIIの中継器には、Ka帯及びS帯用にそれぞれアップコンバータ (Ka帯: FL-UPC, S帯: S-TX) 及びダウンコンバータ (Ka帯: FL-DNC, S帯: S-RX) が搭載されている。また、それぞれのアップコンバータ及びダウンコンバータには利得可変機能 (ステップアッテネータ) を備えており、地上からのコマンドにより利得を可変することが可能である。

実験では、この利得可変機能を用い、各設定値での受信信号強度を測定した。

5.6 周波数可変特性

フィーダリンク・クロスリンク (図2)、フォワードリンク (図3)、サービスリンク・クロスリンク (図5) の各中継リンクについて周波数可変特性を測定した。

ETS-VIIIの中継器には、Ka帯及びS帯用にそれぞれ局部発信器が搭載されており、アップコンバータ及びダウンコンバータで使用されている。局部発信器には、

発信周波数の可変機能が備わっており、Ka帯、S帯でそれぞれ独立に周波数を可変することが可能である。

実験では、この周波数可変機能を用い、局部発振器の出力周波数を変化させた時の受信周波数を測定し、周波数変化量を求めた。

6 実験結果と評価^{[8][9]}

6.1 入出力特性

図7にフィーダリンク・クロスリンク (図2) を用いた時の測定結果の一例を、図8にフォワードリンク (図3) でS帯送信に20W級SSPAを用いた時の測定結果の一例を、図9にフォワードリンク (図3) でS帯送信に10W級SSPAを用いた時の測定結果の一例を示す。図の横軸はLNAへの入力電力を、縦軸は電力増幅器 (Ka帯: TWTA、S帯: SSPA) の出力電力を表す。

図7より、フィーダリンク・クロスリンク (図2) の入出力特性はリニアであり、初期性能評価実験結果と比べてもばらつきが少なく良好な特性を示していることが分かる。しかし、図8及び図9よりフォワードリンク (図3) の入出力特性では、測定年でデータにばらつきが見られる。これは、フィーダリンク・クロスリンク (図2) の入出力特性でのばらつきが少ないことから、LDRで時間帯によってゆがみが生じた

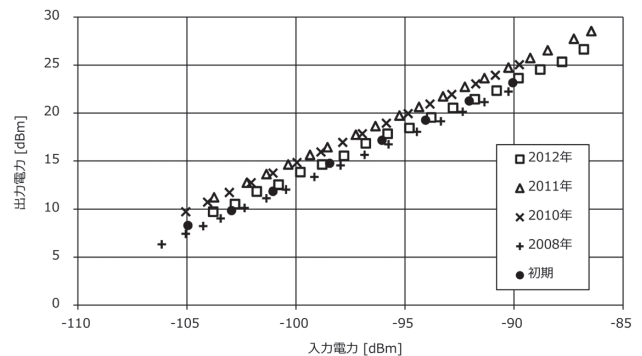


図7 入出力特性 (フィーダリンク・クロスリンクの一例)

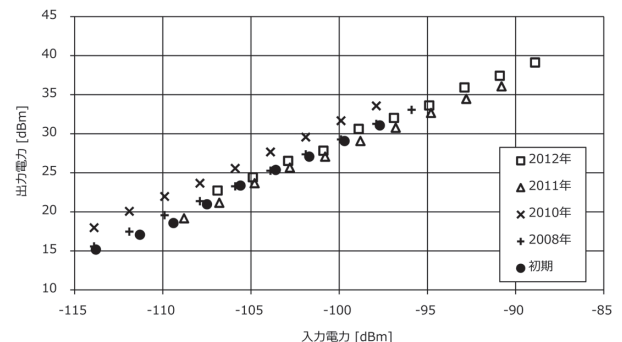


図8 入出力特性 (フォワードリンク、20W級SSPAの一例)

め^[10]、受信信号強度が変化したものと推定される。

以上より、経年変化による入出力特性の劣化はほとんど起きていないが、S帯送信に大型展開アンテナを使用する場合は、時間帯による受信信号強度の変化に注意が必要である。

6.2 利得

図10にフォワードリンク(図3)でのS帯用SSPA 31台(20W級8台、10W級23台)における利得の測定結果を示す。図の横軸は31台のSSPAを、縦軸は対応するSSPAの利得を表す。

図10より、各SSPAとも初期性能評価実験に比べ大きな利得の劣化はみられず良好であることが分かる。これより経年変化による中継器利得の劣化は起きていないことが分かった。また、中継器として十分な利得を有しており、中継器利得としてシステム要求を満たしていることが実証された。

なお、SSPAによって利得に差があるのは、20W級SSPAと10W級SSPAとでは増幅度に3dBの差がある上、アレーアンテナのため、実験を行った鹿島宇宙技術センター(茨城県鹿嶋市)でのアンテナ利得が31個のアンテナ素子で異なるためである。

また、SSPA毎の測定年による利得のばらつきは、入出力特性のところでも述べたようにS帯送信に使用した大型展開アンテナのゆがみによる受信信号強度の変化も影響しているものと思われる。

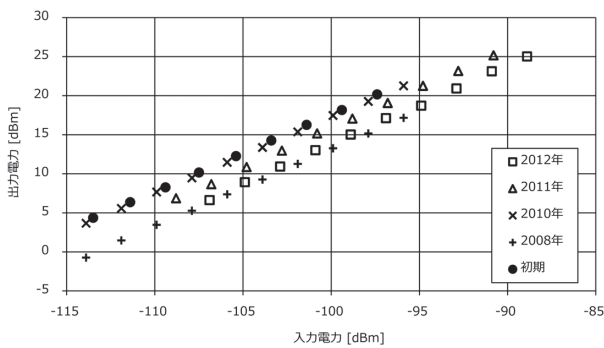


図9 入出力特性 (フォワードリンク、10W級SSPAの一例)

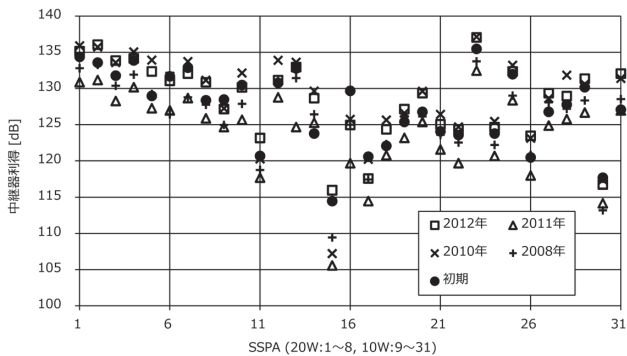


図10 中継器利得 (フォワードリンク)

6.3 振幅周波数特性

図11にフォワードリンク(図3)における振幅周波数特性の測定結果の一例を示す。図の横軸は周波数を、縦軸は受信信号強度を表す。

図11より、異常な振幅変化は見られず、良好な特性を示していることが分かる。したがって、経年変化による振幅周波数特性の劣化は起きておらず、また中継器の振幅周波数特性としてフラットで良好な特性を有していることが実証された。

6.4 スプリアス特性

図12にフォワードリンク(図3)におけるスプリアス特性の測定結果の一例を示す。図の横軸は周波数を、縦軸は受信信号強度を表す。

ETS-VIIIの帯域外スプリアス特性は、フォワードリンク(図3)の場合でD/U値が50dBc以上となっているが^[4]、実験では地球局受信雑音によってノイズフロアが上昇してしまい正確なD/U値は測定出来ない。そ

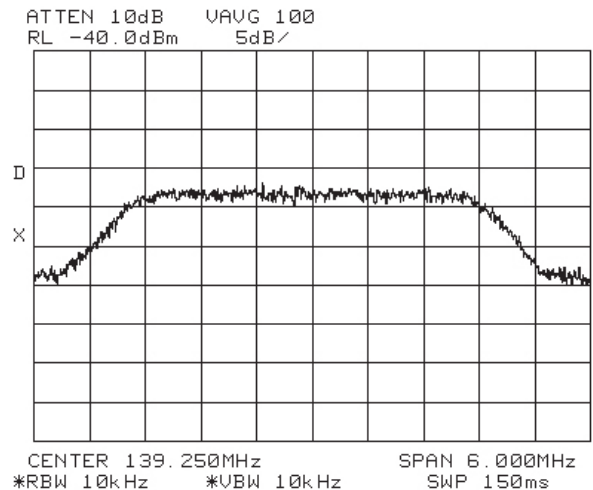


図11 振幅周波数特性 (フォワードリンクの一例)

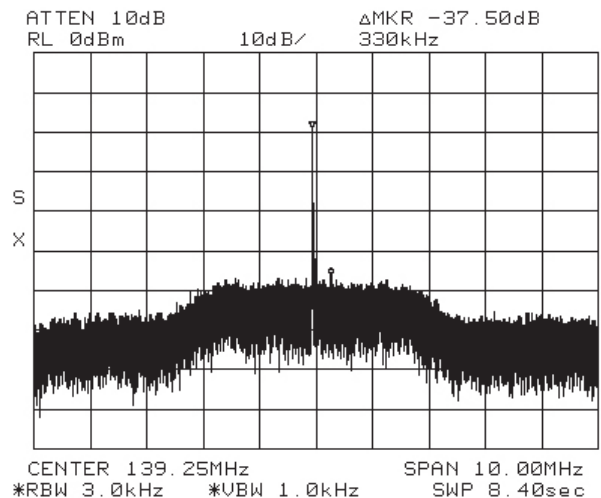


図12 スプリアス特性 (フォワードリンクの一例)

2 通信実験用衛星搭載機器評価実験

のためノイズフロアを上回る不要なスプリアス発射がないかどうかで評価した。

図12より不要なスプリアス発射は見られず、スプリアス特性は良好であることが分かる。ETS-VIIIの中継器においては経年変化によるスプリアス特性の劣化は起きておらず、中継器として良好なスプリアス特性であることが実証された。

6.5 利得可変特性

図13にフォワードリンク(図3)におけるS帯用アップコンバータ No.2 (S-TX2) の利得可変機能についての測定結果を示す。図の横軸はS帯用アップコンバータの利得設定値を、縦軸はそれぞれの設定値 (S-TX2 GAIN STS) での利得可変量を表す。

図13より、特性にほとんど劣化は見られずニアで良好な特性を示していることが分かる。また初期性能評価実験データとの比較でも、それぞれのデータは良く一致しており、利得可変機能は所期の機能及び性能が維持されていることが実証できた。

6.6 周波数可変特性

図14にフォワードリンク(図3)におけるS帯S-TX用局部発信器 (S-LO) の周波数可変機能についての測定結果を示す。図の横軸はS帯局部発振器(主系)

の周波数設定値を、縦軸はその時の周波数可変量を表す。

図14より、特性にほとんど劣化は見られず良好であることが分かる。また初期性能評価実験データとの比較でも、測定データは良く一致しており所期の機能及び性能を維持していることが分かる。

以上より、局部発振器の周波数可変機能は、経年変化による性能の劣化も起きておらず、設計どおり動作していることが確認できた。

7 まとめ

中継器性能評価実験として、初期性能評価実験(2007年)から第4回定期性能評価実験(2012年)までの5年間にわたり入出力特性、振幅周波数特性、スプリアス特性、周波数可変特性等の測定を行い、中継器の特性とその経年変化を評価した結果を述べた。

実験結果は概ね一致しており、初期性能評価実験のデータと比較しても明らかな劣化は見られなかったことより、中継器自体の性能や機能に大きな変化はなく所期の性能を有していることが実証できた。しかし、入出力特性や中継器利得のデータのうちS帯大型展開アンテナを用いる中継リンクでは、LDRのゆがみに起因すると思われるデータのばらつきも認められた。

ETS-VIIIで得られた技術成果は、今後、衛星搭載機器を設計・製作する上での一助になるものである。

謝辞

本実験を行うにあたりご意見・ご協力頂いた関係各位、及び関係機関の方々に深く感謝する次第である。

参考文献

- 1 平良真一, “移動体衛星通信・放送システム技術の宇宙実証-ETS-VIIIの概要-,” 信学会総合大会, TB-1-3, pp. “SS-4”-“SS-5”, March 2003.
- 2 小園晋一, “通信・放送実験用中継器の全体構成,” 通信総合研究所季報 技術試験衛星VIII型特集, Vol. 49, Nos. 3/4, pp. 19-26, Sept./Dec., 2003.
- 3 川崎富美雄, 川上用一, 宮内雅夫, “ETS-VIII搭載中継器部の検討,” 信学会ソサイエティ大会, B-3-14, pp. 178, Sept. 1998.
- 4 高畑博樹, 浜真一, “搭載用Ka帯フィードリンク装置,” 通信総合研究所季報 技術試験衛星VIII型特集, Vol. 49, Nos. 3/4, pp. 33-41, Sept./Dec., 2003.
- 5 橋本幸雄, “S帯コンバータ部,” 通信総合研究所季報 技術試験衛星VIII型特集, Vol. 49, Nos. 3/4, pp. 43-46, Sept./Dec., 2003.
- 6 上野健治, “給電部の構造,” 通信総合研究所季報 技術試験衛星VIII型特集, Vol. 49, Nos. 3/4, pp. 47-55, Sept./Dec., 2003.
- 7 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 技術試験衛星VIII型特集, Vol. 49, Nos. 3/4, pp. 89-94, Sept./Dec., 2003.
- 8 小園晋一, 平良真一, 橋本幸雄, 井出俊行, 山本伸一, “ETS-VIII搭載移動体衛星通信システム-電気性能試験-,” 信学会総合大会, B-3-12, pp. 343, March 2003.
- 9 小園晋一, 渡邊宏, 佐藤正樹, 山本伸一, 平良真一, “ETS-VIII移動体通信

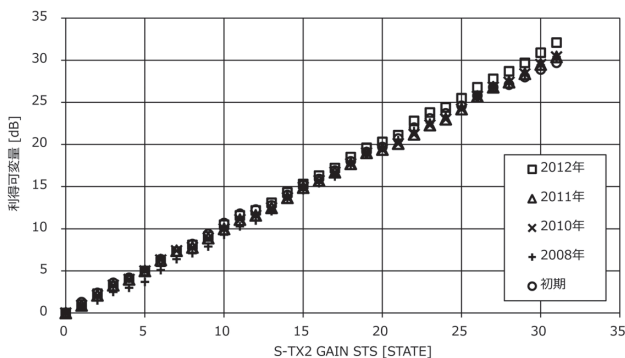


図13 利得可変特性 (S帯アップコンバータ)

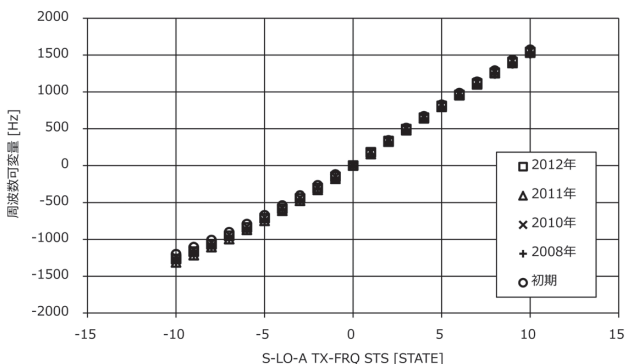


図14 周波数可変特性 (S帯局部発振器)

用中継器の軌道上初期性能,” 信学会ソサイエティ大会, BS-2-1, pp. ” S-12”-“S-13”, Aug. 2007.

- 10 佐藤正樹, 織笠光明, 藤野義之, “軌道上におけるETS-VII衛星の大型展開アンテナ放射パターンの評価,” 信学会論文誌 (B), Vol. J94-B, No. 3, pp. 344-352, 2011.



川崎和義 (かわさき かずよし)

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
衛星通信