ETS-V を用いた航行援助実験計画^{*1}

西 周 次^{*2}

Key Words: Air Traffic Control, Satellite Navigation, ETS-V

1. はじめに

陸地上空の航空機の管制には、質のよい VHF (超短波) の音声通信を用いることができ、また、各航空機の位置は監視レーダにより正確に求めることができる。しかし、陸地から 400 海里も離れると、これらの装置は電波の到達限界を越すために使用することができない。そこで現在、洋上の航空機の管制は、より長距離まで電波が伝搬する HF (短波) を用いた音声通信により行われているが、HF 通信は電離層の反射を利用しているため、長距離になると減衰がはなはだしく、雑音やフェージングによりきわめて不安定である。また、現在の洋上航空機の位置の確認は、パイロットが機上の INS (慣性航法装置) 等で測定した位置を約 1 時間に 1 回程度の頻度で地上に報告してくる方法がとられているため、大韓航空機事件のように正規の航空ルートから外れて飛行していても、地上ではそれを監視することができない。

このように現在の洋上航空管制方式には大きな欠点があるため、同時に飛行する航空機の間隔、すなわち管制間隔を小さくすることができず、年々増加する航空交通量に対処できない。このため、洋上空域に航空衛星システムを導入して、衛星による航空機との通信、測位システムを確立する必要がある。

このような情勢から、米国の MITRE 社はインマルサットの衛星を使用して、1985 年に北大西洋域で 200 bps の航空用データ通信の伝送実験を行った。また、英国の BTI (British Telecom International)、英国航空 (BA)、Racal Decca 社は共同でインマルサットの衛星を用いた航空用音声伝送実験を 1987 年より開始する予定である。この他、西ドイツ、カナダ、ソ連等にも航空衛星の実験計画がある。

このような各国の実験計画に対応して、現在、ICAO (国際民間航空機関) では将来の航空航法システムを研究するための特別委員会 (FANS 委員会) を組織して、この問題を国際的に検討している。この委員会では、将来の民間航空の分野に衛星を導入するための基本概念がまとめられつつある。次の段階として、この概念に従って ICAO に専門家パネルが組織され、航空衛星システムの標準および勧告方式 (SARPs) が作成されるものと思われる。

このような国際的背景から、運輸省では昭和 62 年度打上げの ETS-V (技術試験衛星 5 型) を用いた航行援助実験計画を昭和 58 年度より開始した。この実験は航空衛星システム開発の基礎となる航空機を対象とする通信、測位の技術開発および海事関係では小型船舶を対象とする通信、測位の技術開発を目的としている。本実験計画は運輸省 (電子航法研究所)、郵政省 (電波研究所) および宇宙開発事業団が協力して行うものであり、郵政省は船舶、航空機を対象とする一般公衆通信技術の開発、宇宙開発事業団は 550 kg 級三軸安定静止衛星のバス機器の開発をおもな目的としている。なお、「航行援助実験」の名称は運輸省側だけで使用しているものである。以下、ETS-V を用いた航行援助実験計画の主として航空関係の概要について解説する^{1-4,9,11)}。

2. 実験システムの構成

第 1 図に実験システムの構成を示す。衛星 ETS-V は、昭和 62 年度夏期に H 1 ロケットにより宇宙開発事業団が打ち上げる予定の重量約 550 kg、三軸姿勢

著者紹介

西 周次

昭和 7 年生。昭和 30 年、信州大学工学部通信工学科卒業。31 年、運輸省運輸技術研究所に入所。42 年、運輸省電子航法研究所設立とともに同所衛星航法部システム研究室長。各種衛星航法システムの誤差解析等、主としてソフトウェアの研究に従事。55 年より同所衛星航法部長。

^{*1} 昭和 62 年 3 月 28 日原稿受理 Navigation Experiment Program Using ETS-V

^{*2} 電子航法研究所 Shuji NISHI

第1図 実験システムの構成

制御の静止衛星である。静止位置は赤道上の東経 150 度である。この衛星に AMEX (Aeronautical Maritime EX-perimental transponder) と呼ばれる C-L バンド変換中継器を搭載して、種々な実験を計画している。実験に使用する周波数は衛星と航空・海岸地球局間が C バンド (上り 6 GHz 帯, 下り 5 GHz 帯), 衛星と航空機地球局または船舶地球局間が L バンド (上り 1.6 GHz 帯, 下り 1.5 GHz 帯) である。以下, 説明が煩雑な場合には, 航空・海岸地球局, 航空機地球局, 船舶地球局を, それぞれ地上局, 航空機, 船舶と略記する。

実験は大別して, 音声, データ等の通信の実験, 衛星と航空機・船舶間の距離を測定する測距の実験, 航空機の位置を測定する測位実験に分けられる。通信の実験で地上から航空機・船舶に信号を送る場合には, 地上局から衛星に向けて C バンドの電波で送信し, 衛星でこの電波を受信すると中継器により L バンドの電波に変換して航空機・船舶に向け再送信する。航空機・船舶より地上局に信号を送る場合には, まったくこの逆である。

測距の実験を行う場合には, 測距信号という特殊な信号を地上局より送信し, その信号を衛星経由で航空機・船舶が受信すると, すぐその信号を衛星経由で地上局に送り返す。地上局では送信した信号と受信した信号の時間差を測定することにより, 地上局-衛星-航空機・船舶間の距離を測定することができる。地上局と衛星間の距離は別に C バンド電波の往復測距から求められるので, この値を前の値から引くことにより, 衛星と航空機・船舶間の距離を求めることができる。

測位の実験を行う場合には, 本来ならば衛星を 2 個打ち上げ, 2 個の衛星からの測距により位置を決定し

なければならないが, 今回の実験では 1 個の衛星しか使用できないので, その代り第 1 図に示したような地上に置いた擬似衛星を用いて, 擬似衛星から航空機までの距離と ETS-V から航空機までの距離を測定して航空機の位置を決定する (航空機の高度は機上の高度計より求める)。したがって, この実験は航空機より擬似衛星が見える限られた範囲でしか行うことができないが, 今回の実験は測位の基本となる衛星を用いた測距技術の開発が主体であり, 測位実験は 2 個の測距値より位置決定ができることの確認, およびデモンストレーション実験との関連で行うものである。

航空・海岸地球局は, 郵政省電波研究所鹿島地球局のアンテナおよび送受信機高周波部等を使用し, それに電子航法研究所 (以下電航研と略記する) が開発した端局を接続して実験を行う。測定した実験データは, データ回線で三鷹の電航研へ送り, そこで処理, 記録される。

航空機地球局は, 電航研の実験用航空機ビーチクラフト B 99 と航空会社のボーイング 747 の 2 機を予定している。B 99 は国内で通信, 測距等の基本的実験を行ったり, 前述した擬似衛星を用いた測位実験を行うために使用する。また, B 747 は東京-アンカレッジ間の航空路で通信, 測距等の実験を行うために使用する。

3. 衛星搭載中継器 (AMEX)

第 2 図に衛星搭載中継器 (以下 AMEX と略称する) の構成を示す^{6,7)}。地上局よりの 6 GHz 帯の信号は左端の C バンド・アンテナで受信され, C バンド入力回路を経て, C バンド受信部で低雑音増幅される。C バンド低雑音増幅器の雑音指数は 2.1 dB である。増幅された信号は C バンド受信局発部の信号と混合

第2図 衛星搭載中継器 (AMEX) の構成

され、140 MHz 帯の中間周波信号となる。この信号は中間周波フィルタ部（フィルタ素子として SAW（弾性表面波）素子を用いている）でろ波・増幅され、Lバンド送信部で周波数変換されて 1.5 GHz 帯の送信信号となる。この信号は Lバンド送信切替回路を経て、Lバンド高電力増幅部で電力増幅され、Lバンド出力回路、Lバンド・ダイプレクサを経て、右端の Lバンド・アンテナより 2 ビームで航空機・船舶に向け送信される。Lバンド高電力増幅器には GaAsFET（ガリウムヒ素電界効果トランジスタ）を用い、出力は約 20 W である。

一方、航空機・船舶よりの 1.6 GHz 帯の信号は右端の Lバンド・アンテナで受信され、Lバンド入力回路を経て、Lバンド受信部で低雑音増幅された後に、140 MHz 帯の中間周波信号に変換される。Lバンド低雑音増幅器の雑音指数は 1.7 dB である。中間周波信号は中間周波フィルタ部でろ波・増幅され、Cバンド送信部で Cバンド送信局発部の信号と混合され、5 GHz 帯の送信信号となる。この信号は Cバンド高電力増幅部で電力増幅され、Cバンド出力回路を経て、左端の Cバンド・アンテナより地上局に向け送信される。Cバンド高電力増幅器には GaAsFET を用い、出力は約 8 W である。なお、AMEX では局部発振器の原振にはオープン制御水晶発振器を採用し、周波数の安定化をはかっている。

AMEX の Cバンド部は現用、予備の 2 系統で完全な冗長系を構成している。すなわち、Cバンド受信部、Cバンド高電力増幅部の現用系が故障した場合、

それぞれ Cバンド入力回路、Cバンド出力回路により、予備系に切り替えることができる。一方、Lバンド部は完全な冗長系ではないが、Lバンド・アンテナが 2 ビームを用いているので、故障時に 1 ビームにすることにより、冗長系を構成できる。すなわち、2 台ずつある Lバンド送信部、Lバンド高電力増幅部、Lバンド受信部のいずれか一方が故障した場合、希望する 1 ビームで実験ができるように、それぞれ Lバンド送信切替回路、Lバンド出力回路、Lバンド入力回路を切り替えて使用する。

AMEX の Cバンド・アンテナは、地球全体を 1 本のビームでカバーするホーン・アンテナを用い、その中心利得は送信が 19.5 dBi、受信が 21.5 dBi である。また、Lバンド・アンテナはオフセット・パラボラ・アンテナで、第 3 図に示すように、地球上の 2 地域を照射する二つのスポット・ビーム（N ビームおよび S ビーム）をもつ。ビーム中心の利得は、両ビームとも送信が 25.0 dBi、受信が 25.7 dBi であり、N ビームがカバーする東京-アンカレッジ間の航空路で 22.5 dBi 以上になるようになっている。

第 4 図に実験に使用する Cバンドと Lバンドの周波数配置を示す。図の A は航空用回線、M は海事用回線を示す。Cバンドの上りおよび下り回線の中心周波数は 5,960 MHz および 5,230 MHz で、それぞれに 3 MHz の帯域幅で 6 回線が割り当てられている。このうち、A (N) および A (S) は航空用の N ビーム、S ビームに対応する回線、M (N) および M (S) は海事用の N ビーム、S ビームに対応する回線

である。また、C/C (A) および C/C (M) は地上局-衛星間の測距に用いる C/C 折返し回線の航空用と海事用である。また、L バンドの上りおよび下り回線の中心周波数は 1,646.25 MHz および 1,544.25 MHz で、それぞれに 3 MHz のバンド幅で航空用 1 帯域、海事用 1 帯域が割り当てられている。図のように L バンドでは N ビーム、S ビームとも同じ周波数帯を用いる。

第3図 衛星Lバンド・アンテナのカバレッジ

第4図 実験に使用する周波数配置

第1表 AMEXの主要性能

	Cバンド	Lバンド
送信周波数 (MHz)	5,230.0±11.25	1,544.25±3.75
受信周波数 (MHz)	5,960.0±11.25	1,646.25±3.75
アンテナ利得 (ビーム中心 dBi)	送信 19.5 以上 受信 21.5 以上 (ホーン・アンテナ)	送信 25.0 以上 受信 25.7 以上 (1.5 mφ オフセット パラボラ・アンテナ)
G/T (ビーム中心 dB/K)	-8.7	-4.0
EIRP (1 dB 圧縮点 dBm)	54.0	62.4
総重量 (kg)	約 64 (アンテナを含む)	
消費電力 (W)	約 295 (Lバンド 2 系統動作時)	

用いる。

この図からわかるように、地上局では C バンド上り回線の周波数帯を適当に選ぶことにより、C/L 変換、C/C 変換の選択、航空用、海事用の選択、N ビーム、S ビームの選択を自由に行うことができる。また、航空機、船舶からそれぞれ L バンドの航空用、海事用の周波数帯で送信を行えば、C バンド下り回線の航空用または海事用の N ビームまたは S ビームの回線に自動的に接続される。

AMEX の主要性能を第 1 表に示す。なお、AMEX の開発は第 2 図の構成図の C バンド部を運輸省が、L バンド部を郵政省が、アンテナおよびダイプレクサを宇宙開発事業団が分担して行った。

4. 航空・海岸地球局

航空・海岸地球局は実験の中核となる無線局で、航空機・船舶との間で音声、データ、測距信号の送受信を行うとともに、通信回線の制御、受信データの収集、処理および記録を行う。航空・海岸地球局の高周波 (RF) 部分は郵政省電波研究所鹿児島支所の CS 用地球局を改修して使用する。RF 部分のおもな性能は G/T (受信性能指数) 29.9 dB/K、送信機出力 260 W である。

第 5 図に航空・海岸地球局端局の構成を示す。端局は 70 MHz の中間周波数 (IF) 信号により鹿児島地球局 RF 部と接続される。図の音声変復調装置およびデータ変復調装置は主として通信の実験に使用される。測距装置は 2 種類あり、対移動体は地上局と航空機・船舶間の測距実験に使用するもので、測距精度は約 100 m である。また、対衛星は C/C バンド折返しで地上局と衛星間の測距に使用するもので、測距精度は約 4 m である。マルチパス測定装置は航空機よりの L バンド電波伝搬実験において、マルチパスの特性を測定するものである。端末は音声通信実験に使用するヘッドセット、スピーカ、マイクおよびデータ通信実

第5図 航空・海岸地球局端局の構成

験に使用するディスプレイ、キーボード、プリンタ等で構成される。制御およびデータ処理用コンピュータは、通信回線の制御、受信データの収集、処理、記録等に使われる。また、通信制御機構は鹿島-三鷹間のデータ回線のインターフェイスである。左上の擬似衛星はLバンドの電波を受信し、低雑音増幅して、中間周波信号に変換する機能をもつ。

5. 航空機地球局

航空機地球局の構成を第6図に示す。衛星からのLバンド信号はアンテナにより受信され、ダイプレクサー、低雑音増幅器、ダウンコンバータを経て中間周波信号となり、音声復調装置またはデータ復調装置で復調されて、端末のヘッドセット、ディスプレイ等で聴取、表示される。送信の場合には、端末のヘッドセット、キーボード等から入力された音声信号、データ信号は音声変調装置またはデータ変調装置により中間周波信号となり、アップコンバータでLバンド信号となり、電力増幅器、ダイプレクサーを経てアンテナより衛星に向けて送信される。

測距の場合には、地上局から測距信号と一緒にあて先航空機の識別コードを送信する。航空機がこの信号を受信すると、データ復調装置より識別コードがコンピュータに送られ、これが自機の識別コードと一致すると、制御信号を図のSW（スイッチ）に送出し、SWが閉じられる。SWが閉じられると、受信した測距信号はそのままLバンドの送信信号となって衛星に向けアンテナから再送信される。

制御およびデータ処理用コンピュータは航空機地球局の信号制御・受信データの収集、処理、記録を行う。また、マルチパス測定用信号発生器は、Lバンド電波の伝搬実験の際に、マルチパス特性を測定するための信号を発生する装置である。航空機地球局のG/Tは約-23 dB/K、送信機出力は約100 Wである。

航空機用のアンテナは設置場所、形状等の制約から

小型、軽量かつ機体の空力的性能や強度に影響を与えない構造が要求される。一方、通信品質はアンテナ利得が高いほど良くなるが、アンテナの寸法が大きくなる。この二つの要求は相矛盾するものであるが、近年ディジタル通信の進歩が著しく、低C/N₀（搬送波電力対雑音電力密度比）での音声、データ通信の品質が大幅に向上していること、衛星アンテナのマルチビーム化が進んでいること等により、低利得アンテナでも良好な通信が可能となりつつある。このような点を考慮して、本実験用の航空機アンテナとして構造の簡単な素子切替型アンテナを採用することとした。アンテナ素子は第7図に示すような円形パッチアンテナで、これを複数個配置して衛星の方向に応じて切り替えて使用する。このアンテナ素子の利得は正面方向で約7 dBiである。

第8図は東京-アンカレッジ間を飛行するボーイング747の機体に対する衛星方向の変化の範囲を示したものである。東京からアンカレッジに向かう場合、衛星は機体の右側斜め後方となり、アンカレッジから東京に向かう場合は、左側斜め前方となる。また、衛星仰角は5~50°の範囲である。したがって、ボーイング747用のアンテナはこの範囲をカバーするように配置すればよい。アンテナは第9図に示すように機体背面のcockpit後方にあるフェアリング内に設置す

第7図 円形パッチアンテナ

第6図 航空機地球局の構成

第8図 東京-アンカレッジ間での衛星方位、仰角の範囲

第9図 B 747用アンテナの配置

第10図 B 99用アンテナの配置

る。素子数は3個で、そのうち2個（ビーム1とビーム2）で機体の右斜め後方をカバーし、他の1個（ビーム3）で左斜め前方をカバーする。左端の素子はGPS受信用のアンテナである。

電航研の実験用航空機 B 99 は日本国内での実験に使用するが、日本国内における衛星仰角は $37 \sim 50^\circ$ の範囲である。また、機体に対する衛星方位は飛行経路により 360° 変化する。したがって、B 99 用アンテナはできるだけ広い範囲の方位をカバーする必要がある。第10図に B 99 におけるアンテナ配置を示す。胴体の両側斜め上方にそれぞれ4素子のアンテナ、ノーズの部分に1素子のアンテナを配置し、これらを切り替えて機体後方の一部を除くほぼ上半球の範囲をカバーする。なお、胴体下部に擬似衛星用のアンテナを装

備する。

6. 実験内容

衛星を介して地上局と航空機を結ぶ回線の C/N_0 は $45 \sim 53 \text{ dB} \cdot \text{Hz}$ 程度であるが、これは一般公衆通信の C/N_0 に比べてかなり悪い。さらに本実験では、衛星仰角が低い場合に予想されるかなり大きなマルチパス（多重径路）フェージングの影響を回線条件に含める必要がある（アンカレッジでの衛星仰角は約 5° である）。これらのことを考慮して本実験では、低 C/N_0 とマルチパス・フェージングの悪条件の下でも実用になるシステムを開発することが重要な課題である。実験は昭和62年度夏期の ETS-V 打上げ後1.5～2年間行うが、おもな実験内容は以下のとおりである。

6.1 構成装置の基礎実験 航空・海岸地球局、航空機地球局および AMEX 等の各構成装置について、周波数対振幅特性、入出力特性、雑音特性、群遅延特性等を定期的に測定し、以下の実験の各種測定データの解析、評価の基礎資料とする。また、AMEX については衛星の食時に同様な測定を行い、食の影響を評価することも検討している。

6.2 音声伝送実験 低 C/N_0 に適用できるように、音声を低ビットレート (2.4 kbps) の線形予測符号化 (LPC) でデジタル変調して送受信実験を行う。 C/N_0 、衛星仰角、マルチパス条件等をパラメータとして音声明瞭度等の特性を測定する。なお、比較のためにアナログ変調方式 (NBFM) での音声送受信実験も行う。

6.3 データ伝送実験 PM (位相変調), BPSK (2 相位相偏位変調), PN-PSK (擬似雑音-位相偏位変調) 等のデータ変調方式で送受信実験を行い、 C/N_0 、衛星仰角、マルチパス条件等をパラメータとして、ビット誤り率、誤りパターン等の特性を測定する。 C/N_0 $45 \text{ dB} \cdot \text{Hz}$ でビット誤り率 1×10^{-5} を目標にしている。

6.4 測距、測位実験 衛星と多数の航空機・船舶間の距離を順次測定するポーリング方式で測距実験を行う。 C/N_0 、衛星仰角、マルチパス条件等をパラメータとして、測距精度、測距所要時間の特性を測定する。測距精度は 100 m rms を目標としている。また、ETS-V と地上に設置する擬似衛星を用いて模擬的な測位実験を行う。測位精度は 1 km (95% 誤差円半径) を目標にしている。これらの実験には、電航研が開発した位相の最大事後確率推定方式による測距装置⁸⁾を使用する。

今回の実験では、予算の関係から衛星位置の精密追

跡局を設置できないので、測距・測位の実験は、既知の地点を基準とした相対測距、相対測位の考え方で行う^{5,10)}。実験で得られた測距値、測位値は GPS、ロラン C 等の測位値と比較して精度を評価する。

6.5 電波伝搬実験 航空機より L バンド信号を送信し、地上局でマルチパスによる信号の遅延時間、ドブラ周波数等を測定してマルチパス・フェージングの特性を定量的に測定する。また、フェージングを受けた信号を後でシミュレーション用として利用できる形で記録する。C バンドについては、5 GHz 帯テレメトリの信号または C/C 折返し回線を利用してフェージング・データを収集する。

6.6 ATC デモンストレーション実験 将来の航空衛星システムを想定して、衛星による洋上航空交通管制 (ATC) のデモンストレーション実験を行う¹²⁾。飛行中の航空機と地上との間で航空管制用の音声メッセージ、データメッセージの送受信を行い、メッセージの明瞭度、誤り率、表示方法等を評価する。また、GPS 等による機上の測位データを地上に送る従属監視実験、および ETS-V と擬似衛星による測位を行う独立監視実験を行い、地上の CRT ディスプレイ上に航空機位置を表示し、測位精度やディスプレイの見やすさ等を評価する。

7. お わ り に

ETS-V を用いた航行援助実験計画について、実験システムの構成、各構成装置の内容、実験内容等について解説した。衛星を用いた航空機を対象とする通信、測距、測位等の実験は世界でも例が少なく、この実験の成果は日本国内のみならず、ICAO 等の国際機関を通して広く世界に貢献できるものと信じている。

最後に、本実験計画を遂行するに当たり、ご協力い

ただいた運輸省内をはじめ、郵政省、科学技術庁、宇宙開発事業団の関係各位に深く感謝するとともに、今後なおいっそうのご支援、ご協力をお願いする次第である。

参 考 文 献

- 1) 石出 明ほか：ETS-V を用いた航行援助実験計画 (その 1)、昭和 58 年度電子航法研究所研究発表会講演概要、1983, pp. 9-12.
- 2) 奈須英臣ほか：ETS-V を用いた航行援助実験計画 (その 2)、昭和 59 年度電子航法研究所研究発表会講演概要、1984, pp. 55-58.
- 3) 三垣充彦ほか：ETS-V を用いた航行援助実験計画 (その 3)、昭和 60 年度電子航法研究所研究発表会講演概要、1985, pp. 27-30.
- 4) 石出 明ほか：ETS-V を用いた航行援助実験計画 (その 4)、昭和 61 年度電子航法研究所研究発表会講演概要、1986, pp. 23-26.
- 5) 伊藤 憲ほか：ETS-V を用いた航行援助実験計画 (その 5)、昭和 61 年度電子航法研究所研究発表会講演概要、1986, pp. 27-30.
- 6) 星野尾一明ほか：ETS-V 搭載中継器 C バンド部地上試験モデル、昭和 60 年度電子航法研究所研究発表会講演概要、1985, pp. 31-34.
- 7) 藤田光紘ほか：ETS-V 搭載中継器 C バンド部の試験結果、昭和 61 年度電子航法研究所研究発表会講演概要、1986, pp. 31-34.
- 8) 星野尾一明：位相の最大事後確率推定方式による測距装置について、電子航法研究所報告, No. 34 (1981), pp. 19-36.
- 9) 石出 明：技術試験衛星 V 型 (ETS-V) を用いた航行援助実験計画について、第 22 回飛行機シンポジウム講演集、1984, pp. 170-173.
- 10) 伊藤 憲：ETS-V を用いた測距・測位実験計画、昭和 60 年度電子通信学会総合全国大会論文集、1985, pp. 7-231~232.
- 11) 新美賢治：ETS-V を用いる航行援助実験計画、昭和 61 年度電子通信学会総合全国大会論文集、1986, pp. 7-263~264.
- 12) 高橋 賢ほか：ETS-V による洋上管制実験計画、昭和 61 年度電子航法研究所研究発表会講演概要、1986, pp. 19-22.