

技術試験衛星VIII型を用いた移動体衛星通信実験の概要

平良真一 佐藤正樹 織笠光明 山本伸一

平成18年12月に打ち上げられた技術試験衛星VIII型を用いた移動体衛星通信実験を約6年間にわたって実施した。実験は、衛星搭載機器、地球局並びに移動体衛星通信システムの性能評価を主にした基本実験と、アプリケーション実験を主にした応用実験に分けられる。本文には、実験に使用した衛星搭載機器と地球局の概要並びに実施した移動体衛星通信実験の内容概略が記述されている。

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18日に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。衛星は、次世代における移動体衛星通信システムの宇宙実証を目的の1つとして開発が進められた。衛星打ち上げ後、約3ヶ月間の初期性能確認試験が行われ、その後の「定常段階」において、衛星開発機関（情報通信研究機構、宇宙航空研究開発機構並びに日本電信電話株式会社）による衛星搭載機器の軌道上性能確認試験及び移動体衛星通信システム実験を主とする「基本衛星通信実験」、総務省の公募により選定された各種機関による「利用実験」が約3年間実施された。定常段階終了後、衛星は、「後期利用段階」へと移行し、アプリケーション実験と、定期的に行う衛星性能確認試験である定期チェックアウトを実施して、平成24年12月に、情報通信研究機構による移動体衛星通信実験を終了した。本稿では、実験に使用した衛星搭載機器及び地球局の概要、そして、初期性能確認試験から平成24年末までに実施した移動体衛星通信実験の概要について述べる。

2 通信実験用衛星搭載機器の概要^[1]

各通信実験は、ETS-VIIIを介した通信信号の伝送を行うことから、ここでは、ETS-VIIIに搭載されている通信実験用機器の概要について述べる。また、実験に使用した各地球局の概要については、**3**における、各通信実験での記述内容に含めることにする。

移動体衛星通信実験に使用するETS-VIIIにおける通信ミッション機器を構成しているコンポーネントは、フィーダリンク装置（Feeder Link Equipment）、搭載交換機部（Onboard Switches）、中継器部（Transponder）、

大型展開アンテナ給電部（Large Deployable Antenna Feeder）、並びに大型展開アンテナ反射鏡部（Large Deployable Antenna Reflector）である。表1に通信ミッションの主要諸元を、図1に通信ミッション機器の構成図を示す。搭載交換機部は、パケット交換機能を持つパケット交換機（PKT）と、回線交換機能を持つオンボードプロセッサ（OBP）にわけられる。S帯の周波数を使用するモバイルリンク用の周波数変換を行う中継器部は、3ビーム分のアップコンバータ（S-TX1, 2, 3）及びダウンコンバータ（S-RX1, 2, 3）と10個の中間周波（IF）切り換えスイッチ（IF SW1～10）より成っている。パケット交換機、オンボードプロセッサを使用する場合に応じて中継器部にてスイッチの切り換えを行い、また、同報実験用並びに応用通信実験用として周波数変換のみを行うベントパイプモードへの切り換えも可能となっている。

ETS-VIIIには電気開口径が13m級の大型展開アンテナが搭載され、アンテナ給電にはフェーズドアレー方式を用いている。給電部は2種類のビーム形成回路（BFN）と、それぞれ31個の高出力固体増幅器（SSPA）、低雑音増幅器（LNA）、送信及び受信アンテナ素子によって構成されており、8台の20W級SSPA、23台の10W級SSPAにより合計で約400Wの高出力を実現している。アンテナ素子には、カップマイクロストリップア

表1 ETS-VIII通信ミッション主要諸元

軌道	: 静止衛星軌道 東経146度
使用周波数	: S band [2.6 / 2.5 GHz] (モバイルリンク) Ka band [30 / 20 GHz] (フィーダリンク)
通信用アンテナ	: 13mφ オフセットパラボラ (モバイルリンク) 0.8mφ オフセットパラボラ (フィーダリンク)
送信出力	: 400 W (モバイルリンク)、 8 W (フィーダリンク)
衛星搭載交換機	: 回線交換 (パーソナル通信) パケット交換 (広帯域データ通信)

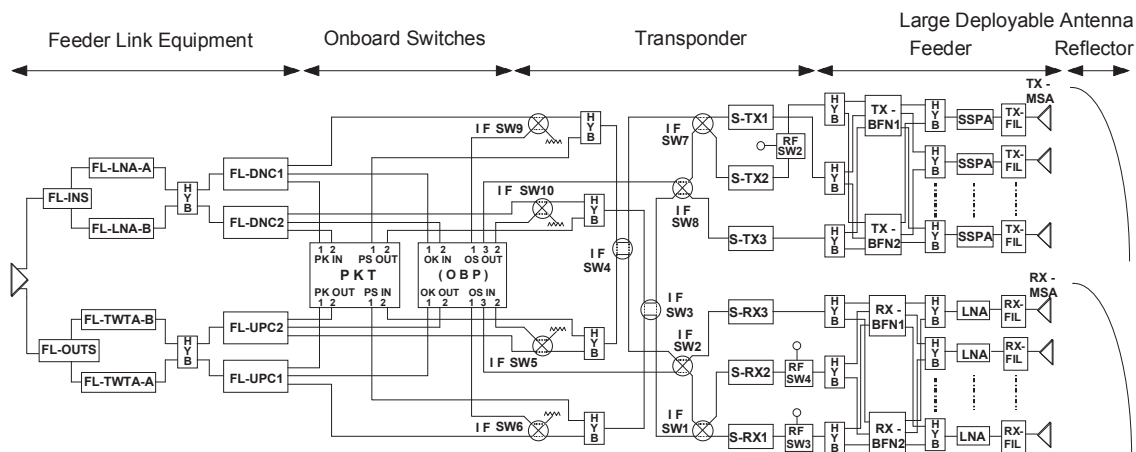


図1 ETS-VIII通信ミッション機器構成図

ンテナ（カップMSA）を用いて、軽量、高剛性な構造を有し、低い隣接素子間結合量を実現した。BFN装置は、一括制御BFN（BFN1）並びに独立可変BFN（BFN2）の2種類が搭載されており、装置の開発は、それぞれ情報通信研究機構並びに日本電信電話株式会社が行っている。一括制御BFNは、複数のビームの形成に必要な励振振幅と位相の共通項を一括して制御することにより、衛星上で発生する機械、熱、そして電氣的要因で発生する指向性誤差を簡単に補正できる。また、独立可変BFNは各ビームの指向性パターンを独立に制御することにより、各ビームを地球局から自在に制御でき、アダプティブアンテナシステム等への発展が期待できる方式である。基地地球局との間で通信を行うフィーダリンクにはKa帯を用い、衛星の高出力増幅器は出力8Wの進行波管（TWTA）である。なお、フィーダリンク用の基地地球局は、鹿島宇宙技術センター内に設置されている。また、モバイルリンクにおいてはバックアップ用として、高精度時刻基準装置（HAC）の高周波（RF）系（送受信アンテナ、高出力増幅器及び低雑音増幅器）を使用可能な構成になっており、中継器部のRFスイッチNo.2及びNo.4（RF SW 2, 4）を切り替えることで、接続することができる。

3 移動体通信実験用^[2]

移動体衛星通信実験は、衛星開発機関（情報通信研究機構、宇宙航空研究開発機構並びに日本電信電話株式会社）による「基本通信実験」、総務省の公募により選定された各種機関による「利用実験」が約3年間の「定常段階」において実施された。基本通信実験は、衛星搭載機器の軌道上性能確認試験及び移動体通信シ

ステム実験を主とするもので、定常段階終了後、衛星は、「後期利用段階」へと移行し、アプリケーション実験と、定期的に行う衛星性能確認試験である定期チェックアウトを実施して、平成24年12月に、情報通信研究機構による移動体衛星通信実験を終了した。以下、各実験項目の概要を述べる。

3.1 衛星搭載機器評価実験

a 大型展開アンテナの特性評価実験^{[3][4]}

通信実験における移動体用のS帯を用いる回線（モバイルリンク）ではデフォルトのアンテナパターンとして5ビーム分のパターン（東北、関東、東海、四国及び九州ビーム）を用意している。このうち、実験においては同時に最大で3ビームが使用可能である。アンテナはフェーズドアレーアンテナであることからBFNの振幅と位相値を変化させることにより任意のビームを構成できるようになっている。

a-1 アンテナパターン測定

アンテナの基本特性であるパターン測定においては、衛星の姿勢走査、及び地上の多地点での受信電力の同時測定を行い、2次元パターンを取得する。送信パターンの測定では、衛星搭載交換機より信号を出力し、地上側にてその電波を受信することで測定ができる。

a-2 アンテナビーム指向変動評価

展開アンテナ鏡面の熱歪み等の影響によるアンテナのビーム指向を評価するため、複数のアンテナビームからの信号電力の連続測定を行う。また、この評価結果より、熱歪み等によるアンテナビーム指向変動をビーム形成回路により補正し、軌道上での有効性を確認する。

a-3 ビーム走査パターン測定

BFNの振幅、位相値を変化させアンテナビームを走査して、ビーム走査角に対するアンテナ利得を測定し、いわゆるビーム走査パターンを取得して評価する。

a-4 給電部励振誤差評価

BFNの振幅及び位相設定を行い、被測定ビーム及び基準ビームを形成する。被測定ビームのアレイウェイトに素子電界ベクトル回転法(Rotating Element Electric Field Vector Method: REV法)を適用し素子の位相を回転させ、位相回転角に対する受信電力を測定する。測定結果より各素子の振幅位相を計算し、励振誤差の評価を行う。

b 衛星搭載交換機特性評価実験^{[5][6]}

ETS-VIIには、回線交換機能を持つオンボードプロセッサと、パケット交換機能を持つパケット交換機が搭載されている。交換機能の性能評価方法に関しては共通部分が多いのでここでは衛星搭載交換機性能評価としてまとめて記述することにする。

b-1 基本伝送特性評価

デジタル伝送装置の基本特性であるビット誤り率特性、同期捕捉特性等を取得する。再生中継に用いる変復調器については、衛星のアップリンク、ダウンリンクにおいてそれぞれ取得し、変調器、復調器の性能をそれぞれ確認する。また、スルーリピーターモードにおいても基本特性を取得し、搭載交換機を経由した場合との性能比較を行い評価する。

b-2 交換特性評価

地球局より制御情報を含んだ信号を出力し、衛星搭載交換機が制御情報に従った交換動作を行っていることを確認する。また、交換機能の基本パラメータである交換制御に要した時間を測定する。

b-3 交換プログラムロード機能評価

ETS-VIIに搭載するオンボードプロセッサ、パケット交換機は共に、種々のプロトコルによる交換制御に対応できるように、地上から交換制御プログラムをロードすることが可能になっている。プログラムには誤りが無いよう、伝送中に誤ったデータについては自動再送を行う。交換プログラムロード機能評価においては、プログラムが誤り無く衛星へロードされたことを確認すると共に、プログラムロードに要した時間を測定し、自動再送の性能評価も行う。

b-4 位置登録機能確認

衛星搭載交換機では移動地球局が存在するビームを認識し管理することでマルチビームに対応した交換制御を行っており、搭載交換機からの管理データを基地局にて受信し、移動地球局の登録位置を確認

する。

c 高出力中継器性能評価実験^[7]

中継器としての特性評価は、実験初期に搭載機器の軌道上特性評価実験を行うことにより測定し、その後、定期的(年に1回程度)に同様の測定を実施して経年変化を取得し評価する。中継器の基本特性として測定する項目は、入出力特性、振幅周波数特性、相互変調特性等である。測定は主としてS帯を用いるモバイルリンク側の搭載機器の特性を取得し、フィードリンク装置を含めた特性についても取得する。

3.2 移動体衛星通信システム実験

a 交換システム通信実験^{[8][9]}

オンボードプロセッサ、パケット交換機とそれぞれに対応した地球局を用いて行う通信実験では、音声、データ、画像等の伝送特性を取得し通信システムとしての評価を行う。各性能は地球局が固定状態にある場合と、測定車による走行を行い移動環境にある場合とについてデータを取得する。通信システムにおいては、ETS-VIIが、マルチビーム衛星であることから移動地球局がひとつのビームから隣接するビームへ移動したときの位置登録変更試験や、異なったビームで同じ周波数を使用する周波数再利用実験、また、衛星通信システムから他の通信ネットワークへの接続実験も実施する。

b 符号化変調技術実験^[10]

移動体衛星通信における画像伝送用として、多重ブロック符号化変調方式(Multiple Block Coded Modulation: MBCM)を用いた変復調器を用いた移動地球局を開発した。多重ブロック符号化変調の多重数は2、4、6の3種類でスイッチによる切り替えが可能となっている。また、比較実験を行うため、他の標準的な変調方式へも切り替えができる。画像コーデックには、MPEG4形式のものを使用しており、伝送するデータにはその重要度に応じて3段階の保護レベルをかける不均一誤り保護の機能を持つ。移動地球局の高周波部は、送信の等価等方輻射電力(Equivalent Isotropically Radiation Power: EIRP)で約20dBW、受信の性能指数(Figure of Merit: G/T)は約-15dBKであり、地球局のアンテナ部には、フェーズドアレイ方式による平面アンテナを用いている^[11]。通信実験においては、デジタル変復調器の基本特性であるビット誤り率特性を取得すると共に、装置を測定車に搭載して、移動環境における通信実験を実施し、本変復調方式の移動体衛星通信システムにおける評価を行う。なお、衛星側には本方式による再生中継器は設けてお

1 技術試験衛星VIII型を用いた移動体衛星通信実験の概要

らず、衛星は、ベントパイプモードに設定して実験を行う。

c 同報通信システム評価実験^[12]

同報通信地球局は、コンパクトディスク (CD) クラスの高音質オーディオプログラムを想定したS帯移動体衛星デジタル音声伝送を目指して、(株)次世代衛星通信・放送システム研究所 (ASC) が開発したものである。多重化方式に直交周波数分割多重 (Orthogonal Frequency Division Multiplexing: OFDM) 方式を用い、OFDM方式としては、ITU-R勧告 774System-A に準拠した方式となっている。情報速度は、1channel 当たり最大で 256kbps である。

OFDM方式を衛星システムで使用する場合、増幅器における非線形の影響が懸念されるところであるが、ETS-VIIIによるシステムでは高出力増幅器の線形領域に近い動作点にて信号伝送を行うことから、伝送性能の劣化はわずかであることが地上試験において確認されている。衛星を使った実証実験においては、主に、高出力増幅器による非線形の影響と、移動環境における信号のマルチパスに対する影響についての検証を行う。

d 地球局評価実験^[13]

d-1 基地地球局評価実験

鹿島宇宙技術センター内に設置された基地地球局には、Ka帯フィーダリンク地球局並びにS帯基準地球局がある。

Ka帯のフィーダリンク地球局は、実験の要となる地球局であり、アンテナには直径5mのカセグレインアンテナを、高出力増幅器には飽和出力電力が100Wの進行波管 (TWTA) を用いている。基本的な性能については衛星打ち上げ前に取得済みであるが、衛星打ち上げ後に取得すべき重要な特性としてアンテナの衛星追尾特性評価、自動周波数補正性能評価がある。衛星の追尾にはステップトラック方式による自動追尾機能と、手動による追尾機能を有している。また、周波数補正は、衛星上の発振器の安定度に起因する周波数変動を補正する機能であり、衛星から送信されるビーコン信号を受信することにより補正を行う。これらの特性は衛星からの電波を受信することにより評価ができる。

S帯基準局は、移動体衛星通信実験におけるモバイルリンクの基準局として用いられる装置であり、こちらも基本性能は衛星打ち上げ前に取得済みである。アンテナは、直径3.6mのパラボラアンテナで、高出力増幅器には飽和出力電力が20Wの固体増幅器 (SSPA) を用いている。本地球局は、実験中の

モニタ局としての役割を果たすと共に、衛星の移動に伴う受信信号周波数変動を補償する周波数補正機能の実証実験に用いられる。

d-2 携帯型移動地球局性能評価実験

携帯型移動地球局は、衛星に搭載された大型展開アンテナを用いることを前提に、実用的な仕様として携帯電話に近い形状及び重量、送信電力等を検討し試作したものである。小型化を図るため、送受信用のアンテナは、筐体上部に内蔵し、外部には突起物が無い構造としている。内蔵のアンテナは、利得が約3dBiのセラミックパッチアンテナで、素子の大きさは、30mm×27mmである。送信出力は約1W、バッテリーによる駆動ができ、単3型乾電池で30分以上の連続通話が可能となっている。変調方式には、二相位相変調 (BPSK) 方式を用い、伝送速度は、8kbps、重量及び容積は、バッテリーを含まない場合で、それぞれ266g及び244ccと携帯性に優れたものである。

4 通信応用実験^{[14][15]}

a アンテナパターン補正実験

フェーズドアレイ方式を用いたマルチビームを持つ衛星搭載用の大型展開アンテナにおいては、給電部の励振分布誤差、鏡面の形状誤差により、ビーム指向方向が変動する。現在検討を進めている地上/衛星統合移動通信システム (Satellite-Terrestrial Integrated mobile Communication Systems: STICS) においては直径30m級の大型反射鏡を有する衛星搭載アンテナの開発を想定しているが、これらの誤差を補正するために、「大型アンテナ指向変動等模擬ソフトウェア」を開発した。実験では複数の地上局を用いた素子電界ベクトル回転法 (REV法) により得られたデータをもとにソフトウェアを用いて反射鏡の回転角度を推定し、開発したソフトウェアの有効性について検証する。

b 低サイドローブ化実験

基本実験において大型展開アンテナの特性評価を実施し、給電部の励振分布誤差、鏡面の形状誤差により、サイドローブレベルが設計値より上昇していることが確認された。このため、複数の地上局を用いたREV法により得られたデータをもとに開発したソフトウェアを改修して機能を追加して鏡面形状推定し、サイドローブを低下させる実験を行った。本応用実験では、検討した方式における、軌道上での鏡面形状推定技術、励振分布推定技術の有用性、妥当性について検証する。

c 航空機を対象にしたデータ伝送実験

移動地球局を航空機へと搭載し、S帯という周波数の、航空衛星移動通信への適用性について検証を行う。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を使用し、航空機の機体上部へと搭載して、変復調器には市販の汎用品を用いている。実験では、航空機上からパケット信号を伝送し、衛星回線経由で地上局にて受信して、受信信号レベル並びにパケット誤り率を取得する。データは、航空機の水平飛行時、旋回飛行時並びに静止時（着陸状態）のそれぞれについて取得し、比較評価をする。

d センサネットワーク実験

災害が発生あるいは発生の早期検出のため、通信手段及び電力の供給が困難な場所からでも必要な情報を収集できる衛星センサネットワークの検討を進めている。本実験では、センサ実験地球局と基地地球局間でデータ伝送を行い、特性を取得する。センサ実験地球局には自動的なデータ収集と長時間の動作が求められることから、通信用の出力電力は0.8Wに抑え、信号の送信は間欠的に行っており、送信間隔については、基地地球局より制御ができる。また、伝送可能な情報速度は50bpsであり、低速度において安定的な復調が行えるように通信信号には直接拡散による拡散符号化を施してある。アンテナには、移動体へと容易に設置が可能な小型のヘリカルアンテナを用いており、方位角方向では無指向性、仰角方向で利得半値幅が約40度の指向性を有する。実験においては、基本特性である信号のフレーム誤り率（FER）を取得すると共に、地球局を海上ブイへと搭載し、津波検出の有効性について検証を行う。

5 むすび

ETS-Ⅷを用いて実施した移動体衛星通信実験の概要について述べた。ETS-Ⅷの開発は平成4年に開始され、途中、H-IIA ロケット開発遅延の影響もあり、平成18年にようやく打ち上げられた。通信機器としては、大型展開アンテナの受信系に不具合があり、計画していた一部の実験は中止に追い込まれたが、関係者の努力により、打ち上げ前に予定していた当初の目的をほぼ達成した。情報通信研究機構による実験は、平成24年12月をもって終了したが、衛星は、平成26年2月現在も運用が行われている。本実験実施により得られた結果が、将来の移動体衛星通信システム開発の一助となれば幸いである。

謝辞

衛星搭載機器並びに地球局の開発、そして、移動体衛星通信実験の実施に関わった多くの方々に深謝致します。

【参考文献】

- 1 “技術試験衛星Ⅷ型(ETS-Ⅷ)特集,”情報通信研究機構季報, Vol. 49, Nos. 3/4, Sept./Dec. 2003.
- 2 平良真一, “移動体衛星通信システム技術の宇宙実証 - きく8号を用いた衛星通信実験 -, ” Telecom Frontier SCAT Technical Journal, No. 59, pp. 31- 39, May 2008.
- 3 T. Orikasa, Y. Fujino, and M. Sato, “Measurement of Radiation Pattern of Large Deployable Reflector Antenna on Engineering Test Satellite (ETS-Ⅷ) on Orbit,” International Symposium on Antenna and Propagation, Oct. 2008.
- 4 佐藤正樹, 藤野義之, 織笠光明, “軌道上におけるETS-Ⅷ搭載アンテナパターン特性測定,” 信学誌(B), Vol. J91-B, No. 12, pp. 1641-1643, Dec. 2008.
- 5 山本伸一, 川崎和義, 平良真一, “技術試験衛星Ⅷ型(ETS-Ⅷ)搭載オンボードプロセッサ(OBP)の軌道上評価実験結果,” 信学技報, SANE2009-27, June 2009.
- 6 S. Taira, S. Yamamoto, S. Kozono, and M. Yoneda, “Performance of an Onboard Packet Switch for Mobile Satellite Communications in Geostationary Satellite Orbit,” 59th International Astronautical Congress, IAC-08-B2.2.9, Sept. 2008.
- 7 小園晋一, 渡邊宏, 佐藤正樹, 山本伸一, “ETS-Ⅷ移動体通信用中継器の軌道上初期性能,” 信学会2007年ソサイエティ大会, Sept. 2007.
- 8 平良真一, 山本伸一, 竹田修, “衛星搭載用回線交換機の開発と軌道上性能評価,” 信学誌(B), Vol. J93-B, No. 7, pp. 868-877, July 2010.
- 9 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.
- 10 H.-B. Li and M. Ohkawa, “A Modem Developed for Unequal Error Protection Using Multiple Block-Coded Modulation,” 21st International Communications Satellite Systems Conference, AIAA-2003-2241, April, 2003.
- 11 A. Miura et al, “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.
- 12 山本伸一, 渡邊宏, 佐藤正樹, “技術試験衛星Ⅷ型を用いたOFDM方式による同報通信実験,” 信学技報, SANE2007-130, Feb. 2008.
- 13 山本伸一, 小園晋一, 浜本直和, “技術試験衛星Ⅷ型を用いた小型携帯端末による音声通信,” 信学誌(B), Vol. J91-B, No. 12, pp. 1620-1628, Dec. 2008.
- 14 佐藤正樹, 織笠光明, 藤野義之, “軌道上におけるETS-Ⅷ搭載大型展開アンテナの放射パターン評価,” 信学誌(B), Vol. J94-B, No. 3, pp. 344-352, March 2011.
- 15 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



織笠光明 (おりかさ てるあき)

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
博士(工学)
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