

## 研 究

## 3.2.2 データ取得系

木内 等\*<sup>1</sup> 関戸 衛\*<sup>2</sup> 中島 潤一\*<sup>2</sup>  
金子 明弘\*<sup>1</sup> 今江 理人\*<sup>3</sup>  
(1995年10月16日受理)

## 3.2.2 DATA ACQUISITION SYSTEM

By

Hitoshi KIUCHI, Mamoru SEKIDO, Junichi NAKAJIMA,  
Akihiro KANEKO, and Michito IMAE

We are developing a new VLBI system, which was specially designed for Key-Stone Project (Metropolitan area crustal deformation measurement project), and which supports the VLBA and the VSOP data acquisition mode. The new system consists of a local oscillator, a video converter, an input interface unit, an output interface unit, a data recorder and a digital mass-storage system. The required specifications for the new data acquisition system are (1) one and two-bit quantization capability, (2) sampling rate of up to 64 Mbps, (3) an image rejection ratio of better than 20 dB for the entire video bandwidth. These requirements are realized by a 64 Msps A/D converter with a threshold level control circuit, a digital filter, and a wide bandwidth image rejection mixer. By using this system, it is possible to improve the precision of the geodetic VLBI and contribute to radio astronomy VLBI.

[キーワード] KSP, イメージリジェクションミキサ, 量子化, コヒーレンス, デジタルマスタストレージ,  
KSP, IRM, Quantization, Coherence, Digital mass-storage.

## 1. はじめに

通信総合研究所では、プレートテクトニクス理論を実験により証明した VLBI (超長基線電波干渉計) 技術を用いた“首都圏広域地殻変動観測計画 Key Stone Project: KSP”を開始した。今後発生が危惧される首都圏での直下型地震予知に用いられる。この計画では、広帯域データを用いることで中型の 10 m アンテナで、ミリメートルオーダーの測位精度を目指している。今回は、この測位精度実現のためのデータ収集部を開発したので報告する。

## 2. システム設計

VLBI における測定精度は SNR (信号対雑音比) およびバンド幅合成に使用される有効帯域幅によって決定さ

れる。ビデオ周波数帯域幅の平方根に比例する SNR 向上のためには、1 チャンネルあたりのビデオ周波数帯域を拡大する必要があり、さらに有効帯域幅を増大するためには受信帯域幅の拡大が必要である。

新データ収集システムは、中口径 (10 m クラス) どのアンテナでも十分な測位解を得られるように考慮されなければならない。各局は、中口径のアンテナで、無人運用されミリメートル精度で測位解が得られることを前提条件とする。このため、以下のような項目を満たす必要がある。

- ① IF の広帯域化
- ② チャンネル毎のレベル調整
- ③ 熱設計/チャンネル間クロストークの軽減
- ④ サンプリング時の最適スレシールド設定
- ⑤ 多ビット量子化
- ⑥ 位相較正信号モニタ能力
- ⑦ 帯域内位相平坦性の追求
- ⑧ エラーレート監視/テープ残量監視

\*<sup>1</sup> 標準計測部 時空技術研究室\*<sup>2</sup> 関東支所 宇宙電波応用研究室\*<sup>3</sup> 標準計測部 周波数標準課

- ⑨ 従来システムとのテープ上でのデータ互換性
- ⑩ テープ有効利用のためのマルチ速度記録再生
- ⑪ Forward/Reverse の無い連続観測
- ⑫ 大容量マストレージ能力
- ⑬ 無人運用のための自動テープ交換能力
- ⑭ バーコードリーダ採用による自動テープ判別
- ⑮ フル GP-IB 制御

①～③は IF 信号をビデオ周波数に変換する部分の要求であり、④～⑨はデジタル化サンプリング部に対するもの、⑩～⑪はデータレコーダ部、⑫～⑭はマストレージ自動テープ交換部、⑮は全体に対する要求である。システム実現にあたり、現存システム及び計画中のシステムも考慮する必要がある。

このような要求性能と現在使用可能なデータレコーダの記録レート (256 Mbps) から計算される測定精度を見積もってみる。直径 (D) 10 m どおしのアンテナで仰角 6° 以上での測地 VLBI 実験を仮定する。効率 ( $\eta$ ) 60%, システム雑音 120 K ( $T_{sys}@ E1 = 45^\circ$ ), スルーイング 3°/sec という本計画で使用するアンテナより多少性能の低いアンテナを想定する。観測モードを 16 ch (X : 10, S : 6), 16 Mbps サンプリング, 積分時間 (T) 200 秒, 強度 (S) 2 Jy 以上の星を観測すると SNR は、次式で表され、

$$SNR = \frac{\pi \cdot D^2 \cdot \eta \cdot 2}{8k \cdot T_{sys} \cdot \pi} \cdot S \cdot \sqrt{2B_n T}$$

k : ボルツマン定数, n : チャンネル数  
 Xバンドで 32.4, Sバンドで 25.1 を得る。また, Xバンドの有効帯域幅を 364 MHz (IF 2 系統使用), Sバンドの有効帯域幅を 54 MHz, 24 時間で 200 観測 (N) とすると熱雑音誤差  $\sigma_n$  は, Xバンドで 13.5 psec, Sバンドで 117.4 ps となる。この結果, 得られる電離層補正誤差は次式で与えられる。

$$(1/13.4) \sqrt{(\sigma_{ns})^2 + (\sigma_{nx})^2}$$

電離層補正誤差は, 8.8 ps 程度であり誤差要因は以下のようなになる。

熱雑音誤差	15 ps	} 過去の 観測値 より
電離層補正誤差	10 ps	
大気ランダム誤差	50 ps	
モデル誤差	50 ps	
その他ハードウェア	30 ps	

RSS 約 80 ps

$$\text{水平方向推定位置誤差} = 3\sigma / \sqrt{N}$$

$$\text{鉛直方向推定位置誤差} = 7\sigma / \sqrt{N}$$

より, 2 Jy 以上の星を 24 時間観測することで

水平成分 = 5.1 mm

鉛直成分 = 1.2 cm の測定が十分に可能である。

この設計精度見積もりに則り, 以下のようなシステムを製作した。

### 3. データ収集装置

KSP 用 VLBI データ収集システムは, ローカル発振器, ビデオコンバータ, 入力インターフェース, データレコーダ, デジタルマストレージシステムから構成されている。これは, 当所で開発された K-4 システムと同一思想である。第 1 図に KSP データ収集架の全体図を示す。また, 第 2 図にブロック図を示す。

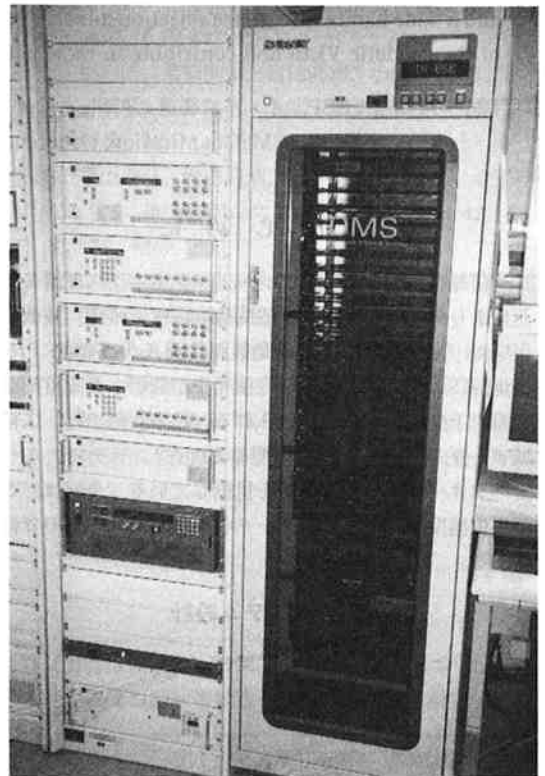
2 章で検討した要求を満たすために以下の性能を持たせた。

[I] ローカル発振器, ビデオコンバータ

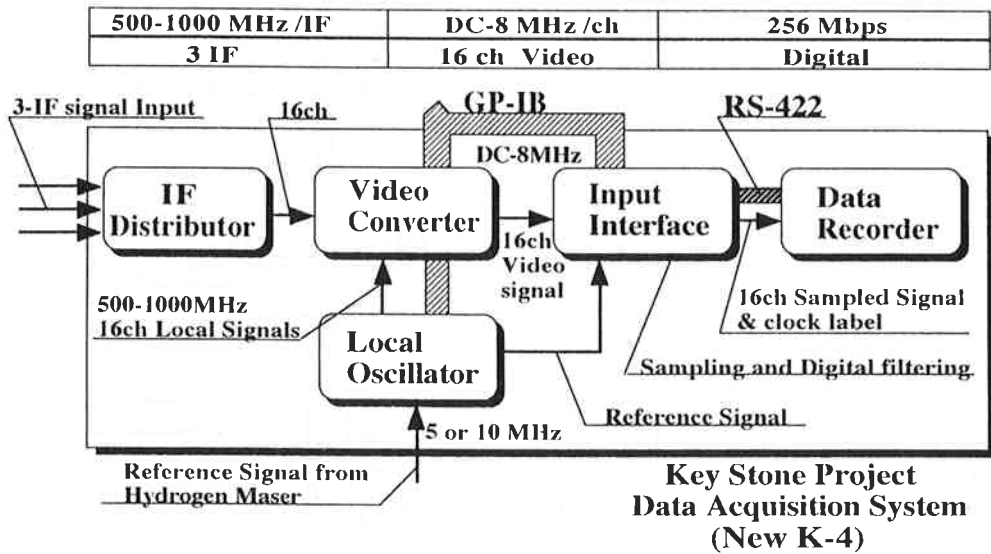
- ① 広帯域化のために IF (500 ~ 1000 MHz) 3 系統入力
- ② チャンネル毎にレベル調整アッテネータ設置
- ③ 5 年 10 年という長期連続使用を考慮し, 熱設計 / チャンネルクロストークの軽減を行なった。

[II] 入力インターフェース

- ④ 入力信号レベルに応じてサンプリング時の最適スレ



第 1 図 観測システム外観



第2図 観測システムブロック図

シールド設定能力 (リモート制御)

- ⑤ サンプリング速度 64 Mbps A/D による 1~8 ビット量子化能力
- ⑥ 2チャンネル分の位相較正信号モニタ能力
- ⑦ 帯域内位相平坦性の追求によりデジタルフィルタの採用
- ⑧ エラーレート監視/テープ残量監視
- ⑨ 従来システムとのテープ上でのデータ完全互換性 (従来局とのネットワーク化/従来装置での観測処理)

[III] データレコーダ部

- ⑩ テープ有効利用のためのマルチ速度記録再生
- ⑪ Forward/Reverse の無い連続観測

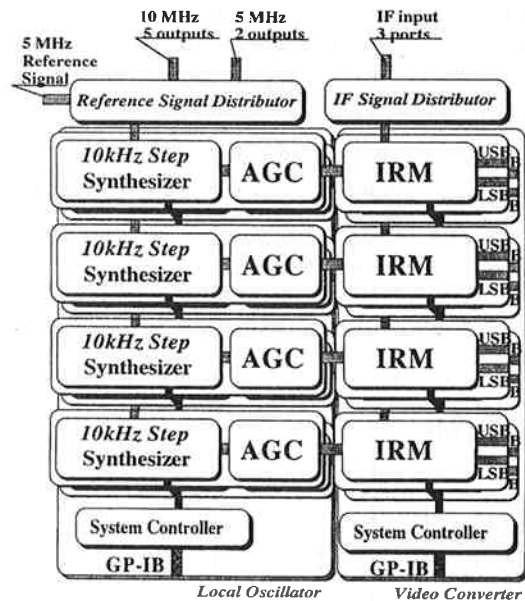
[IV] デジタルマスストレージシステム

- ⑫ 大容量マスストレージ (Lカセット 24 巻収納)
- ⑬ 無人運用のための自動テープ交換能力
- ⑭ バーコードリーダ採用による自動テープ判別 (テープのスケジュールによる指定又はテープ ID のログへの記録)

[V] 全システムを通して,

- ⑮ フル GP-IB 制御可能

その結果, 最大記録レート 256 Mbps・記録容量 770 Gbit のデータレコーダを核とし, 16 Mbps, 16 ch のデータを取得する他に類を見ない VLBI システムと



第3図 ローカル発振器・ビデオ変換器ブロック図

なった。このシステムは, VLBA, VSOP 両観測モードを包含している。

これらは, 測地目的ばかりでなく天文観測にも広く使用できるように配慮されている。以下, 各装置の詳細について説明する。

3.1. ビデオ変換器とローカル発振器

第3図にビデオ変換器とローカル発振器部分のブロッ

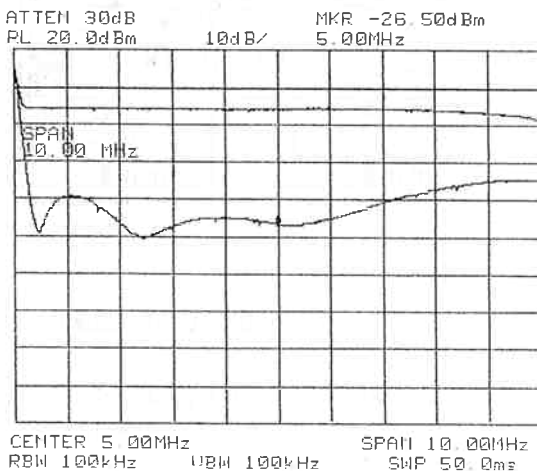
ク図を示す。ローカル発振器は、ビデオコンバータのために専用に開発された16チャンネル出力を持つ発振器であり、10 kHz ステップで500 ~ 1000 MHz の発振を行う。負加による位相変動を抑えるために自動ゲイン調節機能 (AGC) を備えている。測定された位相雑音は、アラン分散換算で3度以下である。位相雑音から計算されるコヒーレンスロス $\alpha$ は0.004% 以下に抑えられている。周波数設定等は、フロントパネルからローカル状態 $\alpha$ で、或いは GPIB 経由でのリモート制御で行われる。

ビデオ変換器は、500 ~ 1000 MHz の IF 信号の中から任意の周波数をビデオ帯域 (0 ~ 32 MHz) に切り出す操作を行う。このビデオ信号は16チャンネル用意されており、広帯域バンド幅合成 (本特集号 3.4.3. バンド幅合成ソフトウェア参照) に威力を発揮している。

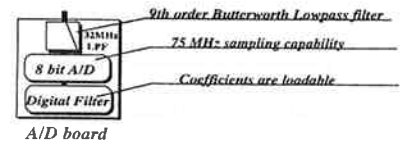
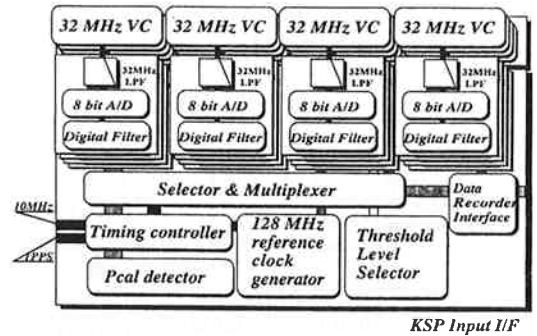
周波数変換は、イメージリジェクションミキサを用いて、シングルサイドバンド変換で行われる。不要側波帯と希望側波帯の信号比 (イメージリジェクション比) は、ビデオ帯域内において 20 dB 以上である。第4図に測定されたイメージリジェクション比を示す。横軸はリニアスケールで周波数を示し、縦軸はログスケールで検出パワーを示している。上部曲線は希望波の検出パワーを示し、中部曲線は不要波 (イメージ波) の検出パワーを示す。上記2曲線の差がイメージリジェクション比にあたる。測定された結果は、十分に要求を満たすものであり、イメージ信号の漏れ込みによるコヒーレンスの低下を 0.72% 以下に抑えている。

3.2. 入力インターフェース

第5図に入力インターフェースのブロック図を示す。入力インターフェースは、16チャンネル分のビデオ信号



第4図 イメージリジェクション測定結果 (横軸周波数、縦軸検出レベル)



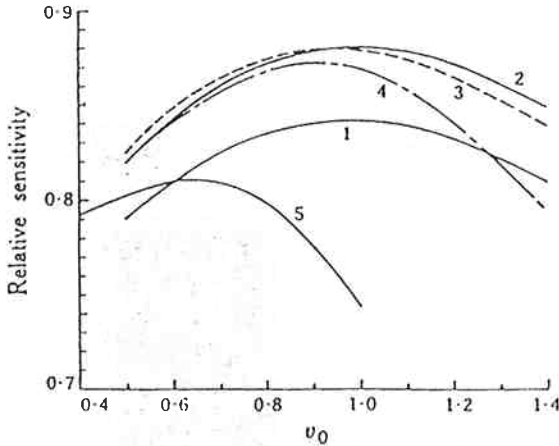
第5図 入力インターフェースブロック図

をサンプリングし、タイムコードブロックと共にデータレコーダへ送出する。最高データレートは、256 Mbps である。観測の最初に付加されるタイムコードブロックを除いて全てサンプリングされたデータのみで構成されている。また、従来の K-4 システムとの整合性を考え、従来のフォーマットでのタイムスタンプ付の出力も用意されている。

従来ビデオ信号は、サンプリング時の折り返し雑音やアンダーサンプリングを防ぐため、帯域制限後ナイキスト周波数でサンプリングされていた。フィルタには位相変動の少ない (群遅延への影響を抑えた) 7 次のバターワースフィルタを用いているが、折り返し雑音 (エリアシングノイズ)、不完全フィルタリングによるコヒーレンスロスの発生が起こっていた。

測地においては、ビデオ信号帯域内周波数特性が平坦であり、帯域中央で帯域内全位相 (群遅延量) が代表できることが重要である。今回のシステムでは、A/D 変換後にデジタルフィルタを採用した。新システムでは、サンプリングの前に 32 MHz アンチエリアシングフィルタを設け 8 ビット・64 Mbps サンプリングの A/D 変換器でサンプリングを行う。この A/D 変換器は、しきい値レベルを設定でき、入力レベルに応じた最適なサンプリングを行うことができる。

ここで最適サンプリングについて触れておく。量子化をしないで Nyquist rate でサンプリングした場合の SNR を  $R_{SNRO}$  とし、4 レベル (2 ビット) で Nyquist rate でサンプリングした場合の SNR を  $R_{SNR4}$  とすると、これらの比 ( $R_{SNR4}/R_{SNRO}$ ) を効率  $\eta$  として定義でき



第6図 最適サンプリング (Cooper, 1970)

る。また、2ビットのサンプリング場合、上位ビットが極性を示し下位ビットが振幅情報を表す。この場合、入力信号強度とスレッシュドレベルとの兼ね合いで、系の効率の最適化を図らねばならない。Cooper (1970年)によると、下位ビットと上位ビットの振幅比を  $n$  とし入力信号振幅を  $v$  とすると第6図のような特性が得られる。入力信号が Gaussian 関数分布 (平均0, 分散 $\sigma^2$ ) であることを仮定すると  $v$  と  $\sigma$  と  $n$  の関数を求めることができる。

第6図より最も効率が良いのは、

•  $n = 3, v = \sigma$

•  $n = 4, v = 0.95\sigma$

の場合であり、いずれも  $\eta = 0.88$  が得られる。逆に最適スレッシュドを選ばなければ2ビットでサンプリングしても効率88%は得られないことになる。2ビットサンプリングでは、ウエイト  $n$  が3または4の場合が有利であり、本システムでは、従来の1ビットサンプリングデータとの整合性を考え、4レベル ( $n=4$ ) の量子化を当面の目標と考えている。VLBIでは1ビット量子化あるいは2ビット量子化が一般的であり、入力信号レベル (ガウス分布) に対し  $0.95\sigma$  のスレッシュドレベルでサンプリングするのが最適である。現在使用されているVLBIシステムでは、ビデオ信号出力は0 dBm 標準なので、 $\sigma = 0.224 [V]$  と設定することができる。本システムでは、計算機制御でこのスレッシュドレベルの設定を行うことができる。その他、サンプリング時のアパチャジッタ、不感帯、ヒステリシス (1 mV 以下) などによるロスにも考慮し設計を行った。

サンプリング後の16 MHz, 8 MHzなどのフィルタリングは、デジタルフィルタによって行われる。デジタルフィルタは位相特性に優れ、信号のコヒーレンスの維持

Sensitivities of two-bit correlators relative to a continuous correlator as a function of the normalized high-low transition voltage:

- 1, Full two-bit system,  $n = 2$
- 2, Full two-bit system,  $n = 3$
- 3, Full two-bit system,  $n = 4$
- 4, Low level products deleted,  $n = 3$ ; the curve for  $n = 4$  is indistinguishable from this
- 5, High level products only retained.

Number of input channel	Sampling rate [Hz]				1 bit (2-level)	
	Data recording rate [bps]					
	256 M	128 M	64 M	32 M	16 M	
16 ch	16 M**	8 M***	4 M***	2 M*	1 M*	
8 ch	32 M**	16 M	8 M	4 M	2 M	
4 ch	64 M	32 M	16 M	8 M	4 M	
2 ch		64 M vs	32 M	16 M	8 M	
1 ch			64 M	32 M	16 M	

Number of input channel	Sampling rate [Hz]				2 bit (4-level)	
	Data recording rate [bps]					
	256 M	128 M	64 M	32 M	16 M	
16 ch	8 M**	4 M**	2 M	1 M	0.5 M	
8 ch	16 M**	8 M	4 M	2 M	1 M	
4 ch	32 M**	16 M	8 M	4 M	2 M	
2 ch	64 M	32 M	16 M	8 M	4 M	
1 ch		64 M vs	32 M	16 M	8 M	

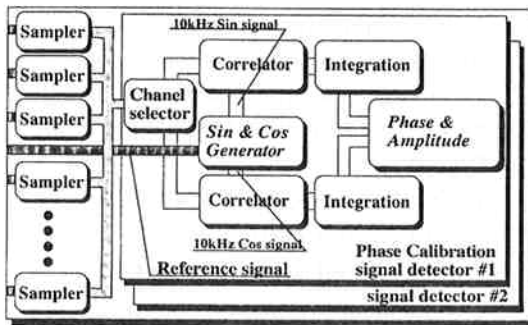
第7図 サンプリングモード

にも有効である。

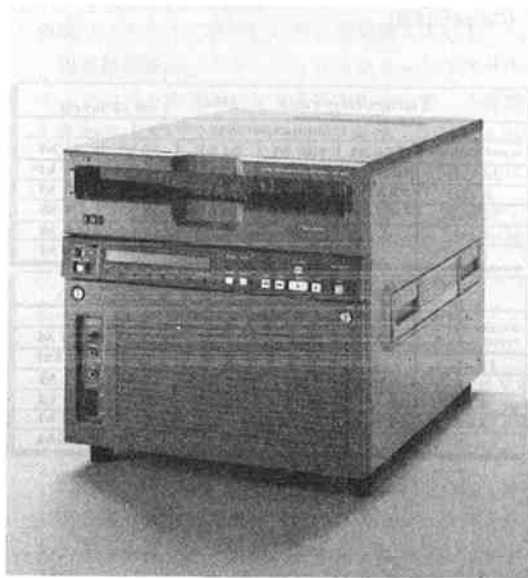
また、デジタルフィルタは、予め用意してある係数 (ROMとして内包) 以外をロードして、例えばラインスペクトル観測時に有効なバンドパスフィルタを形成するなど好みのフィルタとして使用可能である。

我々は、8ビットのA/D変換器を用いデジタルフィルタ後に1ビットあるいは2ビット化を行っている。これにより、良いリニアリティの維持が可能となった。サンプリングモードを第7図に示す。これによりMark-III, VLBA, VSOPの観測モードに対応可能である。図中“\*”はMark-IIIを、“\*\*\*”はVLBAを、“vs”はVSOP観測モードを示す。更に4ビット、8ビットサンプリングモードが用意されている。これらは、VLBI用というより一般データ収集を考慮したものである。

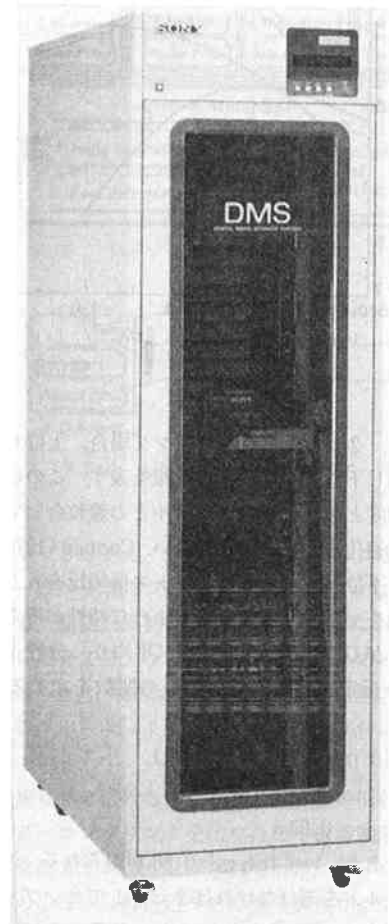
また、システムチェック、レベル合わせなどに有効な用に遅延較正信号 (Pcal) の検出能力を持たせた。この検出方法は、相関器内部で実際に行っているのと等価な



第8図 位相較正信号 (Pcal) 検出回路



第9図 データレコーダ



第10図 マスストレージシステム (DMS)

方式で行われている。ブロック図を第8図に示す。観測者は、16チャンネルの内好きな2チャンネルのモニタを常時行える。この結果は、フロントパネル及びリモート制御にて読み出し可能である。

この入力インターフェースは、VSOP用のデータ収集装置として天文台に採用された。

### 3.3. データレコーダ

微弱な信号を扱うVLBIでは膨大なデータを扱うことが避けられない。取得データは、第9図に示すデータレコーダで記録されるが、従来の記録レート64 Mbps、1回の24時間実験で3テラ ( $10^{12}$ ) bit以上の膨大なデータを記録しなければならない。そこでK-4システムでは、現在のデータレコーダの最先端と考えられるD-1タイプのヘリカルスキャンカセットデータレコー

ダを採用した。この選択は、従来のK-3 VLBIシステムや米国のシステムが真空コラム方式の固定ヘッドオープンリールデータレコーダであったのに比べ格段の変革といえる。記録は、ID-1フォーマット (American National Standard 19 mm Type ID-1 Instrumentation Digital Cassette Format) と呼ばれる世界統一フォーマットで行われる。Lカセットを用いた場合、770 Gbits (計算機テープの2000巻相当) 以上の記録容量を持つ。これは、64 Mbps記録で200分以上の連続記録時間に相当する。記録・再生レートは、256 Mbps, 128 Mbps, 64 Mbps, ……など選択可能である。KSPでは、主に256 Mbpsを用い、従来システムを混在させた観測を行う際には64 Mbpsを用いる。リードソロンエラーコレクションを始めとする強力なエラー訂正などにより、エ

ラーレート  $1 \times 10^{-10}$  以下を達成している。また、記録ヘッドの直後に再生ヘッドがあるので常時エラーレートの監視も可能となっている。また、自己診断機能も組み込まれており、ハードウェアトラブル・オペレーションエラーなどを監視可能である。エラーメッセージ及び警告を計算機及び表面パネルに表示可能である。

### 3.4. デジタルマスストレージシステム

各局での運用は、無人運用を原則としているために、テープの自動交換の必要性が生じる。今回採用したデジタルマスストレージシステム(第10図)は、Lカセット24巻を収納し、全体で18テラビット以上の容量を持つ。テープは全て棚番号及びテープのバーコードにより管理されており、観測番号とテープの関連付けをログ上に記録することができる。このデジタルマスストレージシステムは、データレコーダを1台もしくは2台実装できる。観測局では、1台実装状態で使用している。制御バス系を GPIB とするために専用の GPIB・RS 422 バス変換器を製作した。

## 4. ま と め

今回は、首都圏広域地殻変動モニタ計画(KSP)において用いられている VLBI データ収集装置について報告した。データレコーダ、デジタルマスストレージシステムには、現在世界的に見てトップレベルの民生機器を採用している。これは、全世界的なメンテナンス体制と信頼性を享受する事ができる利点がある。それ以外の機

器は VLBI 特有の性能を要求され、全て新規開発を行った。データ収集装置、相関処理装置等は、通総研仕様の GPIB コマンド体系で統一されている。全ての機器(アンテナから相関器まで)は、GPIB により制御される。

今回開発した機器の一部は、VSOP 計画で採用されるなど、今後も他プロジェクトへの貢献が期待できる。

## 謝 辞

本システム設計・製作にあたっては、SONY(株)、日本通信機(株)にお世話になりました。

## 参 考 文 献

- (1) 木内他, "256 Mbps のデータレートを有した新 VLBI システムの開発", 1993 測地学会講演会.
- (2) 電波研究所季報, "K-3 型超長基線電波干渉計 (VLBI) システム開発特集号", Vol. 30, No.1, 1984.
- (3) Cooper, "Correlators with Two-bit quantization", *Ast.J.Phys.*, 23, 1970.
- (4) H.Kiuchi, Y.Sugimoto, M.Imae, N.Kurihara, T. Yoshino, F.Takahashi, S.Hama, Y.Takahashi, H. Takaba, T.Iwata, Y.Koyama, Y.Hanado, M.Sekido, J.Nakajima, T.Kondo, J.Amagai, A.Kaneko, "The Western Pacific Geodetic Projects Data Acquisition and Prossing System", 42, 1, *J. of the CRL Mar.*, 1995.