

宇宙ステーション搭載用ルーターの開発

横山 恭[†] 近藤 眞弘[†] 檜原 弘樹[†] 伊藤剛^{††} 川又文男^{†††}

イーサネットインタフェース装置(EIU)は、国際宇宙ステーションの日本実験モジュール(JEM)「きぼう」に搭載され、宇宙ステーション内 LAN と地上設備 LAN を、衛星間通信システム(ICS)による衛星間通信を介して接続するための、Internet Protocol (IP) ネットワークルータ装置である。EIU は、海外を含めて初めての軌道上で動作する IP ネットワークルータ装置である。EIU の開発では、民生技術を追加評価して利用することにより、低コスト/短期開発を実現している。また、要求性能である 3Mbps を大きく上回るプロトコル変換性能を達成し、EIU を含むネットワーク環境で Telnet や FTP が問題なく動作することも確認した。

The Development of Space-born Router for the International Space Station

Yasushi YOKOYAMA[†], Masahiro KONDO[†], Hiroki HIHARA[†], Tsuyoshi ITO^{††}, and Fumio KAWAMATA^{†††}

Ethernet Interface Unit (EIU) is a network router that is loaded on Japanese Experiment Module (JEM, i.e. KIBOU in Japanese) of the International Space Station (ISS), which connects the LAN in the ISS and the LAN in the ground support station via inter-satellite communication. The EIU is the world first IP router working on orbit. Low cost and short development period is realized by using commercial technology with additional evaluation in the development of the EIU. Much higher protocol conversion speed performance than the requirement of 3Mbps has been achieved. Telnet, FTP, and other functions were verified to work correctly among the network environment including the EIU.

1. はじめに

イーサネットインタフェース装置(EIU)は、JEM 衛星間通信システム(ICS)に搭載される Internet Protocol (IP) ネットワークルータ装置である。国際宇宙ステーションには、実験機器のデータ通信のために、イーサネット規格 (ISO 8802-3 / IEEE Std 802.3) を採用したミッションデータ専用 LAN (=ペイロードイーサネット) が搭載される。

EIU は、宇宙ステーション上のペイロードイーサネット上に接続された実験装置やラップトップ PC と、地上 LAN に接続されたユーザ端末との間に対して、IP に準拠した双方向通信を提供する。このように、双方向通信

を可能にする IP ルーティング機能を有した宇宙機搭載用装置としては、EIU は海外を含めても初めての装置である。EIU の搭載により、地上ユーザ端末と宇宙ステーション内の実験装置をインターネット接続する事が可能となり、図 1 に示すインターネット環境を実現することが出来る。

本稿では、EIU の特徴、開発方式、評価結果について報告する。

2. EIU の特徴

EIU はペイロードイーサネットと ICS が提供するスペースリンクの双方に接続され、以下の様な特徴を有している。

- (1) JEM 衛星間通信システム(ICS)を利用して、ペイロードイーサネットと地上 LAN を接続し、フォワードリンク(地上→JEM)とリターンリンク(JEM→地上)の双方向のデータ通信を提供する。
- (2) インターネットプロトコルに準拠した UNIX 4.3BSD 相当の、IP パケットルーティング機能を有してい

[†]日本電気エンジニアリング(株)ワイヤレスネットワークス事業部第一宇宙技術部
1st Space Electronics Development Department, Wireless Networks Division, NEC Engineering, Ltd.

^{††}宇宙開発事業団
National Space Development Agency of Japan

^{†††}通信総合研究所
Communications Research Laboratory

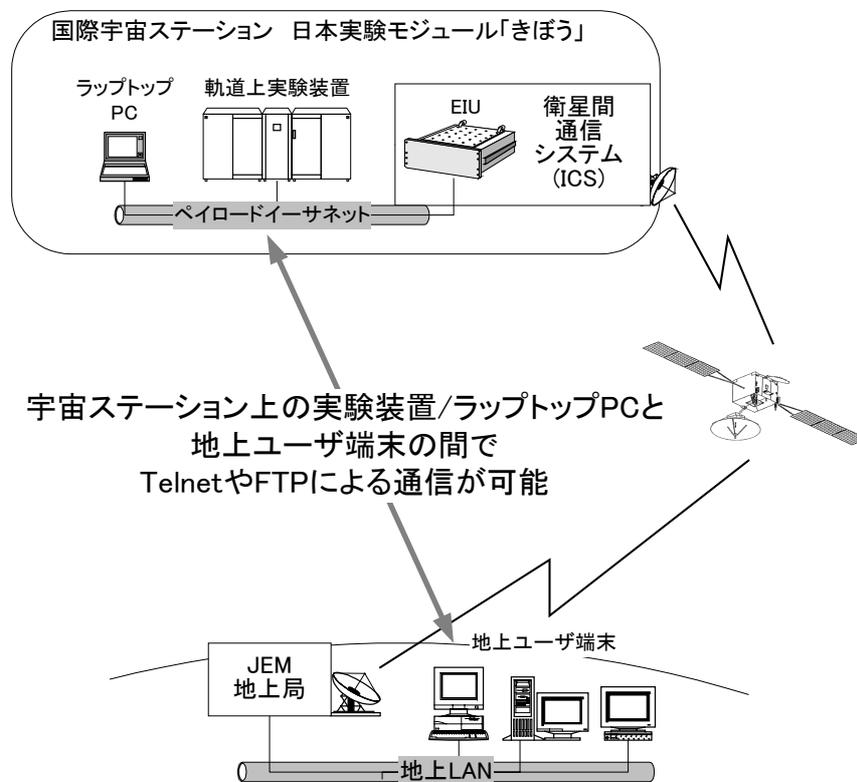


図 1 EIU の実現するインターネット環境

る。

- (3) ペイロードイーサネット上で通信される IP パケットと、衛星間通信で使用されるフォーマットとの変換機能を有しており、衛星間通信リンク上のデータとして送受信する機能を有している。

これらの特徴によって、地上 LAN に接続した各ユーザは、JEM 内の実験装置との間でインターネット接続を行うことができ、TCP/IP 上で動作するアプリケーション (FTP, Telnet, etc.) を利用して、地上のインターネットを利用した場合と変わらないデータ通信を行うことができる。EIU の主要諸元を表 1 に示す。

3. 開発方式

3.1. 従来の宇宙機搭載機器開発の問題点

EIU のもう一つの特徴として、従来の宇宙搭載機器とは異なった開発方式があげられる。従来、宇宙機搭載機器の開発は、デバイス技術や新規技術に対する

評価を順々に行って行く方式を採用している。このため、開発コストの制限から機能が削減されることもあり、開発期間が長くなることもあって、機器完成時には地上民生技術に比べて遅れた技術となることが多い。

表 1 EIU 主要諸元

項目	内容
ルーティング機能	UNIX 4.3BSD 相当、地上→JEM と JEM→地上の双方向に対応
CPU 性能	PowerPC603e (100MHz) RAM: 32MB, ROM: 10MB
伝送処理レート	3Mbps 以上 (双方向合計)
Ethernet I/F	ISO 8802-3 Type10BASE-T 準拠
形状	560mm×480mm×177mm
重量	20.8kg 以下
消費電力	43W 以下

EIU の開発においては、最新のネットワーク技術の宇宙機への搭載を実現するために、以下に示すような開発手順を採用している。

3.2. 既開発(民生/軍用)技術の流用

IP ルーティング技術は、地上では一般的な技術であるが、宇宙機搭載機器としては全く新規な技術である。このため、下記に示すような解決すべき課題が存在していた。

- (1) 「CPU 能力の課題」: 実用的な性能を有するルーティング装置を実現するためには、地上のワークステーション程度(数 10~100MIPS)の処理能力が必要となる。しかしながら、宇宙用として十分評価され、実績がある CPU は数 MIPS 程度の処理能力しかない。
- (2) 「ソフトウェア開発上の課題」: IP ルーティング装置は、上記の高処理能力を有する CPU の上で、高機能なソフトウェア処理(MAC 処理、IP 処理、ルーティング処理)を行う必要がある。専用 CPU の上でこれらの処理をおこなうソフトウェアを、全く新規から開発するには多くの時間を要する。

これらの課題を解決するために、軍用および民生用として開発された技術を、宇宙機搭載用として採用するために、以降に示すような追加評価を行って使用する手法を採用した。

3.3. 航空機搭載用 CPU ボードの採用

EIU の開発では、既設計量産品、いわゆる Commercial Off-The-Shelf (COTS)の利用によって、3.2 項(1)の問題点「CPU 能力の課題」を解決している。EIU では、軍用に開発された VME 規格の航空機搭載用 CPU ボードを採用した。EIU に採用した CPU ボードの諸元を表 2 に示す。

表 2 CPU ボード諸元

項目	内容
名称	DMV-177
製造業者	DY4 社(Canada)
CPU	PowerPC 603e (100MHz)
メモリ	RAM: 32MB、ROM: 10MB

採用したボードは、航空機搭載用として開発されているため、機械的/熱的な耐環境性は宇宙機搭載用としての要求を満足できる。しかしながら、宇宙機、特に

宇宙ステーションに搭載するためには、幾つかの追加検討が必要となる。EIU では、以下に示す追加評価および検討を実施して、宇宙ステーションに搭載することが可能であることを確認した。

3.3.1. 耐放射線評価

航空機搭載用と宇宙機搭載用で大きく異なる点に、放射線環境の違いがあげられる。EIU では、まず CPU ボードの選定時に、プロセス的に放射線耐性が高い CPU を使用しているボードを採用した。また、メモリについても、メモリエラーの修正機能(EDAC: Error Detect and Correct)を有するボードを採用している。これによって、軌道上に存在する高エネルギー粒子によるメモリ内容の反転、いわゆるシングルイベントアップセットによるソフトウェア暴走の発生確率を、大きく軽減することが出来る。

これらの検討は、NASA が後日に実施した評価試験でも実機確認されており、開発当初の選定が正しかったことが裏付けられている。また、個々のデバイスに対しても、類似プロセスのデバイスのデータを入手し、宇宙ステーションで要求されている総放射線被曝量(トータルドーズ)に対して、ミッション期間終了まで機能性能を満足することを確認している。

3.3.2. 安全性評価

宇宙ステーションは有人宇宙機であるため、搭載する上での安全性に対する要求が厳しいものとなっている。EIU についても、同等の要求が課せられているが、これらについても追加の評価と対策を行っている。まず、人体に影響を与えるオフガス特性については、宇宙開発事業団の設備を利用して、オフガス試験を実施して、人体に有害なガスが発生しないことを確認した。また、火災については、「機器の密閉」、「内部温度モニタ機能」および「サーモスタットによる自動電源遮断機能」の3重の対策により、故障等による過熱が発生した場合でも、着火および延焼が起こらないように考慮された設計となっている。

3.3.3. 湿度対策

湿度によるデバイスパッケージの劣化は、地上装置においても重要な事象であるが、長期間(約 10 年)の運用を前提としている宇宙ステーションでは、さらに慎重な検討が必要である。EIU に採用した CPU ボードでは、耐湿性コーティングによる対策を実施している。EIU では更に、ボード製造業者のコーティングプロセスについても立ち入った調査を行い、コーティング作業中に水分の混入が発生し得ない条件であることを確認した。

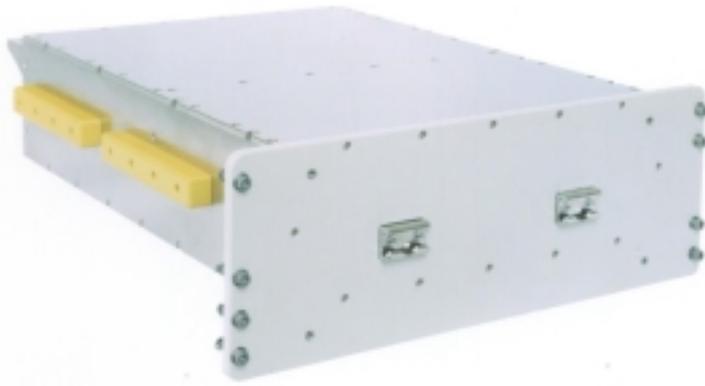


図 2 EIU 外観図

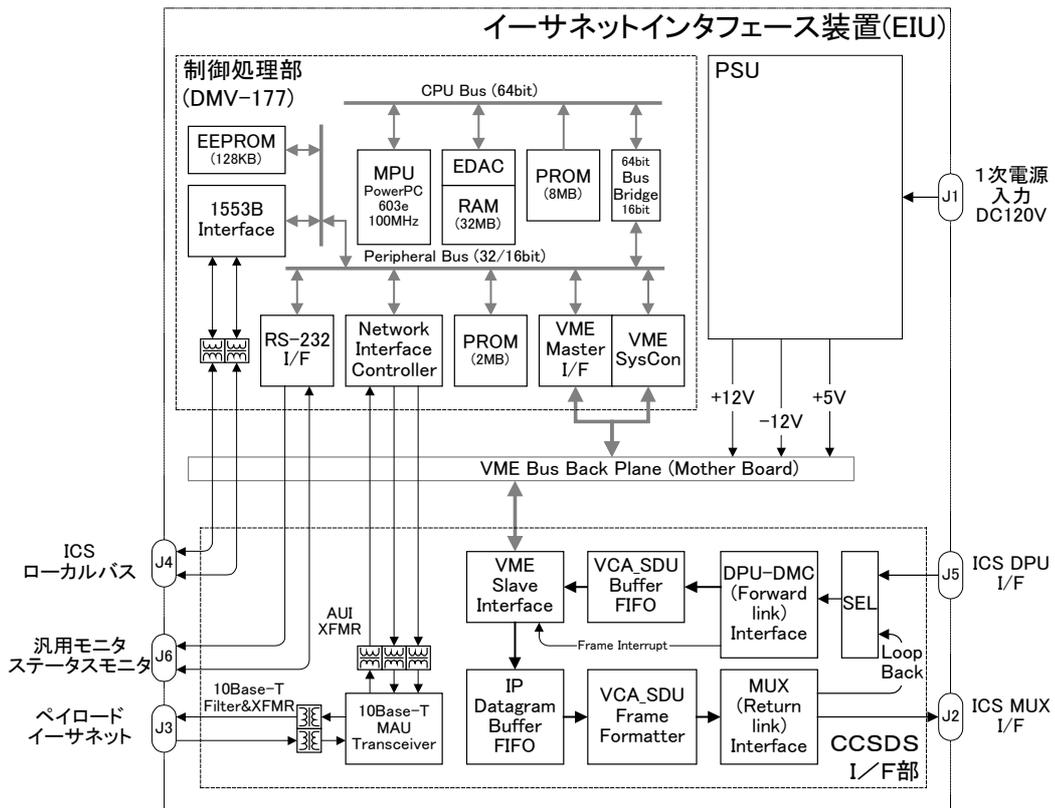


図 3 EIU 機能ブロック図

3.3.4. 高機能 OS の採用

ソフトウェア開発においては、民生品の高機能リアルタイム OS を使用する事によって、3.2 項(2)の問題点「ソフトウェア開発上の課題」を解決している。

具体的には、EIU では VxWorks を採用した。VxWorks は、ネットワークに対応したリアルタイム OS であるため、TCP/IP に関連したプロトコル処理については、OS 自身の機能を利用して開発することが出来る。従って、EIU のファームウェアについては、EIU に固有の処理(衛星間通信インタフェースドライバ、衛星間通信～IP プロトコル変換処理、テレメトリ・コマンド処理等)のみを新規に開発すれば良いことになり、大幅に開発要素を削減することができた。これにより、ソフトウェアの開発期間と開発コストを、従来の搭載ソフトウェアと比較して半分以下に低減することができた。

4. 開発結果

4.1. 開発結果概要

今回開発した EIU の外観図を図 2 に示す。また、EIU の機能ブロック図を図 3 に示す。

4.2. 性能評価結果

EIU の処理性能レートを測定した結果を図 4 に示す。評価は、地上→軌道上方向(FWD)のデータと、軌道上→地上方向(RTN)のデータを同時に流した場合の、正常にデータ伝送されたデータ量を測定することで行っ

た。図 4 に示すように、総データ処理量は最大で 4.5Mbps 以上であり、上位システムからの要求仕様値である 3Mbps を大きく上回っていることが確認された。

また、EIU で接続されたネットワーク間でのアプリケーションの評価試験において、Telnet による遠隔端末が正常に動作することを確認した。また、FTP により 10MByte のファイル転送を行い、FWD 方向で 39 秒(2Mbps)、RTN 方向で 31 秒(2.6Mbps)で完了することを確認した。

5. おわりに

JEM 搭載機器に対して、インターネットを利用してアクセス可能になることについては、ユーザから大きな期待を寄せられている。特に、実験装置ユーザにとっては、地上結果との対比実験を行う際に、地上で利用しているアプリケーションを、そのまま JEM 機器に利用できるメリットは大きい。EIU の開発は、このような形態での宇宙ステーション利用を実現するという点で、非常に大きな意味を有している。また、地上では不可欠な技術となったインターネット技術を、宇宙機への拡張する上での鍵となる装置を、海外に先駆けて開発した点も重要であると考える。今後は上記の点も踏まえて、EIU を含めた総合的なインターネット環境における、様々なアプリケーションの動作性能を評価し、更なる利用可能性を探っていく予定である。

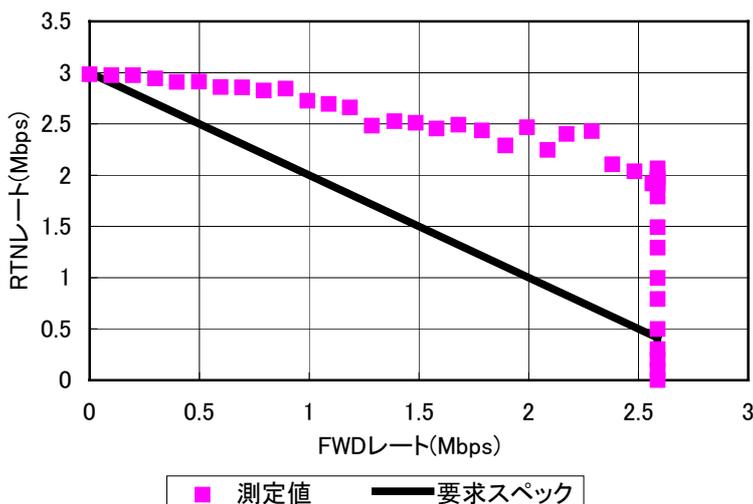


図 4 双方向処理時の伝送処理レート