

K5 システム開発を振り返って

近藤哲朗

情報通信研究機構鹿島宇宙技術センター、中国科学院上海天文台

1 はじめに

情報通信研究機構 NICT (電波研究所、通信総合研究所時代を含む) は VLBI 技術開発を 40 年以上続けてきた。その開発の歴史は大型アンテナと共にあった。26 m アンテナ時代 (アンテナは 2003 年 3 月撤去) には本格的な測地 VLBI システムである K3 システムを完成させ、34 m アンテナ時代 (1988 年以降) には VLBI システムを更に高精度化するための技術開発とともに、PC の汎用インターフェースを利用した低コストの VLBI 用のサンプリングシステム (K5/VSSP システム) とソフトウェア関連器の開発も行われた。その後 K5/VSSP システムは測地定常観測に使用されてきた他、広く大学でも使用されてきた。なお K5 には測地 VLBI の世界組織である IVS で定められた VSI (VLBI Standard Interface) インタフェースを使用する K5/VSI システムも含まれるが、ここでは K5/VSSP システムについてのみ記述する。

2 K システム開発の歴史

NICT が最初に開発した VLBI システムは K1 システムと呼ばれており、それ以降開発されたシステムには “K ” で始まる名称がつけられている。表 1 に今までのシステム開発の歴史を簡単にまとめている。

表 1. K システム開発の歴史

K1	1975 年から開発、1977 年、日本における最初の VLBI 実験実施。ビデオレコーダ使用。
K2	1977 年から開発。マイクロ回線を使った実時間データ転送システムを使った VLBI システム
K3	1978 年から開発。1983 年完成。米国の Mark-III システムと互換性を有したシステム。日本初の本格的測地 VLBI システム。オープンリールレコーダ使用。
K4	1988 年から開発。業務用カセットテープ使用。自動テープ交換可。
KSP	1993 年から開発。専用回線による実時間 VLBI システム
K5/VSSP	2000 年から開発。低コストのサンプラーとレコーダ。汎用パソコン使用

K3 システム以降が測地および天文応用用途の本格的な VLBI システムである。

K3 システムは日本で最初の本格的測地 VLBI システムであり、高価でサイズも大きなシステムであった。図 1 に K3 システムと K5 システムの大きさの比較を示している。K5 システムは K3 レコーダと K3 相関器に相当する部分をカバーするが図に示されるようにサイズが大幅に小さくなった。更に汎用の PC が使用できることで低コストでシステムを導入できるようになった。

参考までに K シリーズの性能 (データレート) の変遷を図 2 に示す。

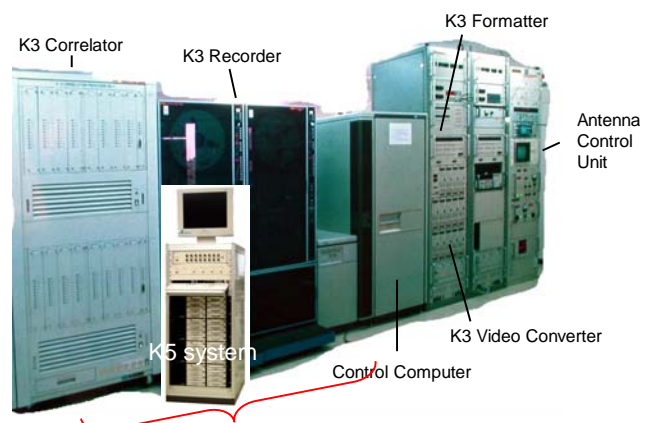


図 1. K3 システムと K5 システムの大きさの比較。

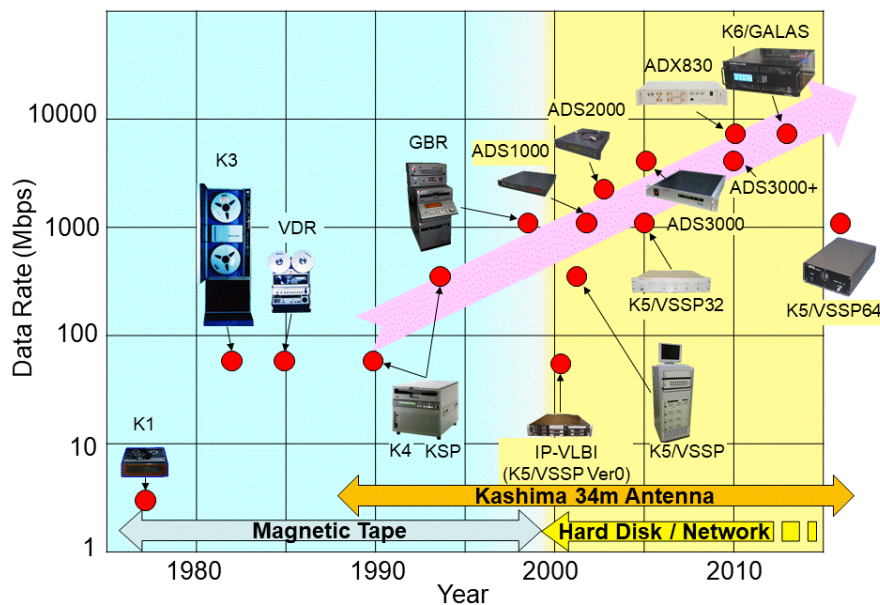


図 2. K シリーズ (レコーダ、サンプラー) 性能 (データレート) の変遷

3 K5 システムの開発

K1、K2 システムではコンピュータによる相関処理 (ソフト相関器) であったが、K3 および K4 (KSP) システムではハードウェア相関処理装置を用いて相関処理を行っていた。24 時間実験を定期的に繰り返す測地 VLBI 観測では当時のコンピュータによる相関処理では処理が追い付かなかったのである。

K5/VSSP システムは、コンピュータの処理速度が時代とともに向上するであろうことを期待し、当初からソフトウェア相関処理装置 (ソフト相関器) を前提として開発された。そのためデータは当時主流であった磁気テープへの記録ではなく、ハードディスクにファイル形式で記録し、データフォーマットはソフトウェアでの相関処理を意識した 4 バイト (32 ビット) 単位のフォーマットとした。ところで、VSSP は Versatile Science Sampling Processor の略であるが、VLBI 観測用途だけではなく正確な時刻付けが必要な汎用科学データの収集にも使えるサンプラーを意識しての命名である。

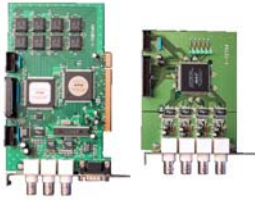


K5 システムの初号機である K5/VSSP の開発は 2000 年春に開始されたが、その年の秋には鹿島センター内の 26m アンテナと 34m アンテナ間での初フリンジ検出に成功した。2001 年 9 月 17 日には鹿島 - 小金井基線で K5/VSSP を用いての測地実験モードでの初フリンジ検出に成功した。その後、測地 VLBI の定常観測に使用されるようになった。

K5/VSSP システムはその後も進化を続け、現時点では K5/VSSP64 が最新システムである (表 2)。

4 ソフト相関器の開発

K3 時代にフリンジテストを目的としたソフト相関器 (CCC) ^[1] が開発されたが、当時比較的高速であったミニコンピュータ HP1000/A900 を使用してもサンプリング周波数 4MHz の 1 ビット AD データ (K3 システムの測地 VLBI 観測時のサンプリングモード) の 1 ch × 4 秒積分処理 (64 ラグ) に 150 分を要した。定常処理に使用することはできなかったが、国内実験のフリンジテストに試験的に使用し、観測終了後僅か 10 時間でフリンジを検出することに成功し有用性を示すことができた。当時は観測データ (テープ) を相関処理局に輸送する必要があり、最短でもフリンジ検出には数日を要した。

表 2. K5/VSSP システムの変遷

	K5/VSSP	K5/VSSP32	K5/VSSP64
			
Sampling Freq(MHz)	0.04, 0.1, 0.2, 0.5, 1, 2, 4, 8, 16	0.04, 0.1, 0.2, 0.5, 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64	2, 4, 8, 16, 32, 64, 128
LPF(MHz)	—	2, 4, 8, 16, through	2, 4, 8, 16, 32, through
AD bits	1,2,4,8	1,2,4,8	1,2,4,8
# of CHs	1, 4 per unit	1, 4 per unit	1, 2, 4 per unit
Max data rate	64 Mbps per unit	256 Mbps per unit	1024 Mbps per unit
Interface to PC	PCI-bus	USB2.0	USB3.0

K5/VSSP システムの開発と並行して K5 ソフト相関器が開発された [2]。このころになると汎用 PC の性能も向上し、PC でも実用的なスピードでの相関処理が可能となってきた。

K5 ソフト相関器は CCC をベースにして開発されたが 1 ビット AD データの処理に特化した時間領域での相関処理（いわゆる XF 型の相関処理）を行うソフト相関器であった（後に多ビットサンプリングデータも扱う XF 型の相関処理も実装された）。処理速度の目標を 8MHz × 1 ビットサンプリングデータ（K4, KSP システムの初期の標準サンプリングモード）の実時間処理に置き、開発当初はアルゴリズムの改良に専念し、可能な限り的高速化を追求した。その結果 1 ch データであれば実時間処理が可能な処理速度となった。

K5/VSSP システムは 1 ユニット（1 PC）あたり入力端子を 4ch 有しており、4 ユニット（PC）で測地観測に必要な 16ch をカバーしている。そこで 4ch あたりの処理速度が実用上の目安となるが、当時（2004 年）の汎用 PC では 4ch 分の 1 秒データの処理時間 2.8 秒が限界であった。しかし、PC 性能の著しい向上により、プログラムを改良することなく現在ではノート PC でも 4ch データの実時間処理が可能な処理速度となっている（図 3）。

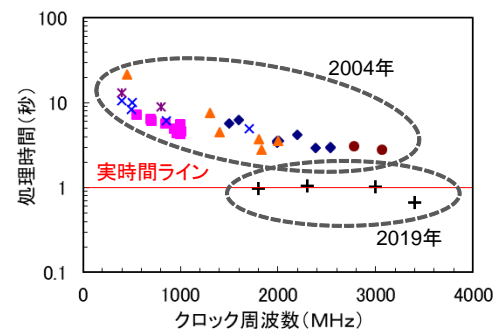


図 3. K5 ソフト相関器の処理速度の 2004 年と 2019 年の比較。8MHz × 1 ビット × 4ch サンプリングデータの 32 ラグ 1 秒積分に要する時間を 2004 年と 2019 年で比較している。シンボルの違いは CPU の種類の違いを示している。使用している PC は特殊なものではなく、ノート PC（ラップトップ PC）も含まれている。2019 年にはノート PC でも実時間処理が可能な処理速度となっている。

5 K5 と e-VLBI 実験

K5 システムは PC に通常のファイル形式で観測データを取り込むことからインターネットを介してのデータ転送を容易に行うことができる。K5 システムの開発当初はインターネットプロトコル（IP）を使い、サンプラーからのデータをネットワーク経由で直接遠隔局に転送することを目指したため IP-VLBI システムと呼んでいた。その後、米国グループから e-VLBI と呼ぼうという提案があり、現在ではネットワーク伝送方式の VLBI は e-VLBI と呼ばれている。

この e-VLBI 方式による日米基線での初実験は 2002 年 10 月 15 日、鹿島 34m アンテナとウェストフォード 20m

アンテナ間で実施された。この時、アメリカ側は Mark5 システムと言うハードディスク記録方式のシステムを使用し、データフォーマットも K5 システムとは異なっていたが、フォーマットの違いはソフト相関器により吸収され、フリンジ検出に成功することができた (図 4)。このようにソフト相関器の利点の 1 つはデータフォーマットの違いを容易に吸収できる点である。システム (特にハードウェア) 開発時にデータフォーマットに束縛されることがなかったのは大きな利点であったと言える。

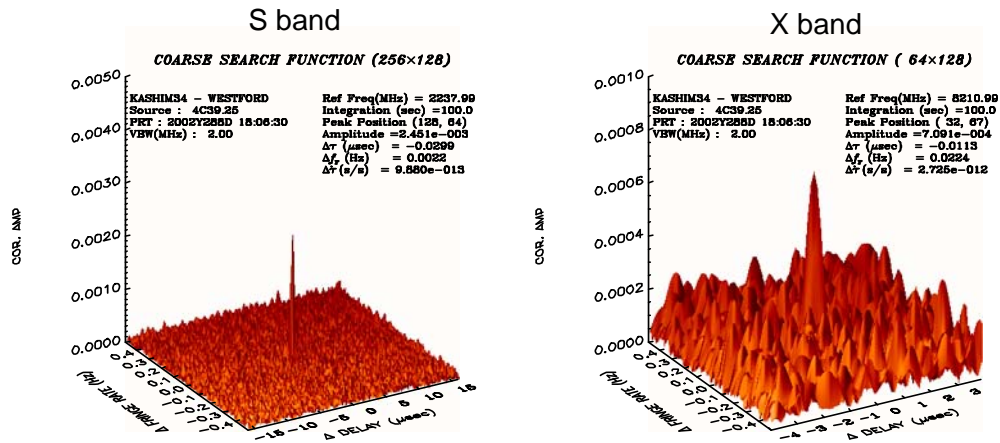


図 4. 日米 e-VLBI 実験で得られた初フリンジ。実験は 2002 年 10 月 15 日、鹿島 34m アンテナとウェストフォード 20m アンテナ間で実施された。使用した電波源は 4C39.25。

ネットワーク速度の向上もあり、現在では e-VLBI 方式によるデータ伝送とソフトウェア相関器による相関処理がごく普通に行われるようになってきている。海外では DiFX と呼ばれるソフト相関器^[3]で処理するのが主流となってきているが、DiFX はクラスター PC 群を必要とする。一方 K5 ソフト相関器は汎用の PC にインストールすることができ、PC1 台での処理が可能である。処理速度では劣るが、大量のデータ処理が必要な場合は、複数の PC を使用して分散処理を行うことにより対処可能である。

6 さいごに

K5/VSSP システムは低コストの VLBI 観測用サンプラーとして開発が開始された。通常の測地 VLBI 観測において K3 システムや K4 および KSP システムの後継機として使用されただけでなく、電波天文用のアンテナを有する大学においても使用され、VLBI 技術の普及に貢献してきた。

この K5/VSSP シリーズの開発に多大な貢献をしていただいた日本通信機 (株) の皆様に感謝いたします。

またここでは紹介しませんが K5/VSI シリーズ (ADS シリーズ) の開発に協力していただいた DIGITAL LINK 社およびコスモリサーチ (株)、更に広帯域 VLBI 観測用の ADX シリーズ開発に協力していただいたエレクトクス工業 (株) の皆様にこの場を借りて感謝いたします

参考文献

- [1] Kondo, T., J. Amagai, H. Kiuchi, and M. Tokumaru, Cross-correlation processing in a computer for VLBI fringe tests, J. Commun. Res. Lab., Vol.38, pp.503-512, 1991.
- [2] Kondo, T., Y. Koyama, R. Ichikawa, M. Sekido, E. Kawai, and M. Kimura, Development of the K5/VSSP System, J. Geodetic Soc. Japan, Vol.54, No.4, pp.233-248, 2008.
- [3] Deller, A. T., S. J. Tingay, M. Bailes, and C. West, DiFX: A Software Correlator for Very Long Baseline Interferometry Using Multiprocessor Computing Environments, Publications of the Astronomical Society of the Pacific, Vol.119, pp.318-336, 2007.