技術試験衛星V型 (ETS—V) を用いた 航空機データ通信実験

石出 明*・藤田光紘*・奈須英臣*・星野尾一明*
伊藤 実*・新美賢治*・山田多津人*・西 周次*

Aeronautical Data Communication Experiment Using Engineering Test Satellite V (ETS—V)

Akira ISHIDE, Mitsuhiro FUJITA, Hideomi NASU, Kazuaki HOSHINO,
Minoru ITO, Kenji NIIMI, Tatsuto YAMADA and Shuji NISHI

Abstract

This paper describes the result of data communication experiment using a Boeing 747 cargo aircraft and Engineering Test Satellite V (ETS—V) conducted to develop and evaluate satellite data communication techniques for oceanic air traffic control. Circular patch antennas (peak gain: 7 dBi) on board the B747 were used for transmission to and reception from the ETS—V. The B747 flew between Narita and Anchorage where the satellite elevation angle varied from 10° to 45°.

Data transmission characteristics for three modulation schemes, BPSK, SS and PM, were measured and compared with theoretical ones. The result showed the followings. The degradation of data transmission characteristics were within the link margin for all modulation schemes. For BPSK (without FEC), transmission errors considerably increased in the eastbound flight due to signal level variation caused by the reflection on a wing. But, the increase of transmission errors was relatively small in the westbound flight for all modulation schemes.

1. は じ め に

現在、洋上を飛行する航空機の管制には短波の音声通信が使われている。この短波通信は電離層の反射を利用して遠距離の交信を行うが、電離層の状態は季節、時間及び太陽の活動等により変化するため、不安定で雑音も多い。そこで、20年程前から、衛星通信技術を利用してこれを改善しようという考えがあったが、経済上の問題等のため、これまで実現していない⁽¹⁾。ところが、近年、この衛星通信技術を航空の分野に導入しようという動きがICAO（国際民間航空機関）、ARINC（Aeronautical Radio Inc.）及びインマルサット（国際海事衛星機構）等で活発になっている。ICAOではAMSSP（航空移動衛星業務パネル）を設立し、航空衛星通信の国際技術基準の検討を行っている。この検討は主として衛星データ通信に関するものである。洋上管制における衛星データ通信の用途は、ADS（自動従属監視）と呼ばれる機上航法装置による航空機位置情報の地上への自動伝送、定型的な管制情報の伝送、デジタル音声の伝送等である⁽²⁾。衛星データ通信で問題となるのは、実際に航空機が飛行している状態でどの程度のデータ伝送特性が得られるかということである。しかしながら、こ

* 正会員 運輸省電子航法研究所（〒181 東京都三鷹市新川6—38—1）

のような条件で測定したデータは非常に少ない。そこで、当研究所では昭和62年度打上げの技術試験衛星V型（ETS-V）及び日本航空㈱のボーイング747型貨物機（以下「B747」という。）を利用してデータ通信実験を行い、3種類のデータ変調方式に関する基本伝送特性を測定した。本論文では、まず、この実験に用いた実験システムの概要を述べる。次に、衛星折返しによる測定結果について述べる。最後に、B747飛行実験による測定結果について述べ、実際の飛行条件で生じる伝送特性の劣化について明らかにする。

2. 実験システムの概要

2.1 実験システムの構成

図1は実験システムの構成を示す。ETS-Vは550kg級の3軸姿勢制御方式の静止衛星で、昭和62年8月にH-Iロケット3段式試験機で打ち上げられ、東経150°の赤道上空に静止している⁽³⁾。この衛星にはAMEX（航空・海事実験用中継器）と呼ばれる移動体衛星通信実験用の中継器が搭載されている⁽⁴⁾。ETS-Vより地上の移動体に向け送信するLバンドアンテナは、航空機のような小型地球局を対象とするため、2つのスポットビームをもつオフセットパラボラアンテナである。そのビーム中心利得は約25dBiで従来のグローバルビームアンテナに比べ約6dB程度大きい。使用周波数帯は航空・海岸地球局（以下「地上局」という。）と衛星の間がCバンド（上り回線5948.75～5971.25MHz、下り回線5218.75～5241.25MHz）、衛星と航空機の間がLバンド（上り回線1647.0～1650.0MHz、下り回線1545.0～1548.0MHz）である。

地上局は郵政省通信総合研究所鹿児島宇宙通信センターに設置した。地上局にはCバンド及びLバンド送受信設備がある。Cバンドアンテナは直径約10mの鏡面修正カセグレンアンテナで、Lバンドアンテナは直径約3mのパラボラアンテナである。衛星折返し実験では航空機の代わりに地上局のLバンド送受信設備を利用して、地上局から衛星折返しで測定を行った。B747は主として成田—アノカレッジ間を運航しており、これにLバンドアンテナ及び送受信機等の実験装置（航空機搭載装置）を搭載した。

2.2 航空機搭載装置

図2は航空機搭載装置の配置を示す。アンテナは上部客室後方機外のフェアリング（流線形のレドーム）内に取付け、その他の実験装置は上部客室内に設置した。航空機アンテナの要件としては、機体の空力性能や構造強度への影響をできるだけ少なくし、またどの機種でも利用できるような、小型のものが望ましい。そこで、本実験では3個の円形パッチアンテナ（縦15cm、横18cm、厚さ2cm）を使用し、成田—アノカレッジ間の飛行経路

図1 航空機データ通信実験の構成

図2 航空機搭載装置の配置

図3 円形パッチアンテナの放射パターン

図4 成田—安カレ間における衛星方向の変化

上での衛星方向をカバーするように配置した。実用上は所要のカバレッジ(通常、機体の上半球)を得るため、複数個を配置して、衛星の方向により、スイッチで切り換えて使用することを想定している。図3は円形パッチアンテナの放射パターン(実測値)である。放射パターンは $x-y$ 面内(実線)と $x-z$ 面内(破線)ではほぼ等しく、正面方向を軸として回転対称の形である。正面方向の利得は約7 dBiで、利得4 dBi以上のビーム幅は約 80° である。図4は成田—安カレ間におけるETS-Vの方位角、仰角の変化を示す。破線は3個の円形パッチアンテナの利得4 dBi以上となる範囲である。なお、航空機搭載のLバンド高電力増幅器(HPA)はC級の固体増幅器で、その出力電力は約50dBm(100W)である。

2.3 変復調方式

表1は実験に用いたデータ通信の変復調方式である。BPSK(2相位相偏位変調)、SS(周波数拡散変調)及びPM(位相変調)の3つの変調方式を用いた⁽⁵⁾。FEC(誤り訂正)方式としては、誤り訂正能力の優れた畳込み符号/ビタービ復号と呼ばれる方式を用いた⁽⁶⁾。BPSKは最もビット誤り率特性が優れている方式で、航空機衛星通信のように厳しい回線条件に適している。

SSはBPSKより装置が複雑になり、周波数の利用率も良くないが、BPSKに近いビット誤り率特性をもち、また干渉に強い特徴があるので海面反射の軽減効果が期待できる⁽⁷⁾。PMでは変調度に応じて変調波に搬送波が残るため、データ伝送に使える電力は減少する(変調損)が、測距信号等のアナログ信号と多重化することが容易という利点がある⁽⁸⁾。BPSKとSSではデータ通信とデジタル音声通信を行うが、PMではデータ通信のみを行う。図5はデータ通信における基本構成である。図には地上局から航空機の場合を示したが、逆方向も同様である。FECを使用しない場合は情報速度4.8kbpsのデータが直接変調器に入力され、送信される。一方、FECを使用する場合、情報速度2.4kbpsのデータがFEC符号器で4.8kbpsのデータに変換された後変調器に入力される。本実験システムでは洋上管制通信に利用可能と考えられる最低の音声符号化速度4.8kbpsを変復

表1 データ通信の変復調方式

変調方式	情報速度	FEC	備考
BPSK	4.8 kbps	なし	畳込み符号： 符号化率 1/2 拘束長 7
	2.4 kbps	畳込み符号/ ビタービ復号	
SS*	4.8 kbps	なし	ビタービ復号： 8値軟判定 *リターン回線 のみ
	2.4 kbps	畳込み符号/ ビタービ復号	
PM	2.4 kbps	畳込み符号/ ビタービ復号

図5 データ通信の基本構成

調器の伝送速度とした。ADS等のデータ通信では後述するようにビット誤り率を低くするため、FECを用いる。情報速度2.4kbpsでADSデータ(1機当たりの最大所要ビット数329ビット)⁽²⁾を送送するとすると、信号捕捉・同期等に必要ビット数(500ビット程度)を考慮しても、1機当たり0.5秒以下で伝送できる。したがって、1チャンネルで、200機の航空機から、100秒毎にADSデータを伝送できることになる。

表2はBPSK及びPMにおける所要 C/N_0 (理論値)を示す⁽⁶⁾。所要 C/N_0 は所要のビット誤り率を実現するために必要な回線 C/N_0 (搬送波電力対雑音電力密度比)のことである。デジタル音声伝送の場合、ビット誤りの違いによる音声品質の違いはビット誤り率 10^{-3} 以下では現れないので、所要ビット誤り率を 10^{-3} とした。データ通信の場合の所要ビット誤り率はICAOのFANS委員会(将来航空航法特別委員会)の検討結果から⁽⁸⁾ 10^{-5} とした。地上局から航空機への回線(フォワード回線)の C/N_0 は航空機のアンテナ利得を4dBiとすると、49.4dBHzとなる。したがって、BPSK(FEC無)の場合、回線マージン(回線 C/N_0 と所要 C/N_0 の差)は5.2dBである。BPSK(FEC有)の場合、回線マージンは11.1dBである。SSの回線マージンはBPSKと同じである。PMでは変調度1ラジアンするとき、変調損は4.1dBとなるので回線マージンは7dBとなる。

3. 実験結果

3.1 衛星折返し実験

図6は実験用に開発したBPSK, PM及びSS各変復調方式について、地上局—衛星間の折返し回線(地上局→衛星:Lバンド, 衛星→地上局:Cバンド)で測定したビット誤り率(BER)対 C/N_0 特性を示す。測定において、回線の C/N_0 は受信側での雑音レベルを一定(-105dBm/Hz)に保ち、受信信号レベルを減衰器で変えることにより、設定した。BPSK(FEC無)の場合、ビット誤り率 10^{-3} となる C/N_0 は44.7dBHzで、理論値からの劣化は C/N_0 で0.5dBである。同様に、SS(FEC無)の場合、ビット誤り率 10^{-3} となる C/N_0 の劣化は0.9dBである。BPSK(FEC有)の場合、ビット誤り率 10^{-5} となる C/N_0 は39.2dBHz

図6 衛星折返しによるビット誤り率特性

表2 BPSK及びPMの所要 C/N_0

	BPSK(FEC無)	BPSK(FEC有)	PM
所要ビット誤り率	10^{-3}	10^{-5}	10^{-5}
所要 E_b/N_0 *	7.4 dB	4.5 dB	4.5 dB
情報速度	36.8 dB (4800bps)	33.8 dB (2400bps)	33.8 dB (2400bps)
変調損	—	—	4.1 dB
所要 C/N_0	44.2 dBHz	38.3 dBHz	42.4 dBHz
回線マージン (回線 C/N_0 49.4dBHz)	5.2 dB	11.1 dB	7.0 dB

* 1ビット当たりの信号電力対雑音電力密度比

図7 BPSKのビット誤り率特性
(アンカレッジ→成田)

図8 BPSKのビット誤り率特性
(成田→アンカレッジ)

図9 信号レベル変動の測定例

で、理論値からの劣化は 0.9dB である。PMの場合、ビット誤り率 10^{-5} となる C/N_0 は 43.0dBHz で、理論値からの劣化は 0.6dB である。この回線では衛星仰角が 47° でフェージングはほとんどなく、変復調器単体の特性にほぼ等しいと考えられる。

3.2 飛行実験

(1) BPSKのビット誤り率特性

図7は西行の飛行経路で測定したBPSKのビット誤り率対 C/N_0 特性である。使用回線はリターン回線（航空機から地上局への回線）である。BPSK (FEC無) の場合、○印は衛星仰角が $25^\circ \sim 35^\circ$ の場合の測定値である。また、破線は衛星折返しによる結果である。飛行実験の結果と衛星折返しによる結果にあまり大きな差は見られない。ビット誤り率 10^{-3} となる C/N_0 は 45dBHz で、劣化は 0.3dB である。このようにビット誤り率特性の劣化が少ないのは西行の飛行経路では、フェージングがあまり大きくないためと考えられる。BPSK (FEC有) の場合、○印は衛星仰角が $13^\circ \sim 19^\circ$ の場合、●印は衛星仰角が $23^\circ \sim 30^\circ$ の場合、▲印は衛星仰角が $36^\circ \sim 42^\circ$ の場合の測定値である。衛星折返しによる結果からの劣化は、FECを使用しない場合より大きい。また、あまり顕著ではないが、衛星仰角が低いほど、特性劣化は大きい。ビット誤り率 10^{-5} となる C/N_0 の平均値は 41.4dBHzで、劣化は 2.2dB である。衛星仰角が低いときの特性劣化の原因は海面反射によるマルチパスフェージングの影響と考えられる。

図8は東行の飛行経路で測定したBPSK (FEC無) のビット誤り率対 C/N_0 特性である。使用回線はリターン回線である。○印は衛星仰角が $13^\circ \sim 18^\circ$ の場合、●印は衛星仰角が $22^\circ \sim 26^\circ$ の場合、▲印は衛星仰角が $36^\circ \sim 40^\circ$ の場合の測定値である。衛星折返しによる結果からの特性劣化は、西行に比べてかなり大きいことが分かる。また、衛星仰角が低いとき、若干特性劣化が大きくなっている。ビット誤り率 10^{-3} となる C/N_0 の平均値は約48.8dBHzで、劣化は4.1dB である。西行に比べて、特性の劣化が大きい原因は、東行の場合の方がフェージングが大きいためと考えられる。図9は東行及び西行における信号レベル変動の測定例である。この図から明らかなように、東行では西行に比べて大きな信号レベルの変動が生じる。これは、図4から明らかなように、東行の場合、衛星方位が主翼方向と一致し、それによる反射の影響を受けるためと考えられる。

(2) SSのビット誤り率特性

図10は東行の飛行経路で測定したSS (FEC無) のビット誤り率対 C/N_0 特性である。衛星仰角の範囲は $32^\circ \sim 42^\circ$ で、リターン回線を使用した。破線は衛星折返しによる結果である。飛行実験による結果は衛星折返

図10 SSのビット誤り率特性
(成田→アンカレッジ)

図11 PMのビット誤り率特性
(アンカレッジ→成田)

しによる結果とあまり差は見られない。ビット誤り率 10^{-3} となる C/N_0 は 45.3 dBHz で、劣化は 0.2 dB である。

(3) PMのビット誤り率特性

図11は西行の飛行経路で測定したPMのビット誤り率対 C/N_0 特性である。使用回線はリターン回線で、衛星仰角は $11^\circ \sim 36^\circ$ である。破線は衛星折返しによる結果である。 C/N_0 が低いほうでは衛星折返しによる測定値とあまり差はないが、 C/N_0 が高いほうでは、若干の劣化が見られる。ビット誤り率 10^{-5} となる C/N_0 は 44.3 dBHz で、劣化は 1.2 dB である。

4. ま と め

今回の実験により以下のことが明らかになった。

- (1) 実際の衛星、航空機を用いて、成田—アンカレッジ間の洋上航空路で測定したBPSK (FEC有), BPSK (FEC無), SS (FEC無) 及びPM (FEC有) のビット誤り率特性の劣化量が明らかとなった。表3は各変復調方式におけるビット誤り率特性の劣化量をまとめたものである。理論値に対する劣化量は実験に用いたすべての変復調方式で回線マージン以下であることが確認された。

表3 各変復調方式におけるビット誤り率特性の劣化量

変復調方式	ビット誤り率	理論値からの劣化量 (dB)		回線マージン (dB)
		東行	西行	
BPSK (FEC無)	10^{-3}	4.6	0.8	5.2
BPSK (FEC有)	10^{-5}	—	3.1	11.1
SS (FEC無)	10^{-3}	1.1	—	5.2
PM (FEC有)	10^{-5}	—	1.8	7.0

式におけるビット誤り率特性の劣化量をまとめたものである。理論値に対する劣化量は実験に用いたすべての変復調方式で回線マージン以下であることが確認された。

- (2) 成田—アンカレッジ間の東行の飛行経路で、BPSK (FEC無) のビット誤り率特性は主翼による反射の影響と考えられるフェージングにより大きな劣化を示した。今回の実験では、円形パッチアンテナの取り付け位置、取り付け角度等を最適化していないが、これを行えば特性劣化はかなり軽減できると考えられる。
- (3) 成田—アンカレッジ間の西行の飛行経路では、BPSK, SS 及びPMのビット誤り率特性に大きな劣化は生じなかった。
- (4) 成田—アンカレッジ間の西行の飛行経路の衛星仰角が低い所で、海面反射によるフェージングの影響と考えられる劣化が生じた。しかし、その劣化量は大きくなかった。

東行の飛行経路でBPSK (FEC有) のビット誤り率特性は得られなかったが、BPSK (FEC無) の結果から、かなり大きな劣化が生じると予想される。この劣化を軽減するにはフェージングにより発生するバースト誤りをランダム誤りに変換して、FECの誤り訂正性能を有効にするインターリーブ⁽⁶⁾の技術を併用する等

の方法が考えられる。

これらの結果は、機体の上部に取り付けた円形パッチアンテナを使用して得られたものである。したがって、アンテナの種類、取り付け位置等により、状況は変わる点に注意を要する。海面反射によるフェージングは衛星仰角 17° で S/I (直接波電力対マルチパス波電力比)で $10\sim 12\text{dB}$ 程度が観測されている⁽⁹⁾。マルチパス波が機体で遮られて、その影響が比較的少なかったものと考えられるが、アンテナの取り付け位置が機体の側面になると、その影響は大きくなると予想される。

SSでは海面反射の影響の軽減効果を評価する目的であったが、海面反射が少なかったため、その効果は確認できなかった。

今回の実験から、衛星を利用した航空機データ通信の基本特性が明らかとなり、その実用性が十分あることが分かった。ADSが実用化されれば、陸地上空及びその周辺空域で使われている航空路監視レーダのようにADSを用いて洋上を飛行する航空機の位置も常時監視できるようになる。また、現在洋上航空管制で使われている短波の音声通信のうち定型的なものはデータ通信で行えるようになる。緊急通信等の非定型の通信も必要となるが、これもデータ通信回線を利用した質の良いデジタル音声通信により可能である。今回実験に用いた 4.8 kbps のデジタル音声符号化方式では洋上航空管制用としては使用可能な明瞭度が得られるが、公衆通信用ほどの音声品質は得られない。しかし、この分野での進歩は著しく、近い将来には公衆通信にも使用可能な方式が開発されるものと考えられる。その場合には、本実験で用いたような小型のアンテナで公衆通信並の通信も可能となろう。

謝 辞

本実験にご協力頂いた郵政省通信総合研究所、宇宙開発事業団、日本航空株式会社、日本電気株式会社の関係各位に深く感謝します。また、データ処理プログラムの作成等にご協力頂いた当研究所の三垣充彦主任研究官及び伊藤憲主任研究官に深く感謝します。

参 考 文 献

- (1) 北野, “将来の航空交通管制における衛星利用”, 日本航海学会誌, 85, pp. 39—44, 1985
- (2) 馬上, “21世紀初頭の民間航空航法システム—ICAO FANS 委員会の結論—”, 日本航海学会誌, 99, pp. 116—126, 1989
- (3) 西, “ETS-Vを用いた航行援助実験計画”, 日本航海学会誌, 89, pp. 29—38, 1986
- (4) 星野尾他, “ETS-V搭載中継器(AMEX)”, 電子情報通信学会技術研究報告, SANE 86—49, pp. 9—16, 1987
- (5) 星野尾他, “ETS-Vを用いた航行援助実験用地上局端局装置”, 電子情報通信学会技術研究報告, SANE 87—13, pp. 9—16, 1987
- (6) V. K. BHARGAVA他, “最新デジタル衛星通信”, ジャテック出版, 1986
- (7) R. C. DIXON, “最新スペクトラム拡散通信方式”, ジャテック出版, 1978
- (8) “第3回FANS委員会報告書”, ICAO, 1986
- (9) 星野尾他, “ETS-Vを用いた航行援助実験—航空機実験における電波伝搬の概要”, 電子情報通信学会総合全国大会論文集, pp. 2—245, 1989

質 疑 応 答

林 尚吾(東京商船大学): FECの有無が重要な要素となっていますが、FECの概要についてもう少しご説明下さい。

石出 明: FECは回線の C/N_0 を変えないで、伝送路上で生じる誤りを訂正する技術です。送信側では一定の規則に従って本来の情報ビットに検査ビットを付け加えて符号化し、送信します。受信側では情報ビットと検査ビットの関係から誤りビットを検出し、それを自動的に訂正します。したがって、伝送する情報ビットに余分の検査ビットを付加する必要がありますから、同じビット伝送速度ですと、情報速度は減少します。