

K5 システムによる測地 VLBI 実験

小山泰弘*1、近藤哲朗*1、大崎裕生*1、平原正樹*1、高島和宏*2、徂徠和夫*3、
高羽浩*4、藤沢健太*5、David Lapsley*6、Kevin Dudevoir*6、Alan Whitney*6

*1 通信総合研究所、*2 国土地理院、*3 北海道大学、*4 岐阜大学、
*5 山口大学、*6 Haystack Observatory

1. 概要

K5 VLBI システムは、従来の磁気テープによるデータ記録をベースにした VLBI 観測・処理システムを発展させ、汎用 PC とハードディスクへのデータ記録、および PC からネットワークを通じてデータ伝送を行うことを前提に開発を行っている観測・処理システムである。通信総合研究所では、これまでに K5 VLBI システムの一つとして従来の多チャンネル測地 VLBI 実験における観測と相関処理を行うことのできるシステムを汎用科学サンプリングプロセッサ (Versatile Scientific Sampling Processor = VSSP) と名づけて開発を行ってきた。本報告では、この VSSP システムを用いてこれまでに実施した測地 VLBI 実験について、その概要と得られた結果について述べる。

2. K5 VLBI システム

日本で開発された VLBI 観測・処理システムのうち、本格的に VLBI 観測・処理に利用されたのは 1980 年代に開発された K3 VLBI システムが最初と言ってよい。K3 VLBI システムは、米国で開発された Mark-3 VLBI システムと同じ固定ヘッドとオープンリール磁気テープを用いたシステムである。記録データレートは最大で 112 Mbps であり、単基線の相関器も開発され、長く国際実験で利用された。その後、米国では Mark-4 VLBI システムが開発されたが、Mark-4 VLBI システムは多基線の大規模な相関器の開発が主であり、データレコーダは Mark-3 VLBI システムと同様のシステムが使われていた。一方、日本で開発された K4 VLBI システムは、ロータリーヘッド方式のデータレコーダとカセットテープ型の磁気テープを採用し、テープ交換の自動化と磁気テープ上の記録面密度の大幅な向上を同時に達成することに成功した。これにより、首都圏広域地殻変動観測計画では、4つの観測局で 24 時間以上にわたって 256 Mbps の記録レートでの観測を無人で行うことを実現し、また、現在では 1024 Mbps でのデータ記録・相関処理も実現されている。1997 年には、首都圏広域地殻変動観測計画の4つの観測局間を高速の ATM ネットワークで接続し、データレコーダへの信号入力をそのままネットワークで伝送して、リアルタイムに相関処理を行うシステムを実現した。同システムでは、観測からデータ解析までの一連のプロセスを完全にパイプライン化して、無人での高頻度観測と解析データの自動公開を実現することに成功した。



図1 IP-VLBI ボード

このように、K3 VLBI システムから K4 VLBI システムへの移行は、単に機器の性能向上のみに留まらず、VLBI 観測処理そのものを大きく変革させるものであったといえる。K5 VLBI システムでも、やはり K4 VLBI システムから大きく変革するための開発が目指されている。K5 VLBI システムの大きな特徴の一つは、汎用の PC を利用していることにある。従来、汎用の PC は磁気ディスクの容量やデータの伝送速度の限界のため、とても VLBI 観測処理に使用することはできなかったが、最近になっていずれも大幅に技術開発が進んだ結果、VLBI 観測処理に十分使用できるようになった。しかも、汎用 PC の性能は今後も急速に向上していくことが期待され、システムのコストダウンとともに、近い将来データ記録レート的大幅な向上も期待できる。また、取得したデータを、インターネットを使った国際規模でのネットワークに IP (Internet Protocol) で伝送することが容易にできるため、ATM ネットワークのように高価な専用ネットワークを敷設することなく、グローバルなリアルタイム VLBI 観測・処理も実現できるものと期待される。取得されたデータはソフトウェアで容易に処理することができるため、ソフトウェア関連処理によって分散処理も可能となり、高価で柔軟性に乏しく開発に長い期間を要するハードウェア関連器を開発しなくても、容易に大規模な関連器を構築することも可能となる。

このような見通しを持って、まず4チャンネルのビデオコンバータ出力信号をサンプリングすることのできる IP-VLBI ボード(図1)の開発が行われた。このボードは、現在の PC に一般的に使用されている PCI バスで動作し、OS としては Windows2000、FreeBSD、および Linux を利用することができる。IP-VLBI ボードは、40 KHz から 16 MHz までの多くのサンプリングレートをサポートし、サンプリングビット数も1ビットから8ビットまでの中から選択することができるようになっている。現在では、1つのボードあたり、128 Mbps までの記録データレートで安定して動作することを確認しており、今後、PCI バスの速度向上や磁気ディスクの記録速度の改善により、さらに速い 256 Mbps 以上のデータレートにも対応できるようになると期待できる。この IP-VLBI ボードを組み込んだ PC システムを4台使用して、16チャンネルの観測を行うことができるようにしたシステムが図2に示す VSSP システムである。この VSSP システムの名称は、単に観測データの取得だけではなく、関連処理も同じシステムを用いてできること、また VLBI のみではなく、分光観測やサンプリングの正確な時刻情報や高安定なサンプリングを必要とする多くの科学計測に利用できるシステムの開発を目指してつけた名称である。このシステムにより、現在、トータルな記録レートとして、512 Mbps を安定して実現しており、記録容量は 1.92 Tbyte を実現しているが、これらは近い将来 PC システムの技術革新とともにどんどん改良されていくものと期待される。この VSSP システムは、高価なフォーマッタ装置を別に必要としないことから、多チャンネルで比較的低いデータレートでも観測・処理に使用されることが見込まれる。一方、1 Gbps を越えるような高速サンプリングデータを記録・処理することを目指して、VLBI 標準インターフェース(VSI : VLBI Standard Interface or Versatile Scientific Interface)のハードウェア仕様に準拠した信号入力を記録するためのインターフェースボード(PC-VSI)の開発も進められている。現在は、VSI によるデータ入力が完成しているが、今後、開発を続けて、VSI によるデータ出力にも対応できるようにする計画である。これらのシステムを組み合わせることで、低いデータレートから高速なデータレートにまで対応でき、VSI によるデータ入出力にまで対応するのが K5 VLBI システムであり、その全体像を図3に示す。



図2 VSSP システム

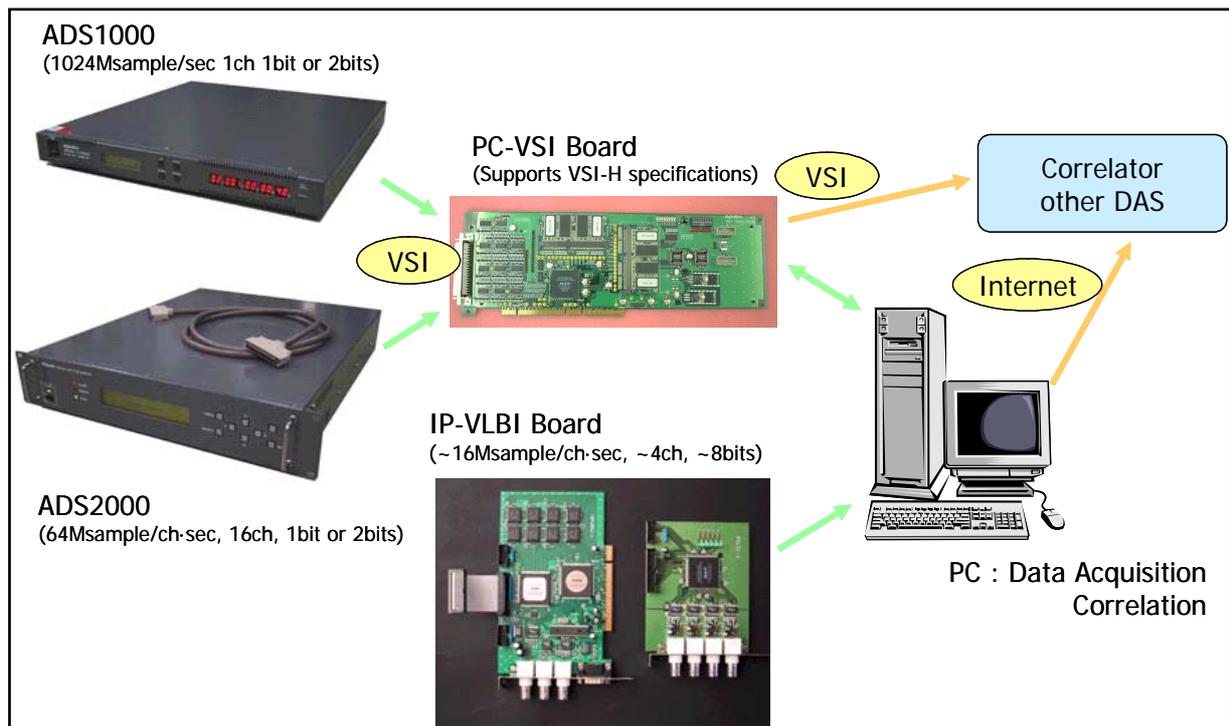


図3 K5 VLBI システムの全体像

3. 国内測地 VLBI 実験

VSSP システムによる国内測地 VLBI 実験は、これまでに 2003 年 1 月 (U03031) と 7 月 (JADE0306) の 2 回実施されている。U03031 実験は、臼田 64m 局の基準点位置を計測することを主な目的として K4 システムを用いて行った実験であるが、鹿島 11m 局と小金井 11m 局に VSSP システムとギガビット VLBI システムを設置して観測データを並行記録した。K4 システムと VSSP システムでのデータ記録レートは 4Mbps・14 チャンネル、総データレート 56Mbps であった。JADE0306 実験は、国土地理院が実施する定期的な国内測地 VLBI 実験であり、つくば、新十津川、始良、父島の 4 局で 8 Mbps・16 チャンネル、総データレート 128 Mbps で K4 システムを用いて実施された実験である。この実験と同じ観測スケジュールでつくば、鹿島 (11m)、苫小牧、岐阜 (11m)、山口の 5 つの観測局に VSSP システムを設置して、観測データの並行記録を行った。ただし、山口 32m 局は S バンド受信機が搭載されていないため、X バンドのみの観測とした。また、山口 32m 局を除く 4 局では K4 システムでの観測も行われ、苫小牧 11m 局と鹿島 11m 局とではギガビットシステムでも記録を行った。U03031 実験と JADE0306 実験は、いずれも約 24 時間にわたって実施された。両実験で K4 システムと VSSP システムによって得られた観測データをそれぞれ処理解析し、比較した結果を表 1 および表 2 に示す。

表 1 U03031 実験で得られた鹿島—小金井基線の基線長の比較

システム	データ数	基線長	遅延時間残差	遅延時間変化率残差
K 4	112	109099657.0 ± 6.7 mm	76 psec	136 fsec/sec
VSSP	159	109099641.2 ± 3.2 mm	33 psec	92 fsec/sec

表2 JADE0306 実験で得られた結果の比較

基線	システム	データ数	基線長	遅延時間残差	遅延時間変化率残差
つくば-鹿島	K 4	176	53811894.9±2.1 mm	53 psec	158 fsec/sec
	VSSP	130	53811891.6±3.1 mm	81 psec	121 fsec/sec
つくば-岐阜	K 4	184	311067474.0±2.9 mm	98 psec	189 fsec/sec
	VSSP	55	311067483.3±4.0 mm	58 psec	136 fsec/sec
つくば-苫小牧	K 4	124	740526116.3±4.4 mm	103 psec	165 fsec/sec
	VSSP	169	740526119.4±5.1 mm	103 psec	146 fsec/sec
鹿島-岐阜	K 4	174	358799168.6±2.8 mm	72 psec	191 fsec/sec
	VSSP	48	358799174.7±4.5 mm	92 psec	144 fsec/sec
鹿島-苫小牧	K 4	171	749810979.9±4.4 mm	115 psec	125 fsec/sec
	VSSP	108	749810985.5±5.5 mm	106 psec	143 fsec/sec
岐阜-苫小牧	K 4	154	902668931.2±4.8 mm	135 psec	125 fsec/sec
	VSSP	49	902668930.6±6.1 mm	116 psec	138 fsec/sec

表3 JADE0306 実験の結果推定された山口 32m 局基準点の ITRF97 における位置

X: -3502544258.3±22.1 mm Y: 3950966396.9±25.8 mm Z: 3566381164.9±22.0 mm

JADE0306 実験では、一部の観測局で VSSP システムによる観測データに欠測があり、解析に使用されたデータ数が少なくなっている基線があるものの、K4 システムと VSSP システムによる結果には有意な差はなく、VSSP システムが測地 VLBI 実験において K4 システムと同等以上の性能を持っていることが確認されたと言える。なお、JADE0306 実験のデータ解析により、推定された山口 32m 局基準点の ITRF97 における位置の推定結果を表3に示す。山口 32m 局にとっては、JADE0306 実験がはじめての測地 VLBI 実験への参加であり、今回の解析結果によってはじめて高精度な基準点位置を得ることができた。ただし、この結果は Xバンドのみの観測によって得られた結果であり、電離層遅延補正が行われていないことに注意が必要である。

4. 今後の計画

国内測地 VLBI 実験で VSSP システムが期待された性能を示すことが確認されたことを受け、2003 年 10 月以降鹿島 34m 局が参加する IVS の国際 VLBI 実験では、VSSP システムによるデータ記録を試行的に開始している。VSSP システムで記録された観測データは、Mark-5 と互換性のあるファイルフォーマットに変換し、研究用インターネットを経由して米国のヘイスタック観測所に伝送して、そこで Mark-5 システムのディスクに記録されて関連処理局に送られている。また、現在、このようなデータフォーマットの変換を行う必要がなくなるように、データ伝送フォーマットの標準化に向けた議論を関係者の間で活発に行っており、将来的には、観測データを磁気ディスクに記録しながら関連処理局に直接伝送するシステムを実現していきたいと考えている。さらに、ソフトウェア関連処理の分散処理システムを構築することで、現状では観測を実施してから解析結果を得るまでに2週間以上を要する状況を大幅に改善し、高速ネットワークで接続された観測局からのデータは観測終了後数時間以内に解析処理まで完了させることを目指して、必要な要素技術の研究開発を継続する計画である。