

研 究

3.4 データ処理システム

3.4.1 相関処理装置

木内 等*1 高橋 幸雄*2 近藤 哲朗*2 関戸 衛*2
中島 潤一*2 今江 理人*3 浜 真一*1

(1995年10月16日受理)

3.4 DATA PROCESSING SYSTEM

3.4.1 CORRELATION PROCESSING SYSTEM

By

Hitoshi KIUCHI, Yukio TAKAHASHI, Tetsuro KONDO, Mamoru SEKIDO,
Junichi NAKAJIMA, Michito IMAE, and Shin'ichi HAMA

We are developing an XF type VLBI correlation processor by making use of a Field Programmable Gate Array, this correlator was specially designed for the Key-Stone Project, which is concerned with measuring crustal deformation in the Metropolitan area. The outline of the correlator is (1) Automatic bit synchronization during multi-baseline processing, (2) Network filing System for storing correlated data, (3) maximum data rate is 256 Mbps, (4) 2-bit sampled data processing capability, (5) 16 ch high speed (32 Mbps/channel) processing, (6) Compact and light-weight, (7) signal provided by VME back plane. Using this new correlator, we can improve the precision of the geodetic VLBI and also contribute to radio astronomy VLBI.

[キーワード] KSP, 相関器, FPGA, フリンジ, 予測値計算.

KSP, Correlation processor, FPGA, Fringe, A priori.

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測により証明した 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に FPGA の特性を活かした相関処理装置を開発したので報告する。

2. 相 関 処 理

相関処理は、観測によって得られたデータ中の大部分をしめる雑音成分を除去し、1 観測あたりの遅延時間、遅延時間変化率を求めるための一連の処理のことをいう。各 VLBI 局で収集されたデータは、相関解析局に集められ、相関処理が行われる。この時、積分時間内で地球回転により生じるドップラ分の補正を行いながら相互相関、積分処理を行わなければならない。この処理は計算機上で行うにはあまりにも膨大であり、相関器と呼ばれる専用のハードウェアが必要となる。

受信データのほとんどが相関の無い受信器の熱雑音で占められているが、同一の電波源を観測しているので、データ中には必ず相関のある共通の信号成分が含まれている。2 局で受信した信号から同じ信号を見出し、信号の到達時間差を測定するには、相互相関スペクトルの計算が行われる。そしてこれの位相スペクトルを周波数で微分したものが遅延時間となるわけである。この量は

*1 標準計測部 時空技術研究室

*2 関東支所 宇宙電波応用研究室

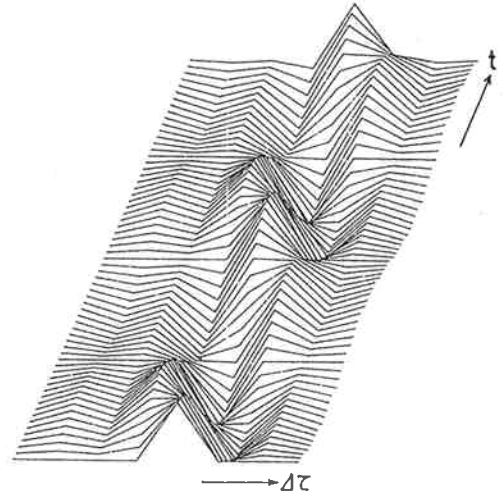
*3 標準計測部 周波数標準課

測地 VLBI の基線解析に用いられる。

相関の大きさや位相は電波源の強度や構造に関するデータを含んでいるので電波天文に於いて重要な測定量となる。天空上の電波源の輝度分布のフーリエ成分が相関の大きさや位相として測定できるので、このフーリエ成分を空間の種々の点でサンプリングして逆フーリエ変換を施してやれば電波源の像を再生する事ができることになる。これは、電波源のマッピングとして天文学者の興味を引いている。いずれの場合でも相関処理は、VLBI の幅広い応用を可能にする最も基本的な観測を提供する。そのためには、観測されたデータ対から“相関の山”を見出すことが第一に必要なことである。

測地 VLBI では、2つの受信信号の遅れ時間を計測することが重要であり、相関強度情報の重要性は多少低いものとして扱われている。電波天文 VLBI では、この関係が逆転する。突き詰めると測地 VLBI では遅れ時間、すなわち相関位相が重要であるので振幅に関する情報を多少失っても位相情報（ゼロクロス点）が保持されればよいことになる。さらにデータ量を減らすために1ビットサンプリング（信号電圧 正：1，負：0）が主流となっている。1ビットサンプリングにおいても相関係数は一定係数（ $2/\pi$ ）だけ小さくなるだけで相関関数の形は変わらない。1ビットサンプリングにより相関処理は著しく簡素化され、地球回転の影響がなければ排他的論理和と積分カウンタだけで事足りてしまう（第1図）。

遅延時間及び受信周波数が相関積分時間（300秒程度）内で一定ならば上記の簡単な相関積分器でデータ処理を行えるが、実際には相関積分している間にも地球は時々刻々回転してしまう。2局で受信した電波は各々地球回転により受けるドップラ周波数が異なり、地球回転によるドップラシフトの影響を補正しなければ積分操作中に2局のドップラ周波数の差としてのビートに相当する量で相互相関のパターンが回転を起し、相関を得ることができない（第2図）。この量は、電波星と2局の



第2図 フリンジ回転がある場合の相関結果

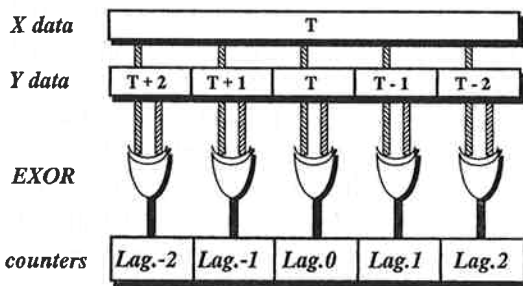
幾何学的な位置関係により得られた r_g の時間微分 $d(r_g)/dt$ と角周波数の積として表される。

受信信号が 8 GHz で 2 局が地球規模の基線をとる場合、相関信号は数 100 Hz 程度の位相の回転としてあらわれる。このため、特定のラグで相関値を時間方向に積分しただけでは、相関値がゼロとして観測されてしまう。これを防ぐためには、2局のデータ中のドップラ周波数に相当する量を計算してあらかじめ掛け合わせておく必要がある（フリンジストップング）。また地球回転による遅延時間の変化を追尾する回路も相関器に必要な（遅延追尾）。

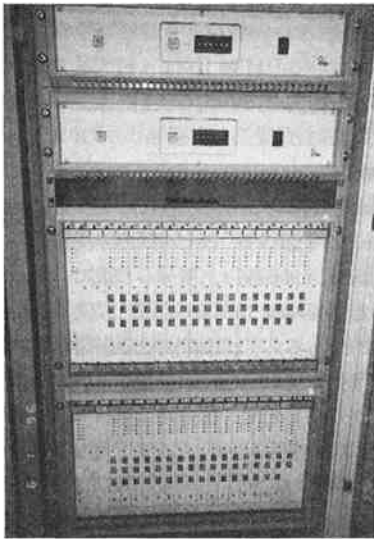
実際には相関器内部に於いて2局の地球回転によるドップラ差をデジタル的に発生させ、信号の相互相関時に掛け合わせることによってドップラの補正を行っている。ここでもデジタル的に行われる地球回転補正時に生じるコヒーレンスの低下を極力抑える方式がとられている。測地用の相関器は時間軸上で相互相関、地球回転補正を行っている（XF型相関器と呼ばれる）。天文用相関器は、周波数成分に変換後、積・クロススペクトルをとり周波数軸上で補正を行うことが多い（FX型相関器と呼ばれる）。この場合、FFTを行うためのデータポイント収集時に位相回転が無視できることが要求される。

3. 相関処理装置

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



第1図 排他的論理和（EXOR）のみの相関器

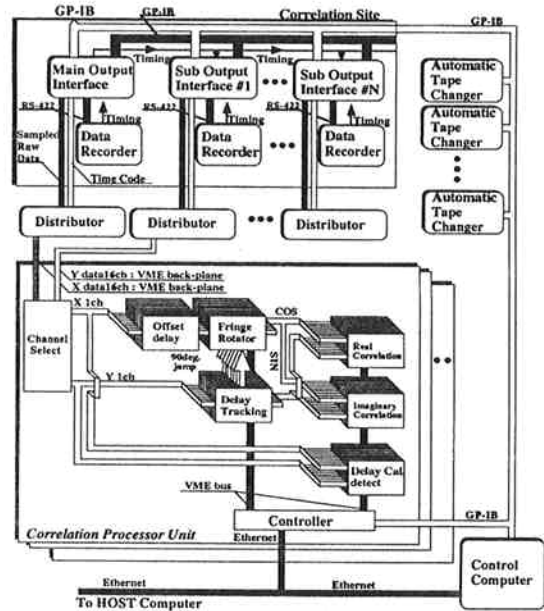


第3図 相関システム外観

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。本装置は、最大記録レート 256 Mbps・記録容量 770 Gbit のデータレコーダを有し、16 Mbps, 16 ch のデータを取得する他に類を見ない VLBI システムである。通信総合研究所では、VLBA や VSOP データ収集モードを包含した新しい VLBI データ収集システムを開発した⁽¹⁾。このシステムでは、1 ビット及び 2 ビット量子化は VLBI 用に、4 ビット及び 8 ビット量子化は、汎用のデータ収集用に考慮されている。最高速データレートは、256 Mbps であり、これに適応した新しい相関器を今回開発した。

このシステムは、VLBA, VSOP 両観測モードを包含しており、出力インターフェース、データレコーダ、多基線相関器、制御計算機から構成されている。外観を第3図に示す。また、ブロック図を第4図に示す。

相関処理システムの特徴としては、



第4図 相関システムブロック図

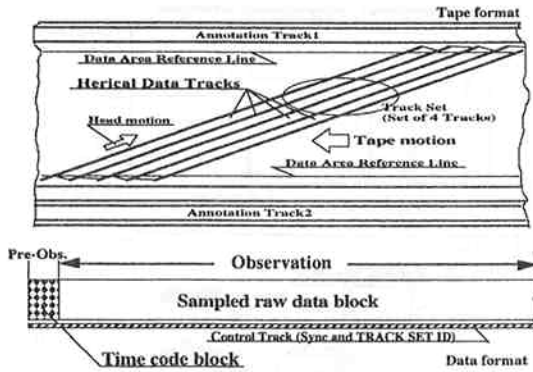
- ・ XF タイプ複素相関処理装置
- ・ ビット単位の自動調走
- ・ 多基線対応
- ・ NFS (Network Filing System) の採用 (Ethernet によるデータ転送)
- ・ 32 複素ラグ / ch
- ・ 多ビット相関能力 (初期設定で 1 ビット及び 2 ビット対応)

- ・ 16 チャンネル対応
 - ・ 32 Mbps/ch の高速処理
 - ・ VME バックプレーンによる VLBI データ転送の採用
 - ・ 相関器内部でのアプリオリ値計算
- などが挙げられる。上記記述から明らかなように相関器本体としては、512 Mbps のデータレートに対応している。これは、今後予想されるデータレコーダの倍速化、リアルタイム VLBI をにらんでの配慮である。

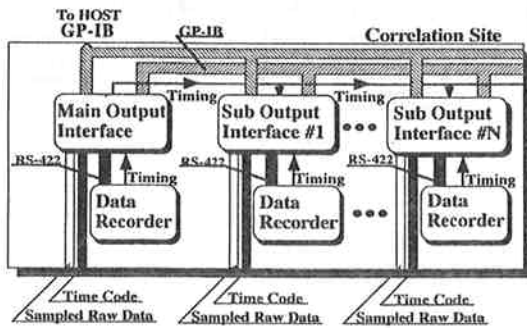
次に各デバイスを詳細にみていくことにする。

3.1 出力インターフェース (Output Interface)

周期的にデータ中に挿入されたタイムコードは、天文観測時特にライン観測時に悪影響を及ぼす。データとしては、サンプリング時刻の分かったサンプリングデータのみが求められる。KSP で採用したデータレコーダには、ヘリカルデータトラックの他に 2 つの長手記録されるアノテーショントラックとコントロールトラックがある (第5図)。コントロールトラックには“トラックセッ



第5図 テープフォーマット



第6図 出力インターフェースブロック図

ト ID” と呼ばれるヘリカルヘッドに同期したアドレスが書き込まれている。このアドレスはテープ再生時とはもとより、巻き戻し・早送りなど如何なる状態でも読み出す事が可能である。出力インターフェースは、このトラックセット ID を用いながら複数台のデータレコーダの同期運転を行い、再生データを相関器へ送出する機能を持っている。同期にあたっては、データ中の時刻とトラックセット ID とを対応付け、データの 1 ビット単位での調走操作を行わなくてはならない。このために、データ中に観測の始めに時刻コードブロックを挿入し、これを出力インターフェースで再生する事によりトラックセット ID との関連づけを行いビット単位での調走を実現させている。タイムコードブロックは、実験開始時 1 度だけ数秒間挿入されるもので周期性はない。同期達成後は、サンプリングされた生データのみが出力インターフェースから出力される。今回の出力インターフェースは、既存の K-4 システムで記録したタイムスタンプの入ったデータの再生も可能なように配慮されている。つまり、旧システムとの混合相関、既存データの再処理などが可能であり、テープベースでの完全互換性

を確保している。

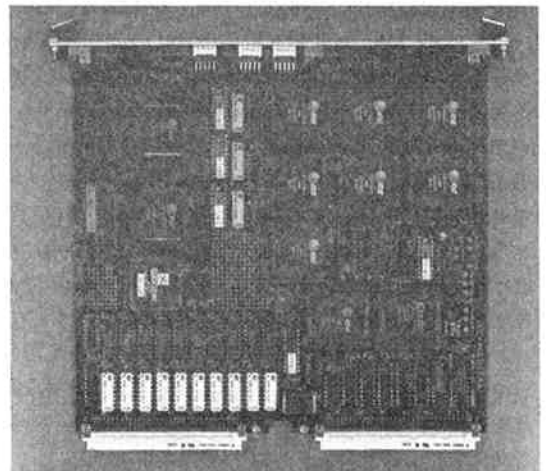
多基線相関処理においては、全ての出力インターフェースが GPIB、タイミングコントロールラインにより鎖のように接続される。ブロック図を第 6 図に示す。これにより、テープ位置情報、ステータス、タイミング等のインターフェース間でのやり取りが行える。これにより、メインの出力インターフェースを基準として、サブの出力インターフェースが調走行動を起こし、1 ビット単位での制御が可能となる。

3.2 信号分配部 (Distributor)

出力インターフェースからの出力を多基線相関処理のために分配する装置である。この装置は、分配を行う機能の他にデータレコーダの ID を時刻信号の後に挿入する機能を持っている。この ID は、相関器フロントパネルに表示され、相関の行われている局どうしの識別を容易に行うことができる。

3.3 相関器 (Correlation Processor)

VLBI では、受信する星からの信号が微弱なため、収集されたデータの 99.99% 以上が局内の受信系自身から発生する雑音で、200 秒以上積分した後でも星からの信号どうしの相関振幅は 10^{-4} から 10^{-3} 程度しか得られないのが一般的である。VLBI における相関処理は、信号相関積分時間内で地球回転により生じるドップラ分の補正を行いながら相互相関、積分処理を行わなければならない。従来、この相関処理は、各 ch あたり 6 層基板 3 枚で構成される約 700 個の IC を必要とし、最高動作クロック 8 MHz のものであった。新相関処理装置では主に FPGA で回路を構成した。第 7 図に実装の様子を示す。本装置は、16 ch 構成であり、32 MHz クロック動作



第7図 VME ボード上の実装

可能で、従来システムの4倍の復素相関ラグを持ったシステムを各chあたりVMEボード1枚で実現している。また、各FPGAの特性を活かし、高速処理の必要な部位にはクイックロジックを、集積度・多入出力信号を必要とするところにはLCA、オルカ等を採用している。

今回のような相関器を実現する場合通常は、ASIC (Application Specific IC) の内でもフルカスタム IC を開発し用いることが一般的である。今回、相関器を構成する主デバイスとしてFPGA (Field Programmable Gate Arrays) を採用し、専用のICの開発を行わなかった。これは、KSP計画では短開発期間で高精度測位解を得られるシステムとする必要性があり、デバッグ期間の最短化を図らねばならない経緯もあった。現在FPGA技術の発達は目覚ましく、32MHzクロック動作可能、回路修正が容易、経費がかからない、開発期間が短いなどカスタムICでの高速性、高集積性と比較しても魅力のあるデバイスである。

今回の相関器では周波数によらない遅延追尾部を一つにまとめる方式を採用した。その結果相関器本体は、入力ユニット、相関ユニット、制御ユニットからなり、全てVMEバス及び専用の相関バスによりインターフェースされる。本相関器の特徴は、

- ・入力クロック 32 MHz (max)
- ・相関チャンネル数 16
- ・パラメータ積分時間 1~16秒 (1秒刻み)
- ・遅延追尾 256 kbit
- ・フリンジ回転精度 32 bit
- ・ラグ数 32 複素ラグ / c h
- ・サーチラグ数 512 複素ラグ (ラグ連結時)
- ・制御CPU MC 68040
- ・電源投入時自動FPGAデバイスコンフィグレーション

などである。

次に各ユニットの機能をより詳細に見てみる。

(1) 入力ユニット

- ・X, Y局のクロック, タイムコード, レコーダIDの抽出
- ・YデータのXクロックでの同期
- ・積分開始タイミング, 相関積分時間タイミングの供給
- ・オフセット遅延 (Offset Delay)

X局データを最大256 kbit分遅延させる。通常128 kbit遅延として用いる。多基線相関処理の場合、基準局(X局)とY局で幾何学的遅延量に正負が生じる。この除去に2局1基線時のようなテープの遅延操作を用いることはできない。そのためX, Y両局データをバッファリングし辻褄を合わせる操作が必要となる。

・遅延追尾 (Delay Tracking)

Y局データを最大256 kbit遅延させることができ、128 kbitの時にオフセット遅延部との絡みでラグ0に相当する遅延を生み出す。ビットシフトは、この点を基準として±128 kbitの範囲で制御可能である。

(2) 相関ユニット

・16チャンネルデータから指定された1チャンネルデータの選択 (Channel Select)

・フリンジ回転 (Fringe Rotator)

32 bitカウンタで構成され上位4ビットでROMにアクセスし、SIN, COS, SINbl, COSblの信号を発生する。このSIN, COS信号は、フリンジ回転信号のSIN成分, COS成分に相当する。SINbl, COSbl信号は、ブランク信号と呼ばれ、後述の積分カウンタをホールドする機能を持つ。この信号のおかげでデジタル2レベル(1,0)の2信号を用いることでSIN関数の3レベル(-1, 0, +1)近似が可能となっている。

・90度ジャンプ制御 (90 deg. Jump)

遅延追尾からのタイミングを受け、フリンジ位相を90度ジャンプさせる。デジタル的な遅延追尾とフリンジロータを関連づけコヒーレンスロスを減らすことができる。通常観測帯域の中心周波数でフリンジを止める操作をするが、観測帯域の両端では当然辻褄が合わなくなり、これがコヒーレンスロスの原因となる。このロスは、通常約13%のロスであり、90度ジャンプを採用すると3.4%のロスに抑えることができる。

・相関積分 (Real/Imaginary Correlation)

複素32 bitのカウンタを持ち、パラメータ積分期間毎に積分値が読み出される。カウント値読み出しと同時にカウントはゼロにセットされる。K-3相関器のように前の値との差を求める必要はない。積分カウンタは、ブランク信号でカウンタ停止状態になる。

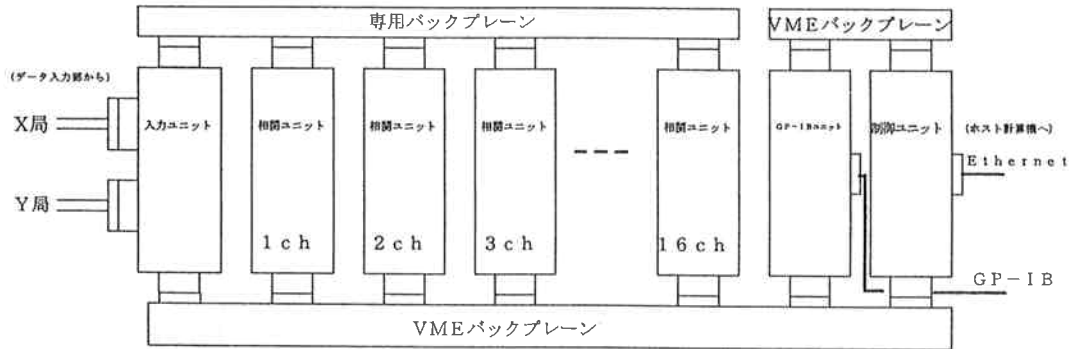
・Pcal検出 (Delay Cal Detect)

バンド幅合成に欠かせない遅延校正信号 (Pcal) をチャンネル毎に検出を行う。SIN関数の2レベル近似値を用いて検出される。フリンジロータ等の影響は入り込まない。

(3) 制御ユニット (Controller)

・予測値計算

従来HOST計算機が毎積分時間毎に計算していた長周期極運動, 日周運動, 章動, 歳差, 光行差, UT1-UTC, クロック差などの予測値計算を全て制御ユニットで行う。CPUには、MC 68040とリアルタイムOSを採用し、データ上の時刻に対応した予測値を各相関器内部で独立に計算している。これにより多基線化を行ってもHOSTの負担は殆ど無い。予測値計算についての詳



第8図 VMEバックプレーンによる接続

細は、“K-3型超長基線電波干渉計(VLBI)システム開発特集号”に詳細に報告済みであるので、そちらを参考にして頂きたい。他の機能としては、

- ・制御計算機との通信
- ・相関開始制御

調走終了後、データ中に相関開始時刻を検出すると相関積分を開始する。

- ・Ethernetを介してデータ出力することにより、HOSTとの間でNetwork Filing Systemを構築している。

制御計算機からの制御は GPIB で、データの出力は Ethernet でと、バスの特性を生かした方式を採用している。

(4) その他

VMEバックプレーンを全面的に採用した。各ユニットの制御はVMEバスが用いられ、信号のやり取りには、VMEバスユーザエリアが用いられる(第8図)。

相関データの送出にはEthernetが使用され、HOST計算機のハードディスクに直接書き込むことができる。従来データ転送がネックとなっていた相関処理において、10基線程度までの拡張に問題無くなった。

3.4 制御計算機(Control Computer)

HOST計算機と相関処理システムの間位置し、相関処理システムの統合・制御を行う。HOSTから

- ①観測周波数テーブル
- ②局位置・星位置情報
- ③地球回転パラメータ
- ④相関開始、終了、中心時刻
- ⑤ビデオバンド幅
- ⑥相関データ書き込みのディレクトリ
- ⑦観測テープID
- ⑧観測時トラックセットID番号
- ⑨再生データレート

などを受け取る。①～⑥は、制御計算機をバイパスして各相関器へ送られ予測値計算に用いられる。⑦～⑨は、制御計算機が同期を開始する時に用いられる。

制御計算機は、観測テープIDから必要なテープをDMSにマウントし、トラックセットIDを基にデータの頭出しを行う。これらの終了後、出力インターフェースに同期開始命令を出す。自動調走が開始され相関積分が始まる。

なお、相関データは制御計算機を経由することなくHOST計算機ハードディスクに書き込まれる。

3.5 データレコーダ

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での記録・再生を行う。リードソロモ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 1×10^{-10} 以下を達成している。この低エラーレートの実現は、データ中に挿入するタイムコードの削減が可能なこと、ビットメーク(不要ビットが余分に入り込むこと)、ビットスリップ(必要データビットの欠落)など相関処理に致命的なエラーから逃れられることを意味している。データレコーダは、出力インターフェースを通してHOSTからリモート制御される。

3.6 デジタルマストレージシステム

相関処理時の運用も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トレージシステムは、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、記録済み観測データとテープの関連付けをログ上より読みとりテープを自動装填することができる。このデジタルマ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。

4. マルチビット相関

本相関器は、第1図に示した排他的論理和で基本構成された相関器である。この1ビット相関器で2ビット以上の相関を入力チャンネルセレクタを用いることで実現している。第1表に示すように1ビット2レベルの場合は、同一チャンネルどうしの相関をとればよい。2ビット4レベルの場合は、サンプラのMSBがch1に、LSBがch2として相関器に入力されるので、X側入力チャンネル選択を順にch1, ch2, ch1, ch2という具合にし、Y側入力チャンネルの選択をch1, ch1, ch2, ch2とすると、各相関ユニットの出力としては、MSB*MSB, LSB*MSB, MSB*LSB, LSB*LSBの相関結果が得られる。各結果にそれぞれ重み付けをして足し合わせると多ビット相関が可能となる。これは4ビット、8ビット量子化に拡張できる。2ビットまでは、コマンド1つで対応可能である。

5. 観測結果

本相関器は、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。得られた相関の例を

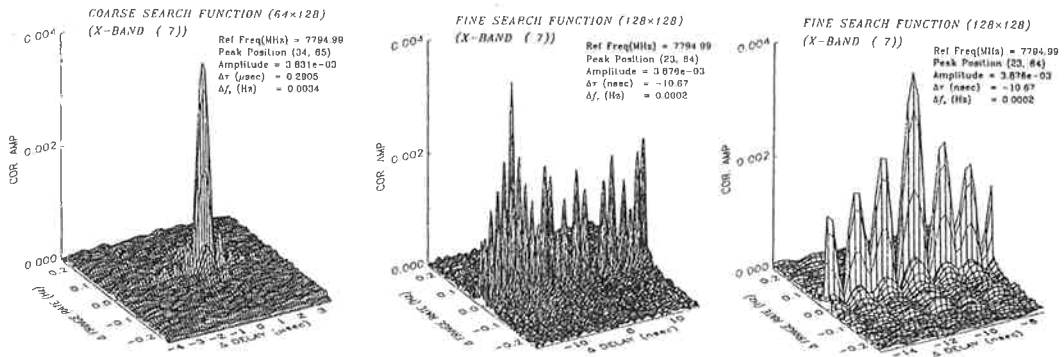
第9図に示す。実際の実験により従来のK-3相関器との間で解析結果を比較した。その結果十分な精度で一致し、現在実運用に供されている。この結果については、本特集号3.4.3バンド幅合成ソフトウェアや3.4.4デー

第1表 マルチビット相関

1 bit (2 level) Sampling			
channel	A/D conv.	X input	Y input
ch 1	A/D 1	ch 1	ch 1
ch 2	A/D 2	ch 2	ch 2
ch 3	A/D 3	ch 3	ch 3
ch 4	A/D 4	ch 4	ch 4
ch 5	A/D 5	ch 5	ch 5
ch 6	A/D 6	ch 6	ch 6
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.
ch 16	A/D 16	ch 16	ch 16

2 bit (4 level) Sampling			
channel	A/D conv.	X input	Y input
ch 1	A/D 1 (MSB)	ch 1	ch 1
ch 2	A/D 1 (LSB)	ch 2	ch 1
ch 3	A/D 2 (MSB)	ch 1	ch 2
ch 4	A/D 2 (LSB)	ch 2	ch 2
ch 5	A/D 3 (MSB)	ch 3	ch 3
ch 6	A/D 3 (LSB)	ch 4	ch 3
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.
ch 16	A/D 8 (LSB)	ch 8	ch 8

4 bit (16 level) Sampling			
channel	A/D conv.	X input	Y input
ch 1	A/D 1 (bit4)	ch 1	ch 1
ch 2	A/D 1 (bit3)	ch 2	ch 1
ch 3	A/D 1 (bit2)	ch 3	ch 1
ch 4	A/D 1 (bit1)	ch 4	ch 1
ch 5	A/D 2 (bit4)	ch 1	ch 2
ch 6	A/D 2 (bit3)	ch 2	ch 2
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.
ch 16	A/D 4 (bit1)	ch 4	ch 4



第9図 本相関器による実際の相関結果左から粗決定、バンド幅合成、拡大図

タ解析ソフトウェアにおいて詳しく述べられているのでそちらを参照して頂きたい。

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相関処理装置について報告した。KSP 計画では、毎日のデータを滞り無く処理するために相関処理の多基線自動処理化を行っている。現在2局1基線処理で定常運用を行っている。1996年3月には、4局6基線テープベース相関器が完成する予定であり、1996年度半ばにはリアルタイム相関システムの立ち上げも予定している。リアルタイム相関システムでも本相関器が使用可能である。

謝 辞

本計画推進にあたっては、コスモリサーチ(株)、SONY(株)各位に大変お世話になりました。

参 考 文 献

- (1) 木内他, "3.2.2 データ取得系", 通信総研季, 42, 1, pp.29-35, Mar.1996.
- (2) "K-3型超長基線電波干渉計 (VLBI) システム開発特集号"
- (3) 関戸他, "3.4.2 一次処理ソフトウェア", 通信総研季, 42, 1, pp.99-107, Mar.1996.
- (4) 近藤他, "3.4.3 バンド幅合成ソフトウェア", 通信総研季, 42, 1, pp.109-119, Mar.1996.
- (5) 小山他, "3.4.4 データ解析ソフトウェア", 通信総研季, 42, 1, pp.121-130, Mar.1996.

