

大学の研究・動向

衛星通信アクセス系における大容量データ伝送実験

情報学研究科 通信情報システム専攻 通信システム工学講座・伝送メディア分野

教授 森 広 芳 照

morihiro@i.kyoto-u.ac.jp

助教授 田 野 哲

denno@i.kyoto-u.ac.jp

助手 梅 原 大 祐

umehara@i.kyoto-u.ac.jp

1. はじめに

高速通信回線、いわゆる「ブロードバンド」の普及に伴い、エンドユーザにおいても数Mbps～100Mbpsの回線速度が確保できるようになってきている。データが流れる通信回線は、各種の伝送メディアにより構成される。これらの伝送メディアは、光ファイバー、同軸ケーブル、平衡ケーブル、無線などがキャリアの目的やユーザの用途に合わせて用いられている。当研究室では、ユーザが利用しやすい通信システムの構築を目指して、様々な伝送メディアの特性解析、伝送メディアに適合する通信方式、異なる伝送メディア間の統合に関する研究を行っている。

本稿では、これらの研究のうち、大容量データを伝送するための衛星通信アクセス系に関する研究について紹介する。この研究は、ギガビットネットワーク利活用研究開発制度の研究開発課題「宇宙科学観測のための超高速ネットワークに関する研究開発」(研究期間：平成11～13年度)の一環として行われた。

2. 大容量データ伝送のための衛星通信アクセス系

自然科学のあらゆる領域において、科学データの量は膨大になりつつある。例えば、岡山県南西部の美星町にある宇宙デブリの光学観測施設では、データが平均して1ヶ月2TB（テラバイト）程度出力されると見積もられている。このような大量の観測データを、遠隔の研究施設で処理・解析するためには、観測施設を光ファイバーによる高速ネットワークに収容する必要がある。しかしながら、観測施設は一般に電波や光の背景雑音が少ない山奥などの僻地に建設されるため、高速ネットワークへの有線アクセス系の敷設が困難な場合が多い。そこで、高速ネットワークへのアクセス系として通信衛星を利用した宇宙科学観測用システムの研究開発を京都大学情報学研究科通信情報システム専攻超高速信号処理分野、大阪工業大学、財団法人日本宇宙フォーラムと分担して行った。

宇宙科学観測用システムの想定構成を図1に示す。対象となった観測施設は、岡山県北部の上斎原スペースガードセンターと同県南西部の美星スペースガードセンターである。これらの観測施設を日本の高速ネットワークであるJGN（Japan Gigabit Network）に収容するためのアクセス系として衛星回線を利用し、大容量の観測データを観測施設から各地の研究施設に伝送するシステムの実現方法について検討を行った。衛星回線としては、広い周波数帯域が利用可能な、すなわち、高速通信が可能なKaバンドを利用した。Kaバンドは送信周波数が30GHz帯、受信周波数が20GHz帯である。通信衛星は、JSAT（株）と（株）NTTドコモが共同保有する通信衛星N-STAR a号機を使用した。研究開発は、衛星通信アクセス系、データ伝送方式及びネットワークの利用に関して行った。当研究室で

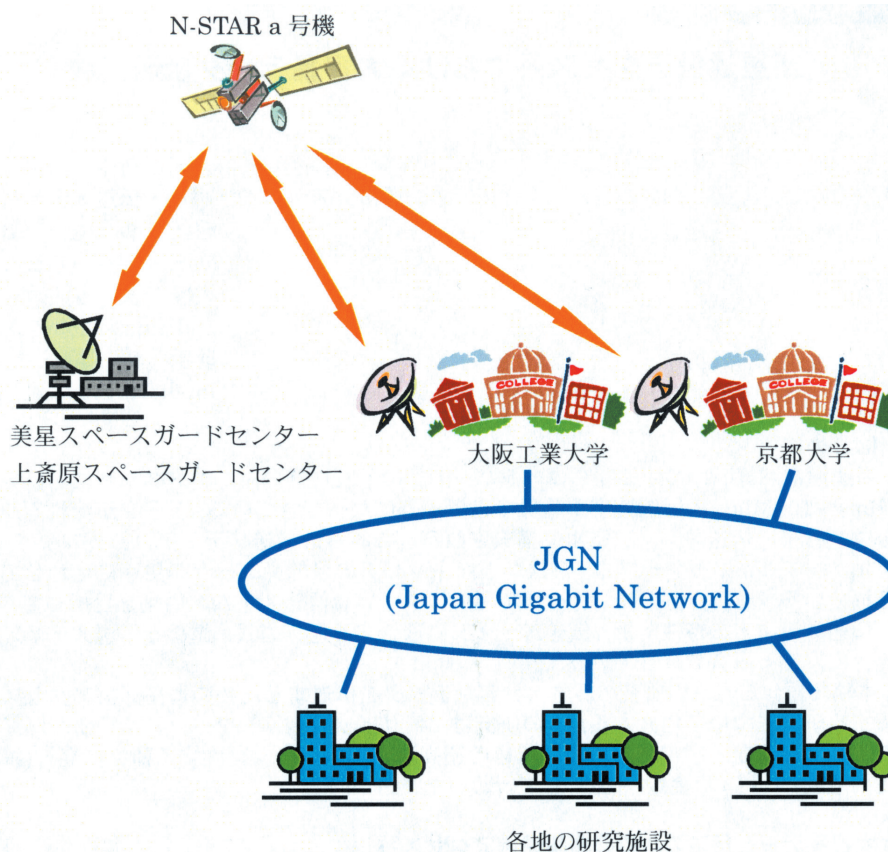


図1. 宇宙科学観測用システムの想定構成

は、主にJGNに收容するための衛星通信アクセス系に関する研究開発を担当し、衛星通信アクセス系の実験システムの構築及び衛星通信アクセス系の伝送特性の解析を行った。以降では、その検討内容に関して述べる。

3. 実験システムの構築

京都大学に送受信地球局、大阪工業大学に受信専用地球局を導入した。京都大学に設置した送受信地球局の諸元を表1に、屋外ユニットの概観を図2に示す。送受信地球局の屋外ユニットは工学部3号館南館屋上に設置し、屋内ユニットは同館のS401号室に設置した。従来、高周波数帯を利用するKaバンドでは降雨減衰に対するマージンの確保が重要な課題であったが、この衛星通信アクセス系では可搬性を考慮して地球局の小型化を優先し、降雨マージンは最小限に設定している。通信衛星の中継器はN-STAR a号機のマルチビーム中継器を利用した。さらに、構築した衛星通信アクセス系をJGNへと收容し、京都大学と大阪工業大学との間にJGNの通信回線を通信・放送機構けいはんな情報通信研究開発センター経由で設定した。これにより、京都大学と大阪工業大学間で、衛星回線及びJGN回線の接続が確立された。

衛星通信アクセス系の実証試験の一環として、2001年10月に衛星回線及びJGN回線を用いて、京都大学と通信・放送機構けいはんな情報通信研究開発センターとの間でMPEG2を利用したテレビ会議実験を行った。大学とセンター間の回線は、衛星回線経由ありと経由なしの2通りの回線を設定した。このテレビ会議実験は、IT教育に積極的に取り組んでいる京都市立紫野高校が生徒の進路指導の一環として企画し、センター側の被験者は同高校生、大学側の被験者は同高校の卒業生を含む大学生であった。この実験時の大学側およびセンター側の様子を図3に示す。被験者は、衛星回線経由あり

と経由なしの映像・音声を同時に比べることにより、36,000km 離れた通信衛星経由であっても映像・音声品質が同等であることや衛星通信経由ありと経由なしの間の距離差が映像・音声の遅延として現れることを体感した。このテレビ会議実験により、本実験システムを通信技術の啓蒙活動に役立てることができた。

表1. 地球局の諸元

項目	仕様
送受信周波数	29.505～30.425/18.505～19.425GHz
アンテナ	オフセットパラボラ (開口径1.2m)
最大送信出力	40W
受信雑音温度	200K
変調方式	QPSK
誤り訂正方式	外符号：リードソロモン (208, 188) 内符号：畳み込み符号/ビタビ復号
データ速度	符号化率 (1/2, 2/3, 7/8) 1.5Mbps～60Mbps



図2. 屋外ユニットの概観



図3. テレビ会議実験の様子 (左:京都大学, 右:けいはんなセンター)

4. 大容量データ伝送のための通信プロトコル

衛星通信アクセス系において大容量データを信頼性高く伝送するための通信プロトコルとしては、地上ネットワークで広く用いられているTCP (Transmission Control Protocol) の利用が考えられる。そこで、TCPを用いて衛星回線経由でデータを伝送したときのスループットを測定した。京都大学に送受信のワークステーション2式を用意し、衛星折り返しの構成とした。このとき、送信端末の物理的な最大送信速度を14Mbpsとし、送信電力を調節することで複数のビット誤り率 (Bit Error Rate, BER) に対して測定を行った。BER=0の場合とBER=10⁻⁸の場合のスループット特性を図4に示す。TCPは、ネットワーク上でパケットが氾濫する輻輳を回避するために、ウィンドウサイズにてネットワーク上に流れるデータサイズを制限している。ウィンドウサイズをWnd[byte]、ラウンドトリップ時間をRTT[sec]とした場合、TCPの最大スループットの理論値Th_{max}[bps]は、Th_{max}=8×Wnd/RTTで与えられる。それ故、地上ネットワークに比較して大きいRTTを有する衛星回線では、最大スループットが大幅に制限される。地上ネットワークで一般的に使用されるウィンドウサイズの最大値は64kbyteであり、RTTが約500msecの衛星回線に適用すれば、その最大スループットは約1Mbpsとなる。実際に、図4よりウィンドウサイズが64kbyteのときの最大スループットが約1Mbps程度であることが確認される。このことから、地上ネットワークで利用されているTCPをそのまま

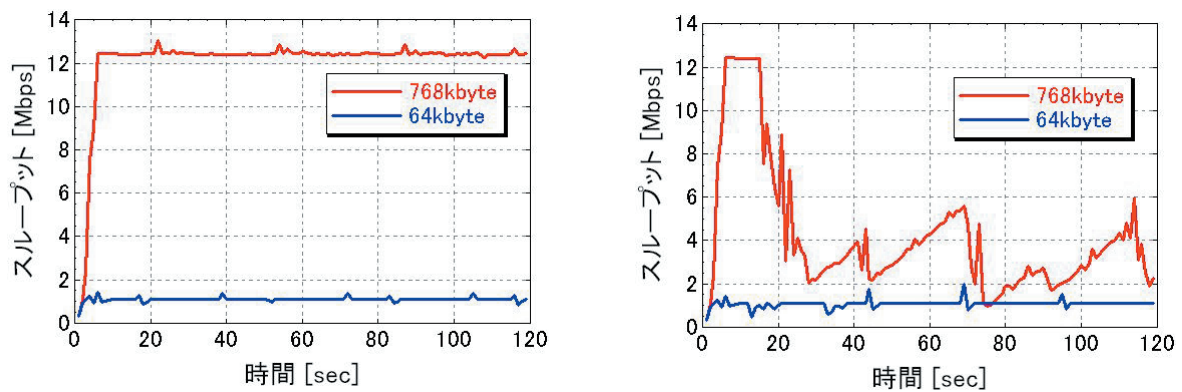


図4. TCPのスループットの時間変化 (左:BER=0, 右: BER=10⁻⁸)

衛星回線上で利用した場合、データの高速伝送ができないことが分かる。一方、TCPのウィンドウスケールオプションによりウィンドウサイズの上限值を約1Gbyteまで上げることが可能である。そこで、RTTが大きい衛星回線上でTCPを利用する場合には、このウィンドウサイズを上げることが有効であると考えられる。ウィンドウサイズを768kbyteとした場合のスループットを図4の赤線にて示している。この結果、BER=0では安定した高スループットを与えていることが分かる。しかしながら、BER=10⁻⁸ではパケットに誤りが生じたときに輻輳と推定されることが原因で、時間が経過すると低スループットに落ち着くことが分かる。

TCPでは、データの信頼性は得られるが、衛星通信アクセス系による大容量データ伝送の高速化には限界がある。また、降雨による信号減衰などが原因でデータ誤りが生じる場合に、TCPが持つ輻輳回避機能により必要以上に低スループットになる。そこで、UDP (User Datagram Protocol) を利用し、アプリケーション層で信頼性を保証したデータ転送プログラムを設計・作成した。このUDP転送プログラムには輻輳回避機能は実装しなかった。UDPデータ転送プログラムの特性評価のため、図5に示される3台のコンピュータを用いて衛星通信アクセス系をエミュレートするシステムを構築した。衛星回線エミュレータでは、帯域幅を46Mbpsに制限し、さらに248msecの遅延を発生させた。また、このエミュレータ上ではパケットロス率を設定できる。この衛星回線エミュレーションシステム上で、UDPデータ転送プログラムを用いて各BERに対するデータ伝送特性を測定した。100Mbyteのデータに対し、UDPパケット長を変更し、スループットの測定を行った。

図6に、TCP及びUDPデータ転送プログラムのそれぞれを用いた場合のBERに対する平均スループットを示す。TCPでは、ウィンドウサイズを上げることにより平均スループットが向上する。しかし、ウィンドウサイズが大きい場合、BERが大きくなるに従い、輻輳回避機能のため、平均スループットが急激に低下する。一方、UDPデータ転送プログラムでは、UDPパケット長を大きくした場合にスループットが改善される。特に、パケット損失が発生しない場合には、UDPパケット長と平均スループットは比例関係にあることが分かる。また、輻輳回避機能がないため、BERの上昇に伴う平均スループットの低下はTCPに比べて緩やかである。

衛星回線エミュレーションシステム上の実験結果より、TCPよりUDP転送プログラムが優れていることが分かる。衛星回線で利用するデータ転送プロトコルとして作成したUDP転送プログラムを用いて、外部のネ

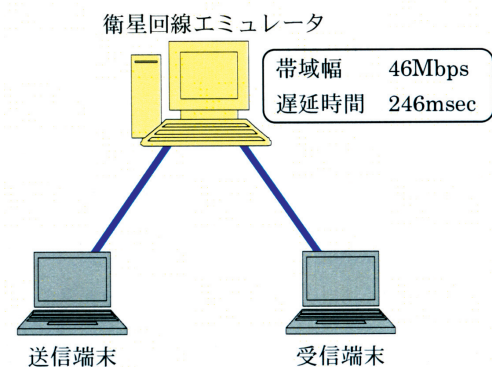


図5. 衛星回線エミュレーション構成図

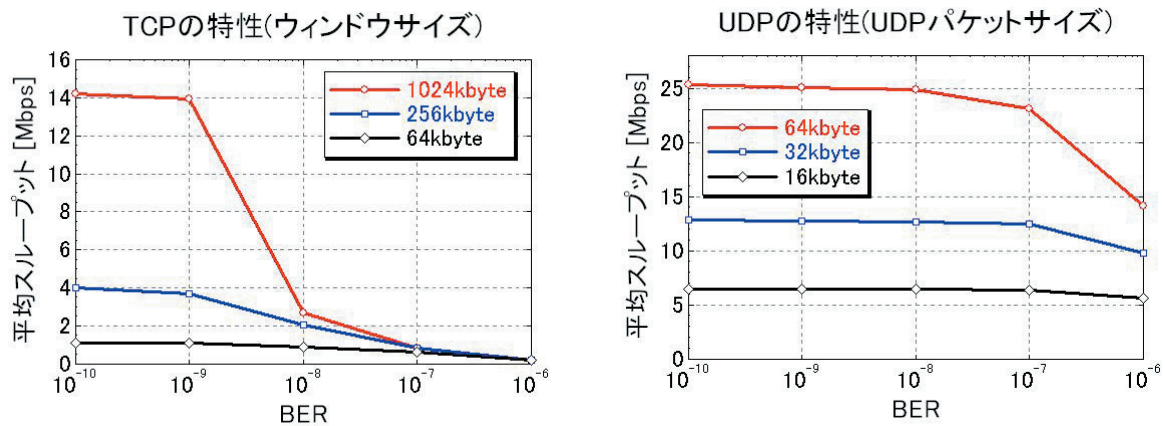


図6. BERに対するTCP (左) とUDP (右) のスループット特性

ネットワークで用いるデータ転送プロトコルであるTCPと分離すれば、衛星通信アクセス系において大容量データ伝送の高速化が図れる。

5. おわりに

大容量データを伝送するための衛星通信アクセス系に関する当研究室の取り組みを述べた。この取り組みの中で、衛星回線上にUDP転送プログラムを用いることにより、大容量データの高速化が図れることを示した。

これまで述べたように、本研究課題の終了時（平成14年3月）までの検討は、通信衛星を用いた1対1の大容量データ伝送が主たる対象であった。現在は、衛星通信の同報性を有効に活用したマルチキャスト通信による複数地点への高速データ伝送を目指して、Tornado符号などの研究を進めている。

最後に、本研究課題をとりまとめた立命館大学情報理工学部の川合誠教授（当時、当研究室助教授）をはじめ、通信・放送機構（現NICT）、日本電信電話株式会社、JSAT株式会社、通信総合研究所（現NICT）、新世代通信網実験協議会、通信・放送機構けいはんな情報通信研究開発支援センターの関係各位には、感謝の意を表したい。