

リアルタイムVLBIシステムとその応用

木内 等¹、近藤 哲朗¹、雨谷 純¹、吉野 泰造¹、
川口 則幸²、魚瀬 尚郎³、岩村 相哲³、星野 隆資⁴

郵政省通信総合研究所¹、国立天文台²、NTT³、NTT-AT⁴

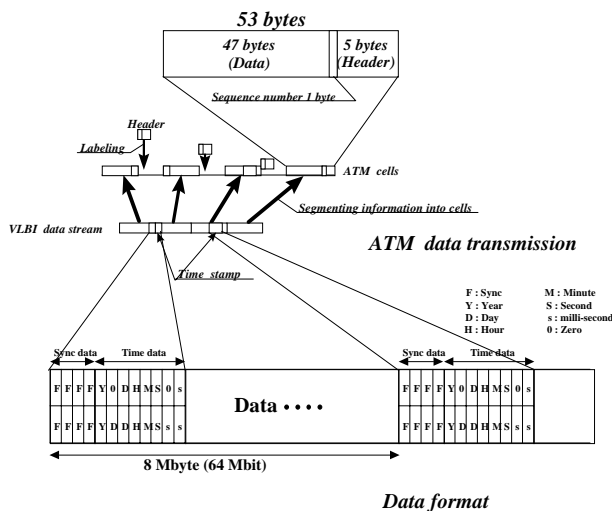
1.はじめに

VLBI の様な大量のデータを扱う観測システムでは、従来観測データをテープ上に記録し、後日処理することで実験が完結していた。今日、デジタル通信の分野の発達は目覚ましく、ギガビットクラスの伝送が十分に可能となってきた。高速ネットワークを用いることで、従来不可能とされてきたリアルタイム仮想大型電波望遠鏡の構築の可能性も出てきた。仮想大型電波望遠鏡の構築には、高速データ通信技術を核とし、高速データ収集・データ伝送時のタイミングの同期（データ時刻同期）・高速データ処理という技術が求められる。そこで、最も VLBI の高速データ伝送に適した AAL-1 での ATM (Asynchronous Transfer Mode) 伝送に絞り、上記技術の開発を行った。VLBI 観測局を 2.488Gbps(STM-16)のテストベッドとしての ATM 通信網で繋ぎ、256Mbps/局の高速データ伝送を行うことで、リアルタイム VLBI 観測を実現した。また、より汎用性の高い 155Mbps(STM-1)システムも併せて開発したので紹介する。

2. 2.4Gbps(STM-16)システム

2.1. KSPシステム

首都圏広域地殻変動モニタ計画（KSPプロジェクト）では、首都圏に配置した VLBI 4 局を 2.488Gbps(STM-16)のテストベッドとしての ATM 通信網で繋ぎ、256Mbps/局の高速データ伝送を行うことで、隔日 24 時間リアルタイム VLBI 観測を行い、精密測位解を得ている。KSP では、高速データ伝送を AAL-1 ベースで行うシステムの構築を行った。我々ユーザのデータ（第 1 図参照）を ATM AAL-1 ベースで伝送するためにパケット化しなくてはならない。この時、VLBI 観測で最も大切なデータのタイミング同期をとるため、ユーザデータ中にタイムコードを付加した。



第 1 図 VLBI データのパケット化

データ伝送に於いては、VLBI 内部クロックと

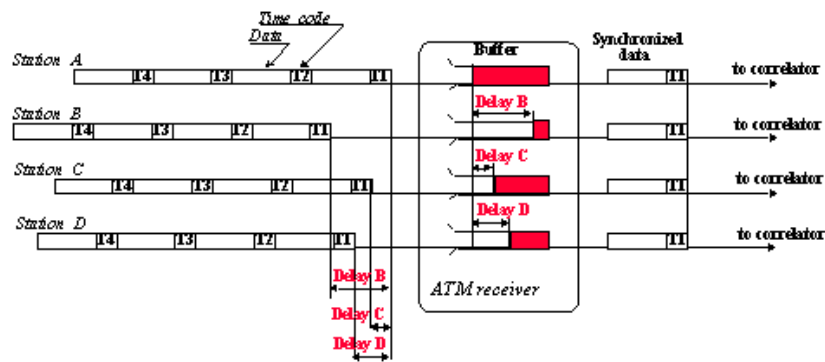
ATM 系の網クロックが異なるために、データのクロック乗せ変えが必要となる。VLBI 基準時計は、水素メーザ（現在最高安定度）であり、網クロックはセシウム原子時計である。VLBI 観測時の周波数変換・サンプリング等には、セシウム原子時計では不十分であるが、デジタル化された後は基準時計の安定度は、さほど問題とならない。これら高安定な原子時計を有するため VLBI データの網クロックへの乗せ換えは、簡単な FIFO で行うことが可能となった。各アンテナで受信した信号には、観測時に SYNC・時刻符号が挿入されパケット化されて ATM 回線に送出される。この信号は ATM 通信網を通して伝送される。各観測局と相関局間の伝送路長は各局毎に異なるため、伝送揺らぎ・伝送路遅延差が生じる。この影響を除去するために、受信装置に於いて緩衝バッファ及び遅延バッファを設けている。受信装置では、多重化された信号を各局毎に分離・伝送揺らぎ除去後、時刻符号を検出・伝送路遅延除去を行い自動的にデータを揃えて相関処理装置に送出する。また、VLBI データに最も深刻な影響を与える ATM セル誤配・損失に対する対応策も講じられている。

相関局では、データの 1 ビット単位での同期が要求される。データ同期は信号中に挿入された時刻符号により、受信装置内部で行われる。従来の相関処理においては、テープ上のデータの調走という形でデータ同期をしていたが、実時間データ伝送では、メモリ操作により伝送路遅延を補正する必要がある。データ同期を行うには、観測局で挿入された時刻符号を基準に各局のデータをバッファメモリに蓄積し、全局の時刻符号が到達した段階で、バッファメモリから読み出しを開始する（第 2 図）。時刻の揃った

データは、基線数に分配され相関器へと送られる。本装置の場合、観測レートは256, 128, 64, 32, 16 Mbpsの5速を選択できる。この時、相関器(第3図)は各速度に自動追従する。

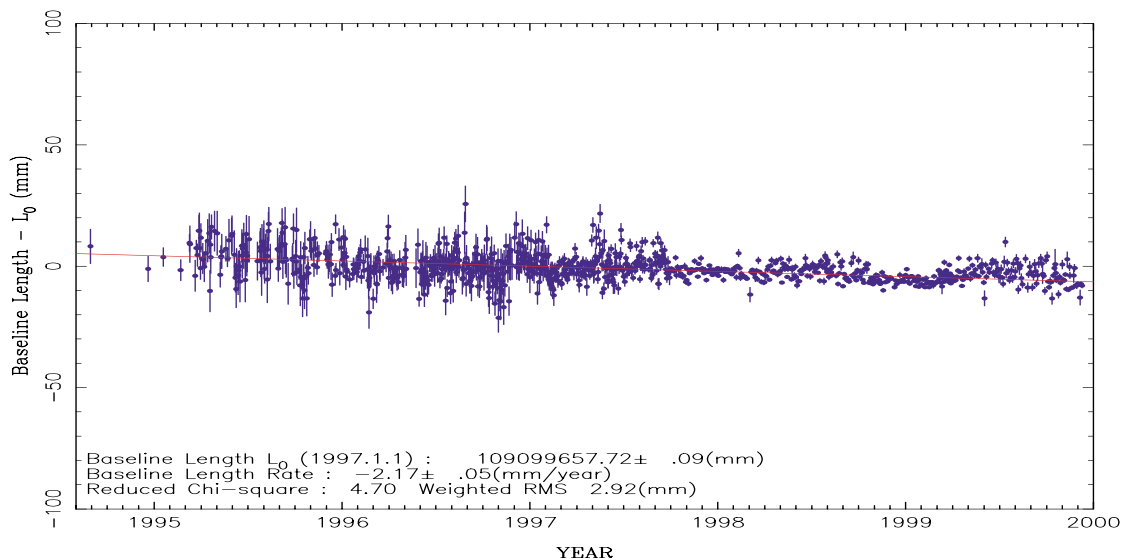
KSP 測位結果(鹿嶋-小金井基線)の変化を第4図に示す。1997年7月以降隔日24時間リアルタイムVLBIが行われ、精度が向上している。1998、1999年夏場に測定誤差が大きくなっているのは水蒸気の影響。(詳細は、近藤氏の資料参照)

第3図リアルタイム相関処理システム(右図)
左から ATM 受信装置、4局6基線相関器
(上部は、テープベース1基線相関器)



第2図 リアルタイム受信装置におけるVLBIデータ同期

KASHIM11-KOGANEI

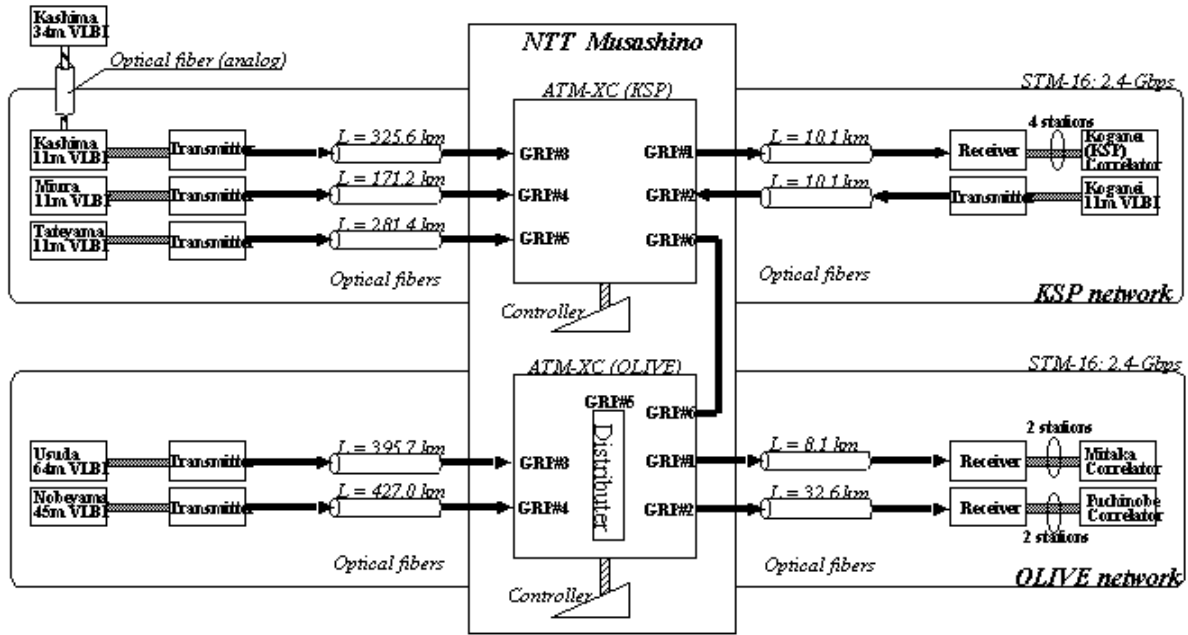


第4図 KSP 測位結果(鹿嶋-小金井基線)の変化。
1997年7月以降、隔日24時間リアルタイムVLBIが行われ、精度が向上している。

2.2. GALAXY システム

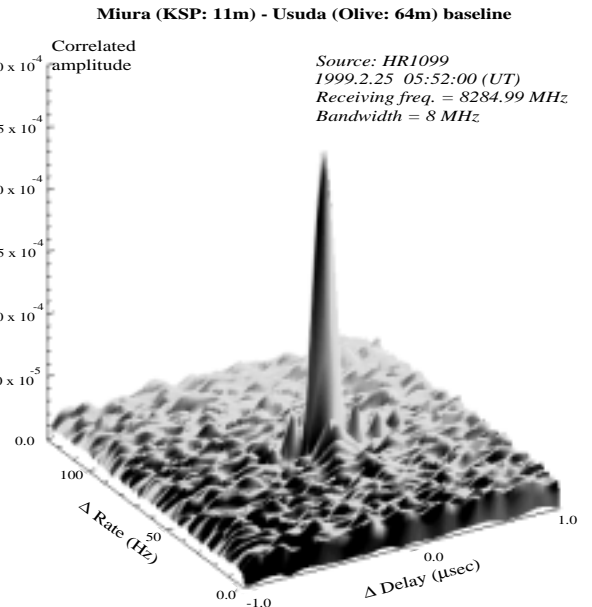
高速ネットワークを用いた仮想大型電波望遠鏡実験実施をCRLのKSPネット・鹿嶋34mアンテナ及び臼田64m、野辺山45m局(OLIVEネット)を用いたGALAXY網として1998年秋より行っている。伝送データレートは256Mbps/局である。本技術により首都圏の大型電波望遠鏡を長時間で結合できるため、これまで困難であった微弱天体の観測を高感度でかつ柔軟に実施可能である。256Mbps/局の伝送レートでの世界最

高速の仮想大型電波望遠鏡となり、幾つか注目すべき天文学的成果も出始めている。CRL 鹿嶋34mと宇宙科学研究所臼田の64m(基線長200km:リアルタイム世界最長)が両端となる仮想大型電波望遠鏡をATM網で結合して実現した。両局データは、NTT武蔵野でクロスコネクタされCRL 小金井で相関処理を行った。NTT武蔵野とCRL 小金井間最大4局のデータがクロスコネクタされ、ユーザーエリア1Gbpsのデータ量となる。



第5図 GALAXY ネットワーク

今回は、観測開始時に検出に成功した連星HR1099について紹介する。観測周波数帯は、2GHz帯と8GHz帯である。HR1099は、距離117光年、変周期2.84日であるが、電波での強度変動は不規則である。電波強度が突発的に強くなるフレアは、継続時間も短く観測のチャンスを得ることは困難であるが、本年2月にはフレア時のスペクトルを捉えることに成功した。6月の観測では、フレア発生と共に観測スケジュールを急遽組み替え長時間のフレア観測に成功した(第6図)。このような観測は、実時間処理が行えるようになって初めて可能になったものである。静穏時の観測結果は理論モデルに良く一致するが、フレア時のスペクトルは理論モデルと一致しない。8GHz帯及び2GHz帯における強度上昇に時間的なずれがあることが考えられる(詳細は、川口氏資料参照)。

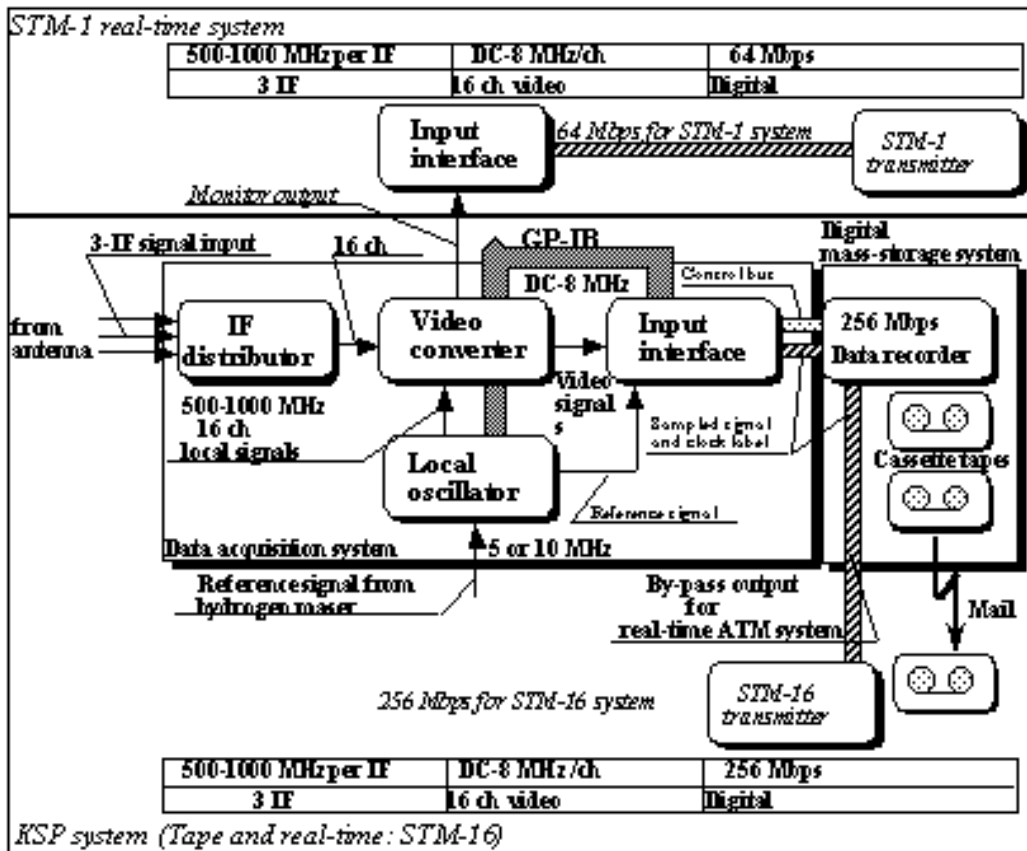


第6図 HR1099 フレア時の観測結果

3. 155Mbps(STM-1)システム

より汎用性の高い国際リアルタイムVLBI網構築を目指した汎用高速ネットワーク(STM-1: 156Mbps)リアルタイムVLBI装置の開発・測位基礎実験をCRLで行ったので紹介する。本装置の場合、観測レートは256, 128, 64, 32, 16, 8 Mbpsの6速が可能であり、伝送レートは、112, 96, 80, 64, 32, 16, 8 Mbpsの7速を選択できる。この時、相関器は各速度に自動追従する。観測レートが伝送レートを上回っている部分は、メモリ(4 Gbit/回線)操作によるバースト的な観測方式となる。本装置を用いた24時間測位基礎実験をCRL小金井鹿嶋基線で、KSP実験と並行して行った。実験は、定常観測に一切

影響を与えないように必要装置を付加する形で行われた。ビデオ変換部までの信号を共通とし、KSP観測とは別の入力インターフェースでサンプリングとフィルタリングを実施した。KSPでのデータレートは256Mbps(STM-16回線)、本装置でのデータレートは64Mbps(STM-1回線)で行われた。観測は、24時間自動運用された。相関処理は、実時間で自動処理され、解析もKSP同様自動解析で行われた。解析結果は、基線長で比較した場合、KSP: 109099.6522m ± 0.0007m、本装置: 109099.6544m ± 0.0015mとなり、観測データ量から計算される誤差の比と良く一致した精度比が得られた。また、今回は十分満足できる測位結果が得られた。



第7図 STM-1/STM-16 比較実験

4. まとめ

世界最高性能の高速ネットワークを用いた高速データ取得・処理・解析装置を開発した。NTT・天文台・宇宙研との共同研究として、256 Mbps回線を用いた試験実験を行い、測地解ばかりでなく、干渉計型望遠鏡による銀河系内の連星、遠方の銀河、銀河中心など、超微弱天体の観測に成功した。また、低速ではあるが、より汎用性の高い国際リアルタイムVLBI網構築を目指した汎用ネットワーク(STM-1: 156Mbps)リアルタイムVLBI装置の開発・基礎実験も並行して行っている。今後は、内蔵メモリを用いたバースト観測試験(観測レートが伝送速度以上の観測手法)も行う予定である。今

後、工学の面ばかりでなく理学面での成果も本プロジェクトの応用として産出したい。

参考文献

- [1] H.Kiuchi, M.Imae, T.Kondo, M.Sekido, S.Hama, T.Yamamoto, H.Uose, T.Hoshino, "Real-time VLBI of KSP", TWAA96, Dec. 1996
- [2] T. Kondo, N. Kurihara, Y. Koyama, M. Sekido, R. Ichikawa, T. Yoshino, J. Amagai, K. Sebata, M. Furuya, Y. Takahashi, H. Kiuchi, and A. Kaneko, "Evaluation of repeatability of baseline lengths in the VLBI network around the Tokyo metropolitan area," *Geophys. Res. Letter*, Vol. 25, pp. 1047-1050, 1998.