

澁谷幸司* 明星慶洋*
小田木 功**
山岸圭太郎*

人工衛星向け高速デジタル伝送技術

High-speed Digital Transmission Technologies for Artificial Satellites

Koji Shibuya, Isao Odagi, Keitaro Yamagishi, Yoshihiro Akeboshi

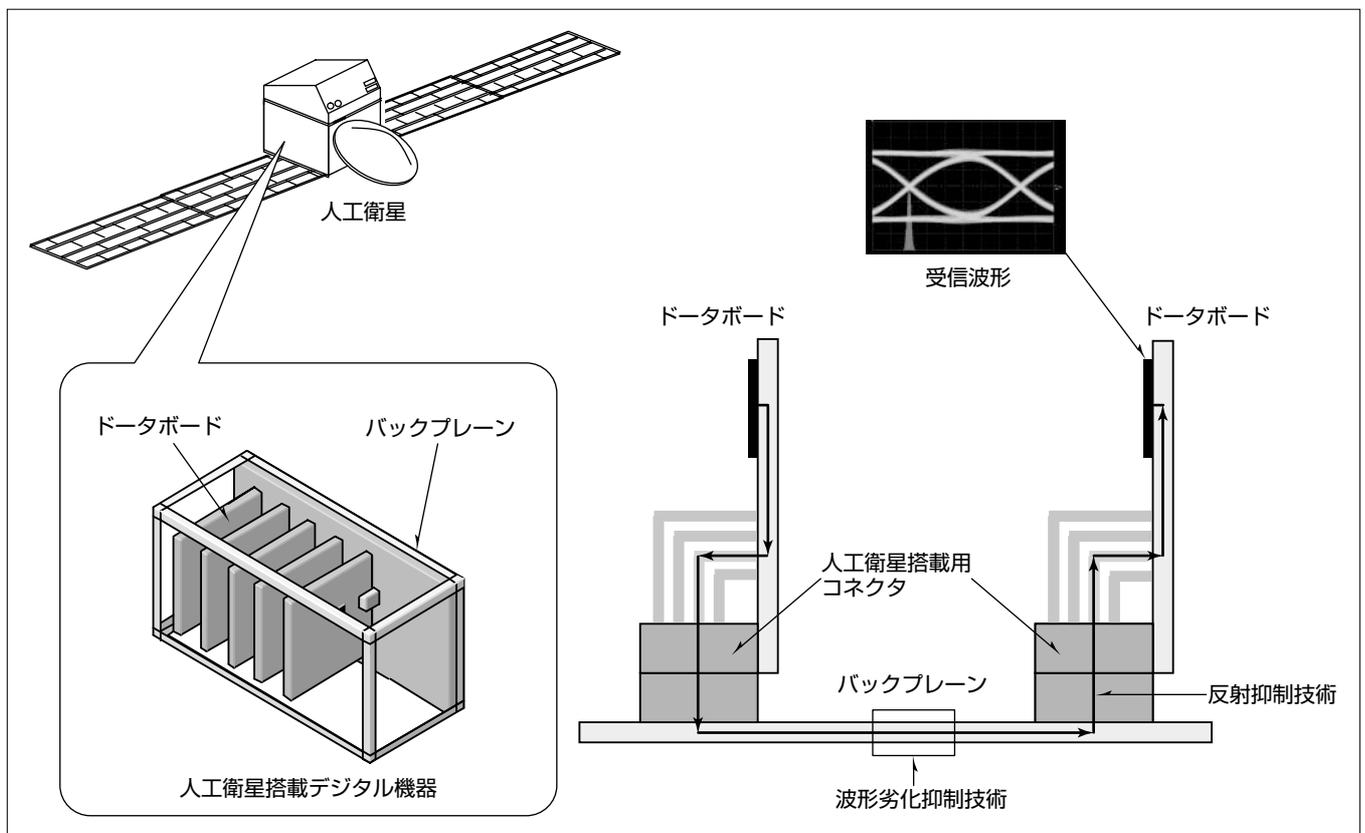
要 旨

人工衛星搭載機器における機器間通信として、データ伝送レート200Mbps程度のシリアル伝送通信が用いられている。ところが近年、高解像度センサなどの搭載機器で扱う情報量が増大しており、更なる伝送レートの向上が予想される。また、現在は機器間の接続としてケーブルを用いた伝送が主に検討されているが、機器の小型化、高集積化などの目的で、バックプレーンシステムへの移行が必要になるとも予想される。すなわち、高速かつ人工衛星で使用可能なバックプレーンシステムの開発が必要になる。

バックプレーンシステムを構成する上で、キーとなるのがバックプレーンとドータボードを接続する基板間コネクタである。人工衛星に搭載されるデジタル機器に用いる基

板間コネクタは、厳しい使用環境条件を満たす必要がある。地上用途では、10Gbps級の伝送が可能な高性能なコネクタが開発されているが、人工衛星搭載用としての認定はされておらず、そのままの採用は難しい。一方、人工衛星搭載用コネクタは、高速信号伝送を考慮した設計とはなっていないため、人工衛星用機器の信号高速化の妨げとなる。

本稿では、このような人工衛星搭載用コネクタで、Gbps級高速信号伝送を実現するための解決策について述べる。人工衛星搭載用コネクタの伝送特性を評価し、ピンアサインの最適化による反射抑制技術と、パッシブ素子及び伝送路で構成した波形補償回路による波形劣化抑制技術を適用して、数Gbpsクラスの信号伝送が可能であることを示す。



人工衛星向け高速デジタル伝送技術を適用したバックプレーンシステム

人工衛星搭載機器における機器間通信は、近年の高解像度センサなどの搭載機器で扱う情報量の増大、及び機器の小型化・高集積化等の要請で、数Gbps級のシリアルデータ通信を用いたバックプレーンシステムの開発が必要になる。人工衛星搭載機器は地上機器と比べて、制限が厳しく、高速伝送の観点では不利な条件となっているが、この技術を適用することによって、人工衛星搭載機器でも高速伝送を実現することができる。

1. ま え が き

人工衛星搭載機器における機器間通信として、データ伝送レート200Mbps程度のシリアル伝送通信が用いられている。ところが近年、高解像度センサなどの搭載機器で扱う情報量が増大しており、更なる伝送レートの向上が予想される。また、現在は機器間の接続としてケーブルを用いた伝送が主に検討されているが、機器の小型化、高集積化などの目的で、バックプレーンシステムへの移行が必要になるとも予想される。すなわち、高速かつ人工衛星で使用可能なバックプレーンシステムの開発が必要になる。

本稿では、従来200Mbps程度で運用されてきた人工衛星搭載機器で、6.25Gbps級高速信号の伝送を実現するための技術を示す⁽¹⁾⁽²⁾。まず2章で、人工衛星向け高速デジタル伝送技術の課題について述べる。そして、人工衛星搭載用コネクタの伝送特性を評価し、ピンアサインごとに伝送特性が大きく異なることを示すとともに、伝送上最適なピンアサインを決定する。3章では、最適なピンアサインを採用し、さらにパッシブ素子と伝送路で構成した波形補償回路を適用することで6.25Gbpsの高速信号伝送が可能であることをシミュレーションと実測によって示す。

2. 人工衛星向け高速デジタル伝送技術

2.1 人工衛星向け高速デジタル伝送の課題と対策

Gbps級のバックプレーンシステムを構成する上で特に課題となるのが、バックプレーンとドータボードを接続する人工衛星搭載用コネクタのインピーダンス不整合、及び配線の損失である⁽³⁾。特にコネクタの課題は人工衛星搭載機器特有であり、この章で詳しく述べる。配線損失の課題に対しては、波形補償回路によって影響を低減する。

2.2 コネクタの伝送特性

インピーダンス不整合が生じると、信号の反射によって伝送波形に歪(ひず)みが生じる。このため、高速信号伝送では、伝送路のインピーダンスを可能な限り整合させる必要がある。人工衛星に用いる基板間コネクタは、厳しい使用環境条件を満たさなければならない。地上用途では、10Gbps級の伝送が可能な高性能なコネクタが開発されているが、人工衛星搭載用としての認定はされておらず、そのままでの採用は難しい。一方、人工衛星搭載用コネクタは、高速信号伝送を考慮した設計とはなっていないため、人工衛星用機器の信号高速化の妨げになっている。高速信号伝送向けに設計されたコネクタでは、メーカーから指定されたピンの組合せを差動対としてアサインすることで、差動特性インピーダンスが保障される。

これに対し、人工衛星搭載向けのように高速信号伝送が考慮されていないコネクタは、インピーダンスコントロールがなされておらず、ピンごとに電気的な条件が異なるた

め、ピンアサインによってインピーダンスが異なることが予想される。さらに、コネクタは配線と異なり立体構造物であるため、伝送特性の見極めが容易ではない。そこでこの研究では、コネクタの伝送特性を評価する基板を製作し実測評価することによって、伝送上最適なピンアサインを決定した。

2.3 コネクタ評価基板

図1にコネクタ評価基板の構成とピンアサインを示す。評価基板は、バックプレーン及びドータボードを模擬した2枚の基板で構成している。それぞれに人工衛星搭載用コネクタ及び測定用のSMA(SubMiniature version A)コネクタを実装している。今回評価した人工衛星搭載用コネクタは、信号ピンを4列備えており、バックプレーン側はストレート型のレセプタクル、ドータボード側はライトアングル型のプラグである。

図中のAからCは伝送特性評価用ピンアサインの代表例である。灰色の丸が差動信号ペア、黒丸及び白丸がGND(GrouND)ピンである。ピンアサインA、Bは差動ペアの間にGNDピンをアサインしており、Cは差動ペアを隣接させている。ピンアサインA/Cはドータボード基板に近いピン長が最も短くなる。反対にBはピン長が最も長くなる。

2.4 コネクタ評価

伝送レートがGbpsを超える高速伝送では、差動信号が用いられる。差動信号の伝送特性は、Mixed-Mode Sパラメータ⁽⁴⁾と呼ばれる指標によって評価される。Mixed-Mode Sパラメータは、通常のSパラメータを数値的に変換することによって得られる。この評価でもMixed-Mode Sパラメータを指標として採用した。図2にコネクタの周波数特性評価の構成を示す。4ポートネットワークアナライザに

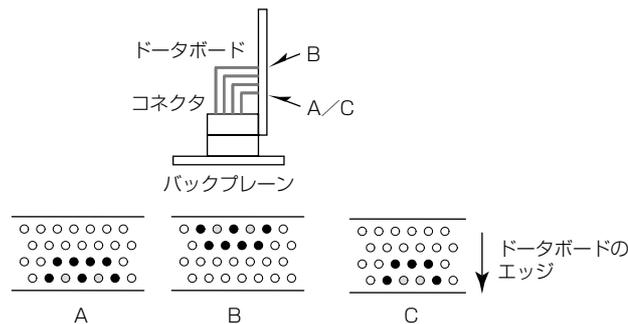


図1. コネクタ評価基板とピンアサイン

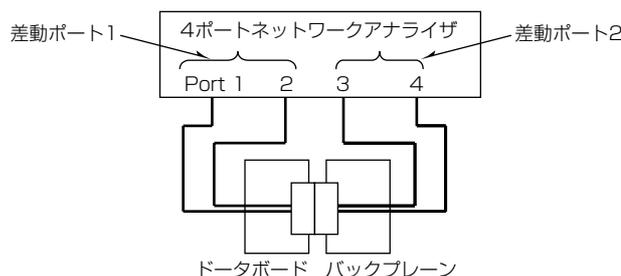


図2. 周波数特性評価の構成

Port1及びPort 2を差動ポート1, Port 3及びPort 4を差動ポート2となるように接続し, AからCのピンアサインに対してMixed-Mode Sパラメータを測定した。

測定結果を図3から図5に示す。図の横軸は周波数, 縦軸はSパラメータの大きさをデシベル表記で表している。図3及び図5の縦軸Sdd11は差動ポート1での反射量で, 小さいほどインピーダンス不整合による反射が小さく, 特性が良いことを意味する。図4のSdd21は差動ポート1から2への透過量で, 大きいほど特性が良い。図3, 図4から, 特に1GHz以降の周波数において, 伝送特性の差が大きくなることが確認できる。コネクタの信号ピン長と伝送特性は相関があり, ピン長が最長となるピンアサインBが伝送特性が最も悪くなる。逆に最短となるピンアサインA

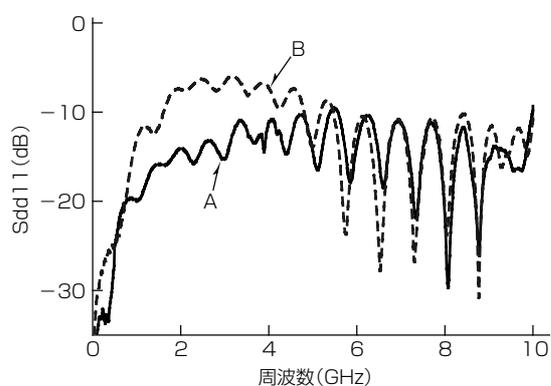


図3. コネクタの反射特性(A, B)

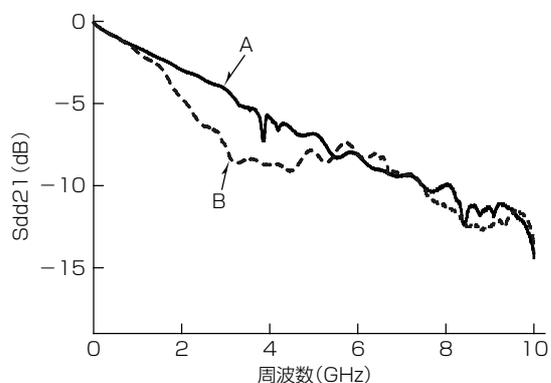


図4. コネクタの通過特性(A, B)

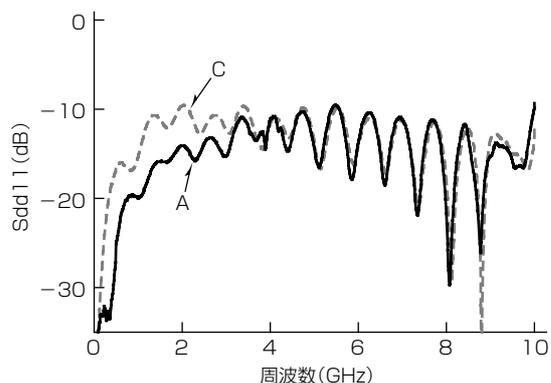


図5. コネクタの反射特性(A, C)

とすることによって, 3GHzにおける通過特性が3.5dB改善される。ピンアサインCのピン長はAと同じであり, グラフには示していないが, 通過特性もAに近く, ほぼ同等の結果であった。一方, 図5の反射特性に注目すると, 差が明確に現れており, CよりもAの方が反射が小さくなっている。これらの評価結果から, 今回評価した人工衛星搭載用コネクタを経由して数Gbpsの高速デジタル信号を送らせる場合, ピンアサインAが最適である。

3. バックプレーン伝送評価

3.1 試作バックプレーンシステム

2章でGbps伝送を実現する上で最適なピンアサインを明らかにした。このピンアサインを用いることによって, 実際にバックプレーン伝送が可能であるかの検証のため, バックプレーンシステムを試作した。図6にその構成を示す。データ伝送レートは6.25Gbps, ピンアサインはAを採用し, 配線長は30cm, バックプレーン上に集中定数素子と伝送路からなるパッシブの波形補償回路を備えている。この波形補償回路は, 低い周波数ほど損失が大きくなるように設計されている。高い周波数ほど損失が大きくなる配線損失と合わせると, 全体の周波数特性が平坦化し, 波形劣化が抑制される。ドータボードの片側にオシロスコープを同軸ケーブルを介して接続している。別の片端には信号源としてパルスパターンジェネレータを接続している。この構成によって, 伝送波形を評価する。同時に, この構成を模擬したシミュレーションも実施し, 実測と比較を行う。伝送系のブロック図を図7に示す。

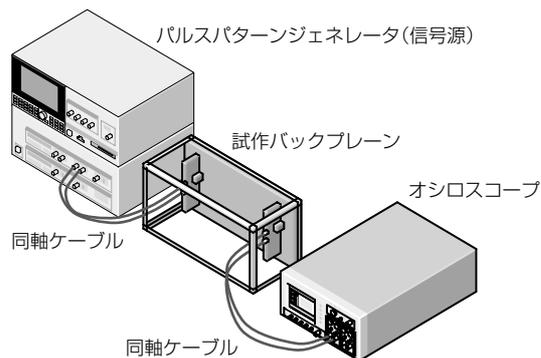


図6. バックプレーン伝送評価の構成

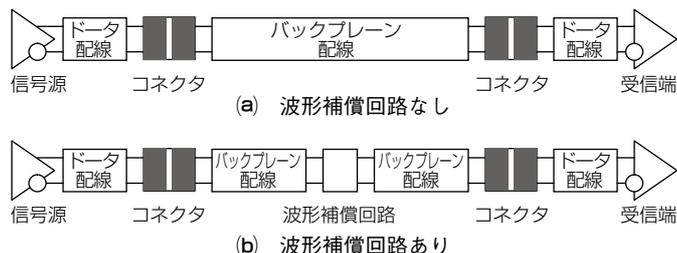


図7. 伝送系ブロック図

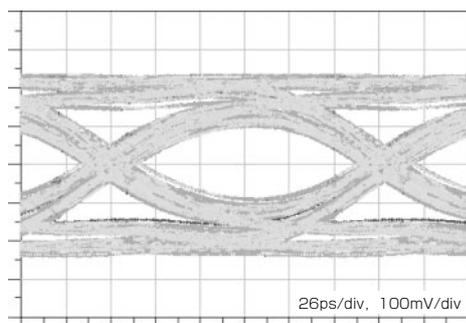


図8. 受信波形のシミュレーション(波形補償回路なし)

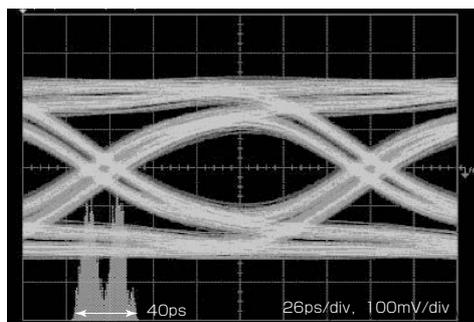


図10. 受信波形の実測(波形補償回路なし)

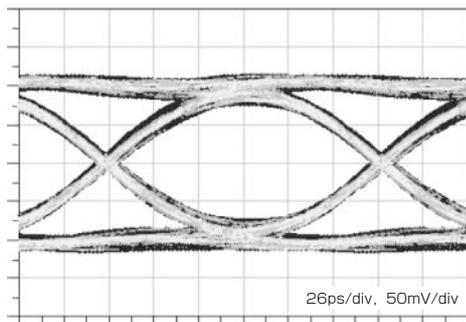


図9. 受信波形のシミュレーション(波形補償回路あり)

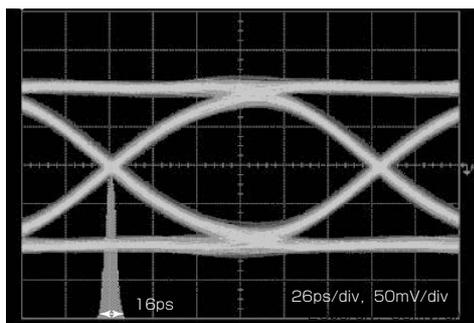


図11. 伝送波形の実測(波形補償回路あり)

伝送波形シミュレーションを実施するには、伝送路上の各要素を高精度にモデル化する必要がある。しかし、高速伝送向けではない部品は、メーカーから解析モデルが提供されなかったり、高周波まで対応していない場合が多い。その場合はユーザー側でモデル化を行わなければならない。この解析では、人工衛星搭載用コネクタについて、2章で示した測定結果からコネクタ部分の等価回路モデルを抽出することによってモデル化を行った。

3.2 伝送波形の評価

図8、図9がシミュレーション結果、図10、図11が実測波形である。図9及び図11は波形補償回路がある場合の波形である。各グラフの横軸は時間、縦軸は差動電圧である。これらの波形はアイパターンと呼ばれており、中央部の開口が大きいほど良好な伝送波形となる。

図10の波形から、波形補償回路を適用しない場合でも、十分に中央の開口が確保されており良好な波形となることが確認できる。波形補償回路を適用すると、更にジッタが約24ps削減される。シミュレーション波形については、実測の波形とはほぼ一致しており、モデル化が十分高精度であることを確認できる。今後は、今回作成した解析モデルを用いることで、シミュレーションベースの検討、又は設計が可能となる。

4. む す び

人工衛星向け高速デジタル伝送技術について述べた。一般に人工衛星搭載用コネクタは高速伝送を考慮した設計と

はなっておらず、高速デジタル伝送を実現する上での課題となっている。ピンアサインごとの伝送特性を評価し、最適なピンアサインを採用するとともに、波形補償回路を用いることによって、6.25Gbpsのバックプレーン伝送で良好な信号伝送を達成可能であることを、シミュレーションと実測によって確認した。人工衛星搭載機器は地上機器と比べて、制限が厳しく、高速伝送の観点では不利な条件となっている。しかし、評価、解析、回路、実装といった各要素技術を駆使することによって、人工衛星搭載機器でも、数Gbpsクラスの高速度伝送が実現可能である。

参 考 文 献

- (1) Shibuya, K., et al.: Evaluation and Analysis of Connector Performance for the SpaceWire Back Plane, International SpaceWire Conference 2008, 83~86 (2008)
- (2) Nakamura, M., et al.: SpaceWire Backplane with High Speed Spacefibre Link, International SpaceWire Conference 2010, 163~166 (2010)
- (3) Johnson, H.: High-Speed Signal Propagation, Prentice Hall (2003)
- (4) Bockelman, D. E., et al.: Combined Differential and Common-Mode Scattering Parameters, IEEE Trans. Microwave Theory and Tech., 43, No.7, 1530~1539 (1995)