

5-2 高速ネットワークの国際接続を利用した e-VLBI 研究開発

5-2 Research and Developments for e-VLBI Utilizing Global High Speed Network Connections

小山泰弘 近藤哲朗 平原正樹 木村守孝 竹内 央

KOYAMA Yasuhiro, KONDO Tetsuro, HIRABARU Masaki, KIMURA Moritaka, and TAKEUCHI Hiroshi

要旨

情報通信技術の急速な進展は、従来は考えられなかったような膨大なデータを瞬時に遠距離の地点間でやりとりすることを可能としつつある。このことは、社会生活や経済活動に大きな変革をもたらしつつあるとともに、科学技術研究においても多彩で多様な応用が期待されている。なかでも、本報告で紹介する e-VLBI は、本質的に極めて膨大なデータを地理的に離れた地点間で伝送し、合成処理を行うことが必要な研究課題であり、高速なネットワーク技術を科学計測の分野へと応用する典型的な例であると言える。また、e-VLBI で要求される多地点間での膨大なデータ伝送や、マルチキャストと分散処理によるネットワーク資源や計算資源の効率的利用などをインターネット環境で実現することは、ネットワーク技術の研究開発にとっても好適な技術開発課題であり、これらの課題を解決することは更なるネットワーク技術の進展に寄与するものと期待される。本報告では、そのような観点に立って、これまでに実施した e-VLBI の研究開発について紹介し、今後の展望について述べる。

Rapid developments of the Information and Communications Technology have been so remarkable and as the results it is becoming possible to transfer enormous amount of data over long distances which could not be considered before. It is not only causing many and large innovations in social life styles and economic activities, but also various and variety of applications are expected to be realized in the field of scientific research and developments. The main theme of this paper, e-VLBI, can be said as a typical example of such applications which requires high speed network. To realize e-VLBI, it is necessary to transfer enormous amount of data between many sites around the world, and it requires effective usage of the network and calculation resources by using multi-cast and distributed computing to realize high speed computing upon high volume of digital data arising from multiple places in the global scale. Therefore, e-VLBI is considered as a unique and quite suitable theme for network technology research and developments. Solving problems and fulfilling unique requirements which e-VLBI presents, we are expecting that it will accelerate further progress for the network technology.

[キーワード]

超長基線電波干渉法, e-VLBI, 宇宙測地, 電波天文, 高速ネットワーク応用

Very Long Baseline Interferometry, e-VLBI, Space geodesy, Radio astronomy, High speed network application

1 まえがき

超長基線電波干渉法 (Very Long Baseline Interferometry : VLBI) は、複数の電波望遠鏡で受

信した天体電波の信号を干渉処理することで、高解像度の天体電波源イメージを合成したり、受信した信号間の遅延時間を高精度に決定することができる観測技術である。図 1 は、鹿島宇宙通信研

究センターにある開口径 34m の電波望遠鏡の写真であるが、世界各国にあるこのような大型の電波望遠鏡を組み合わせて、日々様々な目的での国際 VLBI 観測が行われている。単体の電波望遠鏡はごく粗い解像度で天体電波源の輝度分布を調べることができる能力しか持っていないが、遠く離れた複数の電波望遠鏡の信号を合成すれば、その距離に相当する開口径を持つ電波望遠鏡と同等の解像度を得ることができ、ハッブル宇宙望遠鏡や地上の大型の光学望遠鏡をはるかにしのぐ解像度で天体のイメージを得ることが可能となる。



図1 鹿島宇宙通信研究センター 34m 電波望遠鏡 (茨城県鹿嶋市)

また、受信信号間の遅延時間は、各電波望遠鏡の基準点の相対位置、天体電波源の位置及び地球姿勢パラメタと呼ばれる地球自転軸の方向や自転速度の変動を記述するパラメタの関数で表現されるので、VLBI 観測データを解析することで地球基準座標系及び天球基準座標系の構築することや、地球姿勢パラメタを高精度に測定することができる。地球姿勢パラメタには、地球の自転軸の天球基準座標系における方向を示す歳差・章動、地球基準座標系に対する地球自転軸の傾きを示す極運動及び地球自転により定義される世界時 (UT1) がある (図 2)。これらは地球に作用する太陽系天体からの引力、大気や海洋の運動及び地球内部の流体の運動を反映して常に不規則に変動している。地球基準座標系は、VLBI をはじめ GPS (Global Positioning System : 汎地球測位システム)、SLR (Satellite Laser Ranging : 衛星レーザー測距) といった宇宙測地技術の観測データを総合して構築されているが、天球基準座標系は VLBI

による天体電波源の位置によって定義されているので、地球基準座標系と天球基準座標系との回転を記述する地球姿勢パラメタすべてを直接的に高精度に計測することは VLBI を用いる以外に方法がない。ところが、従来行われてきた国際 VLBI 観測では、観測したデータを磁気テープに記録し、観測後磁気テープを相関処理と呼ばれるデータ処理を行うことのできる施設 (相関処理局) に輸送する必要があったため、観測したデータを処理・解析して結果を得るまでに数日から数週間を要していた。このため、リアルタイムに地球姿勢パラメタを利用する必要がある場合には、過去の観測データを外挿して得られる予測値を利用することとなり、計測誤差の原因の一つになっている。

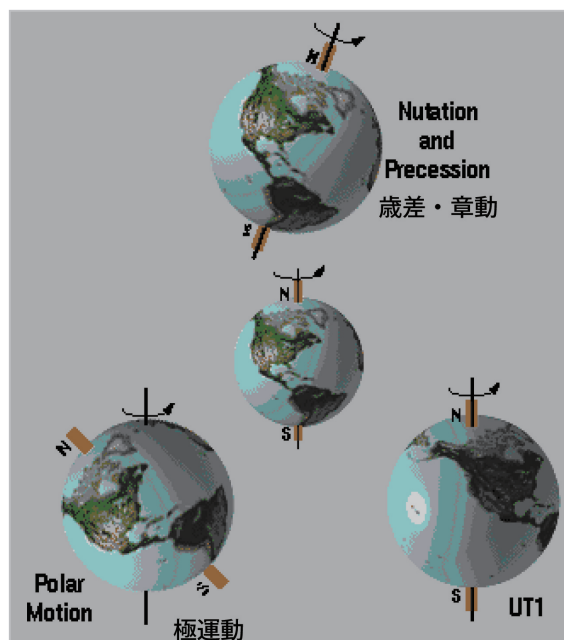


図2 地球姿勢パラメタ

e-VLBI は、高速なネットワーク接続を利用して、観測データを電子的に相関処理局に伝送することで、従来の VLBI 観測よりも短時間で解析結果を得ようとする手法を指して最近使われるようになった用語である。e-VLBI によって準リアルタイムに VLBI 観測データを処理することができるになれば、不規則に変動する地球姿勢パラメタを時間遅れなく高精度に推定することができ、深宇宙探査機の位置計測や、GPS の高精度干渉測位に必要な精密衛星軌道の精度を向上させることが可

能となって、宇宙探査や地球物理計測分野への大きな寄与が期待される。また、VLBI では、微弱な信号を検出するために、なるべく広い周波数帯域の信号を使うことで信号対雑音比を大きくすることが必要で、そのためにできる限り高速でアナログデータをデジタルデータにサンプリングして、そのデータを処理することが必要である。特に、電波天文を目的とする VLBI 観測では、サンプリングのデータレートを増やすほど微弱な天体の観測が可能となるが、従来の VLBI 観測では磁気データレコーダーの能力によってデータレートが限定されていた。一方、最近のネットワーク技術の研究開発により、現在では磁気データレコーダーが記録できるデータレート(典型的には 1024Mbps)よりもネットワーク伝送速度のほうがはるかに上回っており、観測したデータを磁気テープに記録することなくリアルタイムに相関処理することで、観測が可能な最小電波源強度を大幅に改善して、感度を大幅に向上することができると期待される。感度が飛躍的に向上すれば、これまでは VLBI による観測が困難であった恒星の熱的電波など、微弱な天体電波源を観測対象にすることができるようになり、電波天文学にとって大きなブレークスルーをもたらすものと期待される。

一方、例えば、2004 年 3 月に実施された国際 VLBI 実験では、世界各国の五つの観測局で合計約 18TByte に上るデータが記録されているが、まだこれほどの大量なデータをすべてインターネットによって高速に伝送することは技術的に解決すべき課題が多く残っている。とくに、他のトラフィックと共存しながら、有効に利用可能なデータ伝送容量を活用すること、ネットワーク上の伝送遅延が大きい場合の輻輳制御の効率的な方法などは、ネットワーク技術の研究開発にとっても興味深い課題であり、現在多数の研究者が協力しながら取組が進められている。

2 e-VLBI 研究の歴史

e-VLBI を、今日行っているような高速ネットワークを利用する形態に限らず、VLBI で観測したデータを電子的に伝送して処理することとすれば、最初に e-VLBI が行われたのは 1976 年の実験にまでさかのぼる。この実験では、カナダの

Algonquin 局とアメリカの Greenbank 局との間を衛星通信回線で接続して、データレート 20Mbps での VLBI 観測が行われた[1]。また、国内では、1977 年に電波研究所(現在の情報通信研究機構)の平磯支所(現在の平磯電波観測センター)と鹿島支所(現在の鹿島宇宙通信研究センター)の間で、マイクロ波回線を利用して 4.096Mbps のデータレートでデータを伝送することによって、リアルタイム VLBI 観測が行われている[2]。これらの実験は、非常に先進的な取組であったが、その後は高速なデータレートでの衛星回線などを利用することができなかったことと、磁気テープによるデジタルデータの記録技術が急速に進展したことから、一般の観測ではもっぱら観測データを磁気テープに記録して、輸送後相関処理を行うという手法が用いられるようになった。電子的にデータを伝送する技術は、ごく限られた伝送速度で衛星回線や公衆電話回線を用いて行うことができるだけであったので、ごく最近になって高速ネットワークが利用できるようになるまでは予備的な処理によって観測データを検証する目的で行われることが主であった[3]。その後、本格的に e-VLBI が導入されたのは、通信総合研究所(現在の情報通信研究機構)が整備した首都圏広域地殻変動観測計画(KSP: Key Stone Project)においてであった。KSP では、四つの VLBI 観測局の相対位置を高精度に、かつ高頻度に測定することを目的に、幾つかの点で従来の VLBI 観測システムの枠を超えたシステム開発を行った[4]。その一つが高速 ATM (Asynchronous Transfer Mode) ネットワークによって実現した 4 局 6 基線のリアルタイム VLBI 観測処理である。このシステム開発では、まず磁気テープに記録するためのインターフェースをそのまま利用し、インターフェースから出力されるデジタルデータを ATM セルに変換して、それぞれの観測局から小金井相関処理局に設置されたデータ受信装置に伝送するためのシステムを開発した。また、データ受信装置側では、ネットワークの伝送遅延の差を吸収するためのバッファ装置を経て相関処理装置にデータを入力し、リアルタイムに相関処理を実施するシステムを開発した。このシステムは、通信総合研究所と NTT 研究所及び NTT コミュニケーションズ株式会社による共同研究によって開発されたものであり、従来の磁

気テープにデータを記録する方式に比べて、データ処理に必要な時間を飛躍的に短縮することを可能にした。また、観測からデータ処理、解析にいたる一連のプロセスすべてを自動化することに初めて成功し、連日ほぼ休みなく VLBI 観測を行って、自動的に解析結果を WWW によって一般に公開することを実現した^[5]。このようなシステム開発により、e-VLBI 技術の導入によって、観測を行ってからほとんど時間の遅れのないデータ処理が可能となることが実証された。

3 K5観測処理システムの開発

KSP では、2.4Gbps の伝送速度を持つ ATM ネットワークを利用した実時間 VLBI 観測処理システムの開発を行い、1998 年には 4 局 6 基線の観測網による定常的な実時間 VLBI 観測を実現した。ただし、この観測処理システムは、ネットワークのバックボーンとして利用されることが多い ATM を専用線として用いたシステムであったため、世界中に分布する既存の VLBI 観測局との間でそのままのシステムを適用して多数の観測局を接続することは困難であった。そこで、この点を改善し、より汎用性の高いシステムとするため、IP (Internet Protocol) を用いてほかのトラフィックと共存するインターネットの環境の下でデータ伝送を可能とする K5 観測処理システムの開発を 2000 年ごろから開始した。図 3 に、K5 システム用に開発したデータサンプリングボードを、図 4 に現在様々な観測に使用し始めている K5 観測処理システムの写真を示す。

測地 VLBI 観測に用いるプロトタイプ K5 観

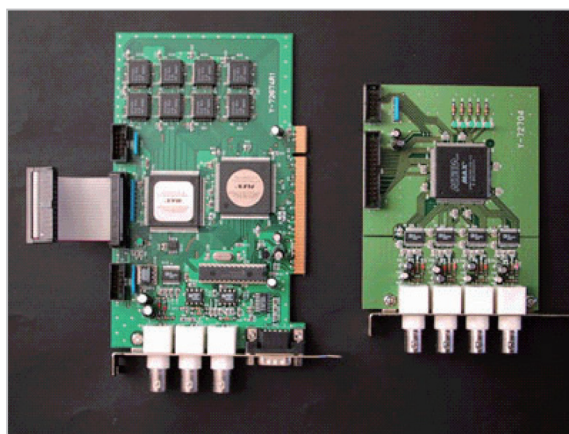


図3 K5 システム用データサンプリングボード



図4 K5 VLBI 観測処理システム

測処理システムは、FreeBSD 又は LINUX の稼動する PC システム 4 台からなり、各 PC システムがそれぞれ 4 チャンネルの信号をサンプリングすることのできるデータサンプリングボードを搭載している。サンプリングされたデータは、内蔵のハードディスクに記録すること及びネットワークインターフェースを通じて IP による実時間データ伝送を行うことが可能とした。また、K5 観測処理システムでは、観測システムで記録されたハードディスク上のデータを処理する機能と、実時間でネットワークを経由して伝送されてくるデータを処理する機能とを併せ持ち、観測後にデータを伝送して処理する準実時間 VLBI データ処理と実時間 VLBI データ処理の両方が可能なシステムとすることを目標に開発を進めている。データサンプリングボードは、水素メーザーから供給される高安定な基準周波数信号と 1 秒ごとの時刻パルス信号とを入力し、受信した信号の位相情報を正確に保ったまま、正確な時刻スタンプをデータファイルのヘッダに記録することができる機能を持っている。また、20kHz から 16MHz の間で様々なサンプリングレートを選択でき、サンプリングする量子化数も 1 ビットから 8 ビットまでの 4

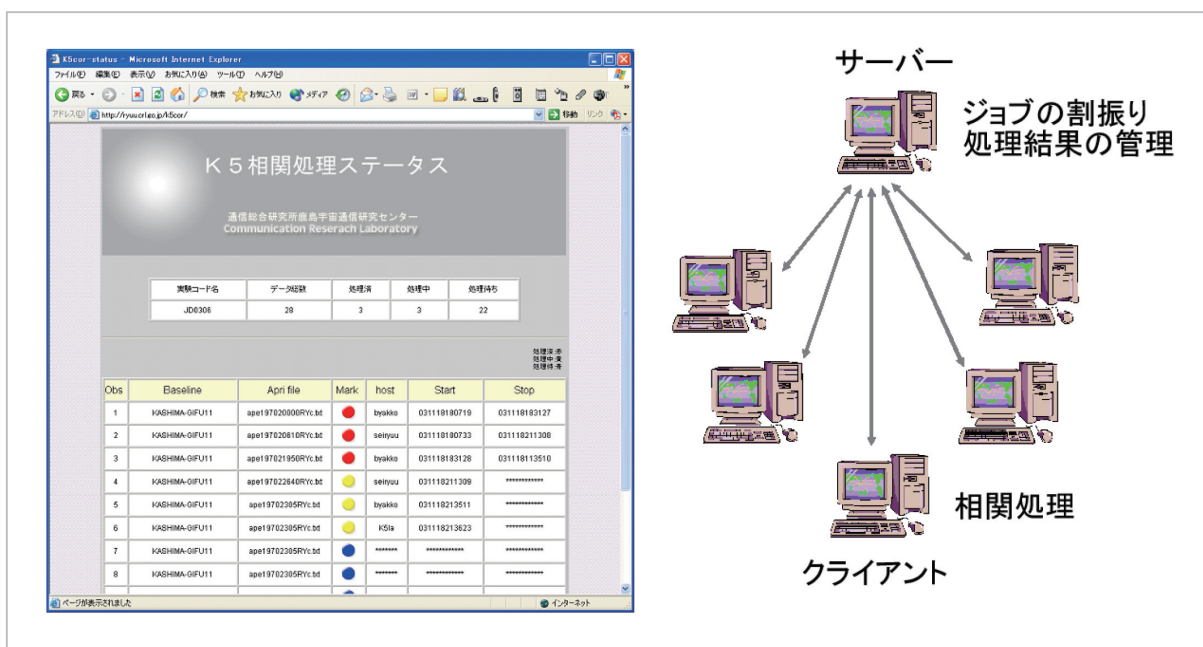


図5 分散処理の概念(右)及び開発中の分散処理時管理画面(左)

種類の中から選択できるようにすることで、観測対象と目的に応じてサンプリングモードを変えることができることが大きな特徴となっている。従来開発されてきた VLBI 観測システムは、磁気テープに記録することのできるデータレートを最大限効率的に使用して S/N 比を向上させるため、サンプリング量子化数は 1 ビットのみ、もしくは 1 ビットと 2 ビットを選択できるシステムしかなかったが、K5 観測処理システムは 8 ビットまで多ビット量子化が可能であり、波形をより忠実に記録することができる。このような特徴から、K5 システムは、e-VLBI だけにとどまらず、正確で安定な時系に基づいたサンプリングを必要とする多くの科学計測分野での利用が視野に入れている。

KSP で開発されたリアルタイム相関処理装置は、FPGA (Field Programmable Gate Array) を利用して高速なデジタルデータ処理を実現したが、K5 システムでは汎用の OS を搭載した PC 上でソフトウェアによって分散処理を行うソフトウェア相関器を開発している。ハードウェアの相関器は、開発に相当の期間を要し、また柔軟性に乏しいという欠点があったが、ソフトウェア相関器では、相関処理ソフトウェアを柔軟に変更して、機能を追加したり処理モードを修正したりすることが容易にできる。また、図 5 に示すように、大規

模な VLBI 実験で多くの観測局のデータを処理する必要があるときには、多数の CPU からなる計算資源を有効に活用して分散処理を行うことが可能となるよう、必要なソフトウェア開発を進めている。

4 UT1 推定実験

前節で述べた K5 観測処理システムを用いて、2003 年からマサチューセッツ工科大学ヘイスタック観測所の Westford 18m 局と鹿島 34m 局の間で UT1 を短時間で推定するための試験観測を開始した[6]。UT1 は、他の地球姿勢パラメタと異なって 1 時間程度の短時間の観測データからでも推定が可能で、また 1 基線だけの観測でも推定することができるため、e-VLBI によって短時間で解析結果を得ることができることを示す上で非常に適している。Westford 局における観測では、ヘイスタック観測所が中心になって開発を行っている Mark-V 観測システム[7]を使用し、鹿島局での観測には K5 システムを使用している。Mark-V システムは、K5 システムと同様、汎用の PC を使用してハードディスクに観測データを記録し、またはインターネットを経由してリアルタイムにデータ伝送を行うことができるように開発されているシステムである。同システムでは、

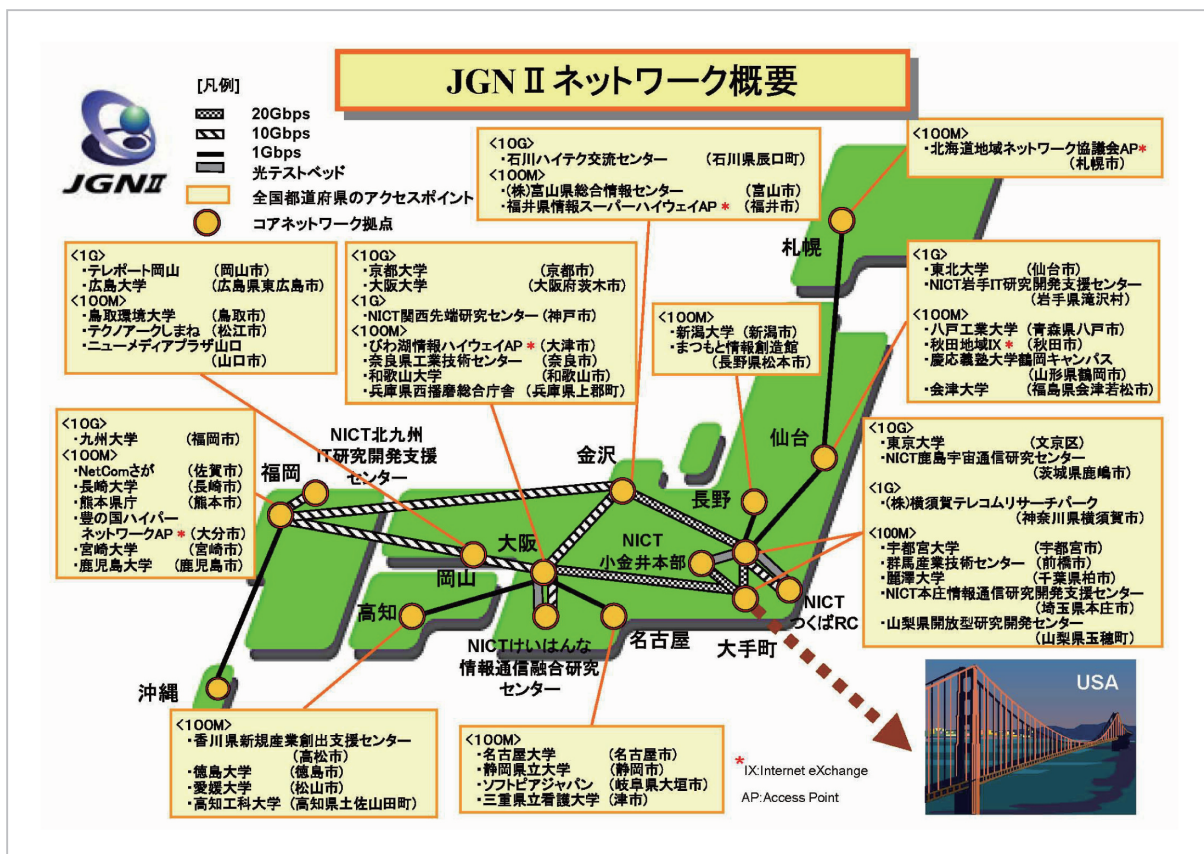


図6 JGN II のネットワーク構成 (JGN II の WWW ページより)

Mark-IV フォーマットと呼ばれる装置から出力されるデータを入力して、複数のハードディスクにデータを分散させて記録させることができる。2004年6月30日に実施した実験では、午前4時から午前5時(日本時間)まで1時間の観測を行い、観測終了後、Westford局のデータを鹿島宇宙通信研究センターにまで研究用高速インターネットを経由してファイル伝送を行った。図6及び図7に、ファイル伝送を行った際、利用したネットワークの接続を示す。アメリカ国内では、Internet2が運用するAbileneネットワークを基幹回線に使用し、Westford局からAbileneへは、BOSSNETとGLOWNETの二つのネットワークを経由して接続した。また、鹿島局は、2004年4月から運用を開始したJGN IIを使用して大手町の接続ポイントに接続し、そこからJGN II / TransPACを経由してアメリカ国内のAbileneネットワークに接続した。

観測終了後、ただちに約13.5Gbyteのデータを伝送し、1時間15分で伝送を完了したため、平均データ伝送速度は約24Mbpsであった。伝送が

完了したデータファイルは、その後K5システムのデータファイルフォーマットへと変換した後、K5観測処理システムのソフトウェア分散相関処理システムにより、全部で21台のCPUを使用して相関処理を行った。相関処理を終えた後、データ解析のためのデータベースファイルを作成して、測地VLBI観測データの解析ソフトウェアのSOLVE及びCALCを使用してデータ解析を行った結果、観測終了後約4時間30分でUT1の推定に成功した。従来、少なくとも1週間程度を要していた処理を、高速インターネットの利用によって飛躍的に所要時間の短縮を図ることができることを実証したとすることができる。

5 むすび

Westford局と鹿島局とを用いたUT1推定実験では、相関処理を行うソフトウェアプログラムの速度改良、効率的に分散処理を行うためのソフトウェア開発及び一連の処理の自動化を進めながら、徐々にUT1推定までに必要な所要時間を短

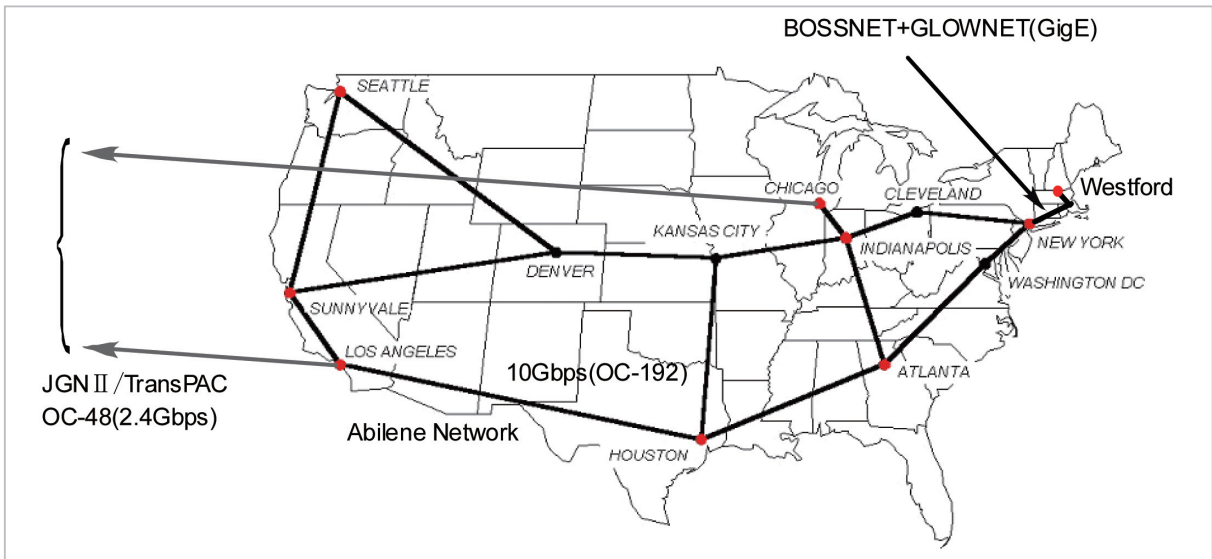


図7 Abilene ネットワークから Westford 局へのネットワーク接続

縮することに成功してきた。今後も、データ伝送速度を制限している箇所の調査と対策によってデータ伝送速度の向上を図り、更に処理システムの自動化を進めることで、所要時間を短縮したいと考えており、今後も同様の試験観測を実施していきながらソフトウェアの開発を継続していく予定である。また、データ伝送フォーマットの標準化が実現できれば、使用する観測システム固有のフォーマット間の変換が不要となると期待されるため、関係する研究者との間で標準化に向けての作業を精力的に進めている。その後、更に処理速度を高速化し、観測したデータをリアルタイムに伝送して、そのままハードディスクに記録することなく関連処理を行うためのリアルタイム処理システムの開発も進めていくことにより、観測が終了すると同時に UT1 などの地球姿勢パラメータすべてを推定することができるようにすることが最終的な目標である。このためには、広帯域を占める e-VLBI の観測データを、極めて遠距離で高遅延時間の地点間で伝送するため、高度な輻輳制御技術や、ネットワーク上の他のトラフィックを阻害することなく状況に応じて効率的に伝送バンド幅を利用するためのダイナミック制御など、研究用高速インターネットを科学計測研究に応用する上での研究を進めていくことが重要である。また、多数の観測局で同時に観測を行うような、大規模な e-VLBI 実験を実施するため、効率的に計算資源を活用し、観測データを時分割

して分散処理させる手法や、マルチキャストによって同一のデータを複数の CPU に伝送して、処理を分散させる手法などの研究開発が必要となると考えられる。このような研究開発を進めていくことで、結果的には e-VLBI だけではなく様々な科学的計測や研究開発に研究用高速ネットワークを応用するための技術開発が進むと期待される。

謝辞

UT1 の準リアルタイム計測のための e-VLBI に関する研究開発は、マサチューセッツ工科大学へイスタック観測所の Alan Whiney 氏、David Lapsley 氏 (現在は BBN Technologies 社)、Kevin Dudevoir 氏、Jason SooHoo 氏及び Chester Ruszczyk 氏をはじめとする研究者のグループと共同で進めています。また、国内では、情報通信研究機構、国立天文台、宇宙航空研究開発機構、岐阜大学、山口大学が協力して、e-VLBI の研究開発に取り組んでいます。研究用高速ネットワークの利用に当たっては、NTT 研究所、KDDI 研究所、NTT コミュニケーションズ株式会社の関係者の方々及び JGN II、TransPAC2、Internet2、スーパー SINET の各研究用ネットワークを運営している関係者の方々に多大なるご支援を頂いています。ここに、関係者の皆様に深く感謝いたします。

参考文献

- 1 Yen, J.L., K.I.Kellermann, B.Rayhrer, N.W.Broten, D.N.Fort, S.H.Knowles, W.B.Waltman, and G.W.Swenson, Jr., Real-Time, "Very Long Baseline Interferometry Based on the Use of a Communications Satellite", Science, 198, pp.289-291, 1977.
- 2 河野宣之, 実時間相関システム, 電波研究所季報, 42, pp.550-554, 1977.
- 3 Kondo, T., J.Amagai, H.Kiuchi, and M.Tokumaru, "Cross-correlation Processing in a Computer for VLBI Fringe Tests", J. Commun. Res. Lab., 38, pp.503-512, 1991.
- 4 Yoshino, T., "Overview of the Key Stone Project", Special Issue of the J. Comm. Res. Lab., 46, pp.3-6, 1999.
- 5 Koyama, Y., N.Kurihara, T.Kondo, M.Sekido, Y.Takahashi, H.Kiuchi, and K.Heki, "Automated geodetic very long baseline interferometry observation and data analysis system", Earth Planets Space, 50, pp.709-722, 1998.
- 6 Koyama, Y., T.Kondo, H.Osaki, A.R.Whitney and K.A.Dudevoir, "Rapid Turn Around EOP Measurements by VLBI Over the Internet", Proc. the XXIIIrd. General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics, Jul. 2003, Sapporo, Japan, ed. by E. Sanso, pp.119-124, 2003.
- 7 Whitney, A. R., "The Mark 5 VLBI Data System and e-VLBI Development", in 2002 Annual Report, International VLBI Service for Geodesy and Astrometry, by N. R. Vandenberg and K. D. Baver (eds.), NASA/TP-2003-211619, pp.22-33, 2003.



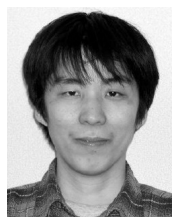
小山泰弘
電磁波計測部門宇宙電波応用グループ
リーダー 博士(学術)
測地学、天文学、電波科学



近藤哲朗
無線通信部門鹿島宇宙通信研究センタ
ー主管 理学博士
宇宙測地学、地球物理学



平原正樹
情報通信部門インターネットアーキテ
クチャグループ主任研究員 工学博士
インターネット技術



木村守孝
電磁波計測部門宇宙電波応用グループ
天文学



竹内 英
電磁波計測部門宇宙電波応用グループ
専攻研究員 博士(理学)
電波天文学、電波工学