

## III-4 相関器制御・データ収集ソフトウェア(KROSS)

国 森 裕 生\* 浜 真 一\*

(昭和59年7月3日受理)

## 1. はじめに

VLBI とは天体の輻射する電波を、互いに遠く離れた2局のアンテナで独立、同時に受信して、電波が各々のアンテナに到達する時間差(遅延時間)を精密に測定する電波干渉計である。各局で受信された信号は高安定な局部発振器によってビデオ帯に周波数変換され、磁気テープなどの記録媒体に時刻符号と共に記録される。その後、これらを一ヶ所に持ちより同期をとって再生し、互いに“干渉”をさせることによってはじめに目的の遅延時間を求めることができる。

この干渉作業(位相関係を一定に保ちながら信号を足し合わせる)をここでは相関・一次処理と呼ぶ。受信機系の雑音に埋もれたわずかな信号を対象にする VLBI においては、干渉縞(フリンジ)の検出に大量の積分を必要とする。したがって相関・一次処理では、ハードウェア(相関処理装置)による積分とソフトウェアによる積分を組み合わせた効率的な処理が望まれる。前者の積分作業を適切に行うため、データレコーダと相関処理装置を制御し相関データを収集するソフトウェアが相関器† 制御・相関データ収集ソフトウェア(KROSS)である。後者の積分作業を行うのがバンド幅合成ソフトウェア(KOMB)<sup>(1)</sup>である。本論文では KROSS 設計の基本概念を明らかにし、その構成と機能について述べる。ただし、データレコーダの同期運転については本特集号 III-3 に詳細に述べられているので本論では述べない<sup>(2)</sup>。

本論文は 2. で相関処理の原理を現システムに即して解説した後、3. で予測物理量の目標精度について論ずる。次に 4. で具体的なソフトウェアの構成と各部の機能について説明する。特に相関処理の中核である相関器に与える制御パラメータの計算法について詳細に説明する。またデータベースとのつながりや相関器との入出力インターフェイスについて述べると共に、オペレータから見た本ソフトウェアの操作性についても触れる。5. では KROSS を用いた実際の処理を具体例を挙げて説明する。

## 2. K-3 型相関処理装置で行う相関処理

## 2.1 VLBI で得られる観測量

一般に干渉計の出力は、観測時刻( $t$ )、観測角周波数( $\omega$ )の関数として得られる干渉縞の位相 $\Phi$ (フリンジ位相)と強度である。今両局の幾何学的遅延時間を $\tau_g$ とおくとフリンジ位相は

$$\Phi = \omega \cdot \tau_g \quad \dots\dots(1)$$

で表される。ところが観測されるフリンジ位相は、(1)式に電波伝搬路上(電離層, 大気)の位相シフトやアンテナ受信機系で生じる位相シフト等を含む上に $2\pi$ のあいまい性(ambiguity)を取り除くことが困難である(共通の局部発振器をもつ結合素子干渉計ではこの問題は軽減される<sup>(3)</sup>)。

そこで(1)式を時間で微分した量( $\frac{\partial \Phi}{\partial t} = F_r$  フリンジレート)を求め測地・電波天文应用のために利用している((2)式)。

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} = F_r = \omega \frac{\partial \tau_g}{\partial t} \quad \dots\dots(2)$$

一方、受信帯域幅が広くとれる場合には、フリンジ位相の周波数軸に対する一次傾斜として群遅延を求めることができる。群遅延は、受信帯域幅を大きくとればとる程その決定精度が向上する<sup>(4)</sup>。近年の広帯域磁気記録技術及びデータ処理技術の発展によって、受信帯域幅は大幅に拡大されてきた。その結果、群遅延の決定精度が飛躍的に向上し(0.1 ns 程度)、群遅延は測地応用 VLBI の中心的観測量となっている。

今、2局を、 $x, y$  ( $x$ : 主局,  $y$ : 副局)で表すと  $x$  局の時計ではかった時刻  $t_x$  における群遅延  $\tau_t(t_x)$  は(1)式の  $\tau_g$  を含めて(3)式で表される。

$$\tau_t(t_x) = \tau_g + \tau_i + \tau_p + \tau_c + \tau_v \quad \dots\dots(3)$$

ただし

 $\tau_g$ : 幾何学的遅延時間 $\tau_i$ : システム内遅延時間差 $\tau_p$ : 伝搬媒質内遅延時間差 $\tau_c$ : 両局時計オフセット $\tau_v$ : 広がった電波源による遅延時間への寄与<sup>(5)</sup>

K-3 相関・一次処理の目的は上記群遅延と、その時

\* 鹿島支所 第三宇宙通信研究室

† 本論文では相関処理装置を相関器と呼ぶことがある。

間変化率(遅延率)を高精度に求めることにある(以下群遅延を単に遅延(時間)と呼ぶ)。

2.2 遅延及び遅延率を求める原理

測地応用 VLBI で扱う電波源は一般に、我々の銀河から遠く離れており(準星など)、その微弱な信号は受信機の雑音に埋もれて容易に検出することができない。今2局  $x, y$  で受信した信号を  $X(t), Y(t)$  とおくと2局間の遅延  $\tau$  を推定することは次式で示される二乗誤差  $Q(\tau)$  を最小にするような  $\tau$  を求めることである。

$$Q(\tau) = \int_0^T [X(t) - Y(t+\tau)]^2 dt$$

$$= \int_0^T X^2(t) dt + \int_0^T Y^2(t+\tau) dt$$

$$- 2 \int_0^T [X(t) \cdot Y(t+\tau)] dt \quad \dots\dots(4)$$

(4)式第1項は  $\tau$  に無関係であり、第2項も  $\tau$  に比べて積分範囲  $T$  が十分大ならば一定である。そこで  $Q(\tau)$  を最小にするには第3項を最大にすればよい。

$$\text{MAX}_{\tau} \int_0^T [X(t) \cdot Y(t+\tau)] dt \quad \dots\dots(5)$$

(5)式はいわゆる相互相関関数の値を最大にする  $\tau$  が遅延時間の推定値であることを示している。(5)式の  $\tau$  を遅延率  $\dot{\tau}$  も考慮して  $(\tau + \dot{\tau} \cdot t)$  に置き換えれば次式が遅延、遅延率を求める式となる。

$$\text{MAX}_{\tau, \dot{\tau}} \int_0^T [X(t) \cdot Y(t+(\tau + \dot{\tau} \cdot t))] dt \quad \dots\dots(6)$$

2.3 フリンジストッピング

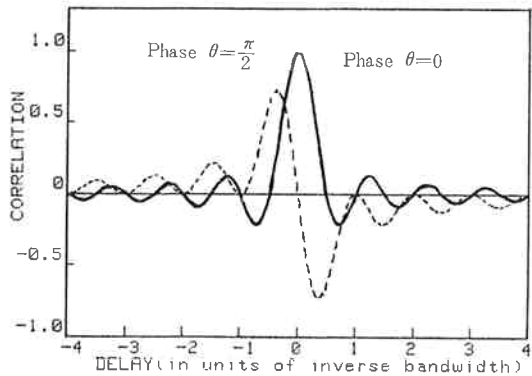
(6)式で表される相互相関関数は受信周波数帯で直接計算されるものである。局部発振器から供給される信号を用いてビデオ帯(0~B Hz)に変換された信号の相関をとる場合には、フリンジ回転と呼ばれる位相回転を考慮する必要がある。フリンジ回転とは、地球回転などによるドップラシフトの効果が周波数変換後に残るものであり、白色雑音信号を0~B(Hz)までのビデオ帯に周波数変換した後の信号の相互相関関数  $R_{xy}(\tau)$  は次式で与えられる<sup>(1)</sup>。

$$R_{xy}(\tau) = \cos(\theta + \omega_x \tau + \pi B(\tau + \tau_t))$$

$$\cdot \frac{\sin \pi B(\tau + \tau_t)}{\pi B(\tau + \tau_t)} \quad \dots\dots(7)$$

- ただし  $\tau$ : 相関ラグ
- $\tau_t$ : 遅延時間
- $\omega_x$ :  $x$  局受信角周波数
- $\theta$ : 両局局部発振器位相差
- $B$ : バンド幅

(7)式は、 $\sin x/x$  関数を包絡線にもつ余弦関数であり、第1図にその概形を示す。(7)式余弦関数の位相項のうち、 $\pi B(\tau + \tau_t)$  の項は、遅延時間  $\tau_t$  が変化しても相関ラグ  $\tau$  でその変化を吸収できるので時系列データのシフトで積分期間中の相関関数の形を保持できる(遅延追尾)。ところが、 $\omega_x \tau_t$  の項は直接相関関数の形に寄与し時間が経るごとにその形を変化させる。すなわち積分期間中に相関関数の位相が次々と変化し、最終的に相関ピークが消滅してしまうことを意味している。この位相変化を打ち消す操作をフリンジストッピングと呼ぶ。(7)式に  $\cos \omega_x \tau_t$  と  $\sin \omega_x \tau_t$  を乗算して(8)、(9)式を得る。



第1図 フリンジ回転をもつ相互相関関数

$$R_{\cos}(\tau) = \{\cos(\theta + \pi B(\tau + \tau_t)) + \cos(\theta + 2\omega_x \tau_t + \pi B(\tau + \tau_t))\} \cdot \frac{\sin \pi B(\tau + \tau_t)}{\pi B(\tau + \tau_t)} \quad \dots\dots(8)$$

$$R_{\sin}(\tau) = \{-\sin(\theta + \pi B(\tau + \tau_t)) + \sin(\theta + 2\omega_x \tau_t + \pi B(\tau + \tau_t))\} \cdot \frac{\sin \pi B(\tau + \tau_t)}{\pi B(\tau + \tau_t)} \quad \dots\dots(9)$$

(8)、(9)式の { } 内の第2項は、 $2\omega_x \tau_t$  の位相項のため時間軸で積分を行うと零に近づくので、(8)、(9)式は(10)、(11)式と等価である。

$$R_{\cos}(\tau) = \cos(\theta + \pi B(\tau + \tau_t))$$

$$\cdot \frac{\sin \pi B(\tau + \tau_t)}{\pi B(\tau + \tau_t)} \quad \dots\dots(10)$$

$$R_{\sin}(\tau) = -\sin(\theta + \pi B(\tau + \tau_t))$$

$$\cdot \frac{\sin \pi B(\tau + \tau_t)}{\pi B(\tau + \tau_t)} \quad \dots\dots(11)$$

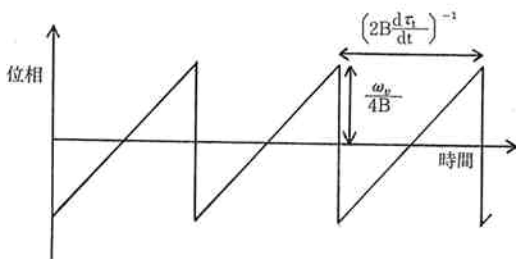
(10)、(11)式は周波数  $\omega_x$  においてのみのフリンジストッピングであり、本来は周波数スペクトル上で全帯域にわたるべきである。しかし全帯域の残存フリンジ位相回転によるコヒーレンス\*のロスに精分時間を短くすることによって無視できる<sup>(4)</sup>。

2.4 離散データの相関関数

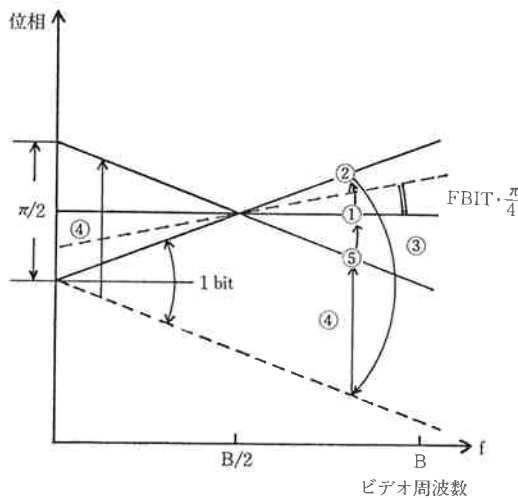
2.3 までに述べられた相関処理はすべてアナログデー

\* コヒーレンス 可干渉性

タに対して行われることを前提にしていた。実際のVLBIにおいては、信号は1ビットで量子化される<sup>(7)</sup>。したがって2.3で述べた時系列上のシフトは1ビット単位でしか行われぬ。このため1ビットシフトするまでの時間中(8)式余弦関数の位相項  $\pi B(\tau + \tau_i)$  は実際のフリッジ位相の変化についてゆけない。これを補正することを部分ビット補正と呼ぶ。第2図(a)に部分ビットの位相変化を示す。Bはバンド幅、 $\omega_0$  はビデオ帯の角周波数を示している。部分ビット補正を時間領域で行う手法として90°位相ジャンプがある。これはビットシフトのタイミングでフリッジ位相に90°の位相ジャンプをかけるもので、第2図(b)に部分ビット補正の手順を示す(USB,  $\tau_i > 0$  を仮定)。この補正はフリッジストップングを



(a) 部分ビットによる位相変化



(b) 部分ビット補正と90°位相ジャンプ

第2図

帯域中央で行うときに使用する。図中①→②は半ビット(時間)経過後の位相変化を表している。②→③はビットシフトのタイミングであり各周波数( $\omega_0$ )で  $\omega_0/4B$  の位相変化が起きている。この時、全帯域で+90°の位相ジャンプ(③→④→⑤)を行うと、位相を元の位置に保持できる(⑤→①)。この補正はビデオ帯全体にわた

って部分ビット位相の効果を平均的に打ち消すものとなっている。

2.5 時間領域相関処理のアルゴリズム

2.4までに述べた相関処理を具体的に実現するアルゴリズムを説明する。この手続きはK-3型相関処理装置に採用されている。

1ビットサンプリング後のビデオ信号を  $V(n)$  とすると

$$V(n) = \begin{cases} +1 & \text{if } v(t_n) \geq 0 \\ -1 & \text{if } v(t_n) < 0 \end{cases} \quad \dots\dots(12)$$

ここで  $v(t_n)$  は時刻  $t_n$  における受信電圧で、 $n$  (整数) はサンプリングされたビット時系列  $V(n)$  に付した番号である。相関処理は一定積分区間(時間)単位で行い、その積分区間のことをPP(Parameter Period)と呼ぶ。PPに含まれるビット数を  $N$  とすると(10), (11)式にしたがった遅延の追尾とフリッジストップングを行う  $x$  局,  $y$  局データの相関処理手順は、(13), (14)式で示される。

$$\rho_c(l) = \frac{\beta}{N} \sum_{n=1}^N V_x(n) \cdot C(\phi_0 + (n-1) \cdot \Omega \cdot T_s + N_{90}) \cdot V_y(n+I(n)-l) \quad \dots\dots(13)$$

$$\rho_s(l) = \frac{\beta}{N} \sum_{n=1}^N V_x(n) \cdot S(\phi_0 + (n-1) \cdot \Omega \cdot T_s + N_{90}) \cdot V_y(n+I(n)-l) \quad \dots\dots(14)$$

ただし、 $\rho_c(l)$ ,  $\rho_s(l)$  はそれぞれラグ  $l$  [bit] における相互相関値の cos 成分, sin 成分,  $T_s$  はサンプリング周期 [sec] である。(13), (14)式は2局のデータ  $V_x(n)$ ,  $V_y(n)$  の1ビット相関  $\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N V_x(n) V_y(n-l)$  に遅延追尾, フリッジストップング及び部分ビット補正操作を加えた式である。 $I(n)$  は予測遅延ビットオフセットであり、予測遅延時間及び遅延率から求められる。

$$I(n) = I_0 + [(n-1)D + 0.5] \quad \dots\dots(15)$$

ただし、 $I_0$  はPPの先頭における  $I$  の初期値 [ビット],  $D$  は時系列上で1ビットに相当する時間あたりのビットシフト量(ビット単位で表した遅延時間の変化) [bit/bit]

[ ] は小数部を丸めて [ ] 内の数値を超えない最大の整数を得る記号(ガウス記号)である。

$I$  によってビット単位の遅延追尾が行われる。

$C(\theta)$ ,  $S(\theta)$  はそれぞれ cos 関数, sin 関数の 3-level 近似であり、 $0 \leq \theta < 2\pi$  の範囲では(10), (11)式で与えられる。

$$C(\theta) = \begin{cases} +1 & 0 \leq \theta < \frac{3}{8}\pi, \frac{13}{8}\pi \leq \theta < 2\pi \\ 0 & \frac{3}{8}\pi \leq \theta < \frac{5}{8}\pi, \frac{11}{8}\pi \leq \theta < \frac{13}{8}\pi \dots\dots(16) \\ -1 & \frac{5}{8}\pi \leq \theta < \frac{11}{8}\pi \end{cases}$$

$$S(\theta) = \begin{cases} +1 & \frac{1}{8}\pi \leq \theta < \frac{7}{8}\pi \\ 0 & 0 \leq \theta < \frac{1}{8}\pi, \frac{7}{8}\pi \leq \theta < \frac{9}{8}\pi, \dots\dots(17) \\ \frac{15}{8}\pi \leq \theta < 2\pi \\ -1 & \frac{9}{8}\pi \leq \theta < \frac{15}{8}\pi \end{cases}$$

$\phi_0$  は PP 先頭における初期位相で予測遅延時間と観測周波数から求められる (4. 3. 2 参照).

$\Omega$  は予測フリンジレートであり, 予測遅延率, 遅延加速度及び観測周波数から求められる.

$$\Omega = \Omega_0 + (n-1)E \dots\dots(18)$$

ただし,  $\Omega_0$  は PP の先頭における  $\Omega$  の初期値 [rad/sec],  $E$  は時系列上 1 ビットに相当する時間あたりのフリンジレート増加量である [rad/sec/bit].

K-3 相関器ではフリンジ回転に用いる  $\cos, \sin$  関数をハードウェアの負担を軽くするため(16), (17)式の 3 レベル近似関数で代用している.

次に  $N_{90}$  は, 部分ビット補正のための  $90^\circ$  位相量であり(19)式で表される.

$$N_{90} = \begin{cases} \text{ISGN}(\Omega) \cdot \frac{1}{2}\pi & \text{if } I(n) - I(n-1) \neq 0 \\ 0 & \text{if } I(n) - I(n-1) = 0 \end{cases} \dots\dots(19)$$

$$\text{ただし, ISGN}(a) = \begin{cases} +1 & \text{if } a \geq 0 \\ -1 & \text{if } a < 0 \end{cases}$$

$\beta$  は相関器によって得られた相関値の大きさを, アナログ相関値の大きさに変換するための規格化定数である<sup>(1)</sup>.

### 3. 予測値計算と目標精度

#### 3.1 予測値計算の必要性

2.5 までに K-3 相関処理のアルゴリズムの概要について述べた. ところが相互相関の計算に用いるラグ数は有限であり, K-3 相関器の場合 8 ビット (1 ビットは 4 MHz サンプリングの場合 250 nsec) しか有していない. そこでこの相関ラグの窓の中に相関ピークを出すため予測値計算が必要になる. また予測値計算はフリンジ回転によって生じる位相変化を止め, 積分時間内でコヒ

ーレンスの低下を抑えるという重要な意味も持っている.

更に, K-3 型システムで扱うデータは 1 ビット単位であり相関器からの出力データから直接, 遅延時間を高精度に求めることはできない. そこで K-3 相関・1 次処理では相関器から得られる PP ごと, 周波数チャンネルごとの相関値をソフトウェアにより積分し, 遅延時間, 遅延率を KROSS で与えた予測値からの残差として求めている (これらの処理はフリンジサーチと呼ばれ詳細は本特集号 III-5 にべられている). したがって, ソフトウェアによる積分によってはじめて観測量としての遅延時間, 遅延率が高精度 ( $\tau_t: 0.1 \text{ ns}, \dot{\tau}_t: 0.1 \text{ ps/s}$ ) に求められる.

#### 3.2 予測物理量の目標精度

3.1 で相関処理に予測値が必要な理由を述べたが, ここでは予測値に必要な精度について述べる. ここで言う予測値とは遅延時間 ( $\tau_t$ ) と遅延率 ( $\dot{\tau}_t$ ) である.

K-3 相関処理装置においては, (13), (14)式であらわされる相互相関積分のビットラグ数 ( $l$ ) は 8 (2 $\mu\text{s}$ ) しかない. したがってこの相関の窓の中に相関ピークを見出さねばならないことはもちろんである. しかし後に 8 ビットラグ相関値を使ってクロススペクトルを求める際, 離散フーリエ変換の打ち切り効果を考慮して遅延時間の予測値は 8 ビットの中央に常に 1 ビット (250 ns) 以下の精度で求めることが望ましい. これは遅延追尾を行うために必要な精度であり, KROSS では精度 50 nsec を目安としている.

一方, フリンジストップングに必要な要求精度については VLBI のように微弱な信号を扱う場合特に重要である. フリンジストップングは(2)式であらわされるフリンジレートを補正することである. したがって長時間の積分を行う時, 遅延率の誤差がそのままコヒーレンスの低下に関連してくる.

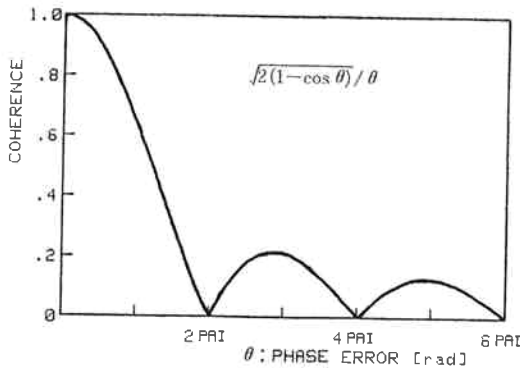
観測角周波数  $\omega$  [rad/sec] 積分時間  $T$  [sec] とすると, 積分期間中の  $\omega$  における位相誤差  $\Delta\phi$  [rad] は

$$\Delta\phi = \omega \dot{\tau}_t T \dots\dots(20)$$

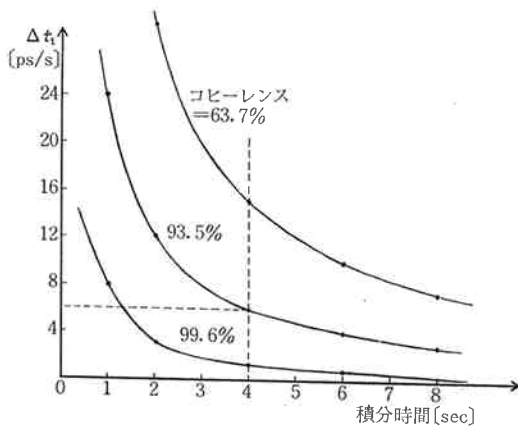
で評価できる. 一方, 位相誤差が  $\theta$  ラジアンある時のコヒーレンス (位相誤差 0 の時 1 とする)  $Coh$  は(21)式で表される (第 3 図).

$$Coh = \left| \frac{1}{\theta} \int_0^\theta S_{xy}(\omega) e^{j\theta} d\theta \right| / \left| S_{xy}(\omega) \right| = \sqrt{2(1 - \cos\theta)} / \theta \dots\dots(21)$$

ただし,  $S_{xy}(\omega)$  :  $x, y$  局信号のクロススペクトル, (20), (21)式より周波数 8 GHz とし, コヒーレンス 99.6%, 93.5%, 63.7% に対する積分時間と遅延率誤差の関係係を第 4 図に示した. K-3 型相関処理装置は通常 4 秒



第3図 位相誤差とコヒーレンス ( $\sqrt{2(1-\cos\theta)}/\theta$ )



第4図  $\Delta t_i$  誤差と積分時間

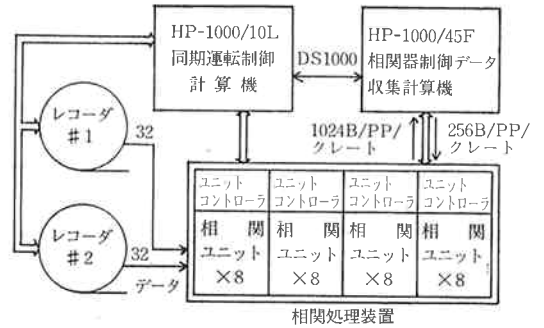
の積分時間 (PP) が使用され、ハードウェアの設定限界値は8.38秒である。第5図から例えば4秒の積分時間に、93.5%のコヒーレンスを保とうとすれば6 ps/sの精度で  $\Delta t_i$  を求めなければならないことがわかる。

#### 4. 相関器制御・相関データ収集ソフトウェア

##### 4.1 システムの構成

第5図に本ソフトウェアで使用する計算機システムと制御すべきハードウェアの関係を示した。K-3型相関処理装置は4台のクレートから構成され、それぞれのクレートは8チャンネルの相関ユニットからなっている<sup>(8)</sup>。相関処理装置の役割をまとめると以下の様になる。

1. 相関部による8 bit ラグ複素相関積分。
2. プログラブル遅延回路による遅延時間変化の追尾。
3. フリンジローテータによるフリンジストップピング。
4. 入力バッファメモリによる同期誤差の吸収。



IEEE-488バス

第5図 KROSS で使用する計算機システムとハードウェア

5. ヘッダ情報及び時刻符号の抽出。
6. ユニットコントローラによる同期誤差の演算。
7. 較正信号検出部による位相較正信号の検出。

相関・一次処理システムでは相関器は2台のホスト計算機とのインターフェイスをもっている。一つはHP 1000 Model 45 F (以下45 F) とのインターフェイスであり、もう一つは同 Model 10 L (以下10 L) とのインターフェイスである。前者は相関器制御データ (予測値) と相関出力データを高速でやりとるするデータ用インターフェイスであり IEEE-488バスの DMA (Direct Memory Access) モード (転送速度0.6 Mbytes/s) を使用している。後者は同期誤差の転送および相関器ハードウェアの制御とチェックを行う制御用インターフェイスであり、同じく IEEE-488バスを使用している。10Lは相関器から出力される同期誤差 (2台のデータレコーダのテープ上の時刻差) をもとにしてデータレコーダの同期運転を行う。

ホスト計算機を2系統用意した理由は、将来の複数基線の同時相関処理にそなえるためである。10LのI/O処理能力と45Fの数値計算・ファイル管理能力を十分引き出すため処理の分散化をはかっている。両者はコンピュータネットワークユーティリティ (HP社 DS1000) で互いに結合されている。

KROSS (K-3 Cross Correlator Software) は相関処理を行う複数のプログラム群の全体を指す名称である。KROSSの処理モードには通常のVLBI実験で取得した2本 (以上) のテープを同期再生して相関処理するモード (ノーマルモード) 以外に、相関器等のチェックに用いるための特殊なモードがある。

例えば

- 1) テープ一本再生モード (チェック用のデータを一本のテープに記録し、異なるトラックあるいは同一のトラックの相関をとる)
- 2) フォーマット直接入力モード (相関器への入力を

データレコーダ<sup>(7)</sup>からではなく直接フォーマッタからの入力としシステムのコヒーレンステスト等に使用する)

- 3) 疑似生データ作成/処理モード (VLBI で得られる信号を疑似的につくり出しフリンジ回転やビットシフトなどの処理をソフト的にシミュレーションする)

などが挙げられる。

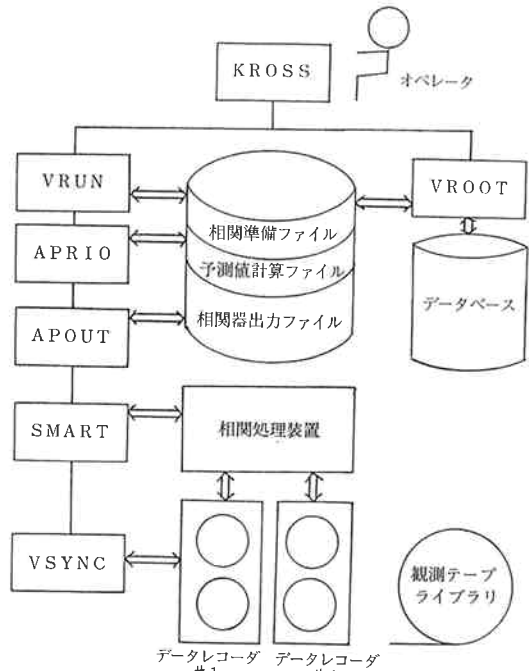
本論文ではノーマルモードにおけるシステムとアルゴリズムの説明に限る (他のモードもシステム構成, アルゴリズムはノーマルモードを基本にしている)。第6図および第1表にノーマルモードにおける KROSS のブロックダイアグラムおよび各タスクの機能を掲げた。以下ではこれらの機能のうち

- (1) データベース, オペレータインターフェイス
- (2) 予測値計算と相関器制御パラメータへの展開
- (3) 高速大容量 I/O

の3項について説明を行う。

4.2 データベース, オペレータインターフェイス

K-3 型 VLBI システムでは実験のスケジューリング



第6図 KROSS を構成するタスク

第1表 KROSS を構成する各タスクの機能

タスク名	機能
KROSS (統括プログラム)	<ul style="list-style-type: none"> <li>○相関器制御ソフトウェア全体を統括する。</li> <li>○オペレータとの会話を通じて処理要求のあった実験の相関処理を行う。また下位タスクの起動及びエラー処理を行う。</li> </ul>
VROOT (相関準備 D/B アクセスプログラム)	<ul style="list-style-type: none"> <li>○D/B にアクセスし処理に必要なすべてのデータ項目を抽出する。</li> <li>○相関処理スケジュールに従ってデータを編集し, 相関準備ファイルを作成する。</li> </ul>
VRUN (相関処理実行プログラム)	<ul style="list-style-type: none"> <li>○相関処理準備ファイルをメモリ上にロードし相関処理を開始するための初期化を行う。</li> <li>○APRIO, VSYNC の起動を行う。</li> </ul>
APRIO (予測値計算プログラム)	<ul style="list-style-type: none"> <li>○積分時間ごとの指定された時刻の予測遅延時間差, フリンジレートなど相関器に必要なパラメータを計算する。</li> </ul>
VSYNC (データレコーダ同期運動プログラム)	<ul style="list-style-type: none"> <li>○相関器から予測遅延誤差および時刻を入力し2台のデータレコーダの位置決めと同期制御を行う。</li> </ul>
SMART (SRQ I/O 管理プログラム)	<ul style="list-style-type: none"> <li>○各 PP の先頭での相関器から出される SRQ によって起動される I/O ハンドラー。相関器へ予測パラメータを DMA 出力し, 相関器から相関データを DAM 入力する。</li> </ul>
APOUT (相関出力データ編集プログラム)	<ul style="list-style-type: none"> <li>○メモリ上に DMA 収集されディスクに書き出された相関データを編集して恒久ファイルを作成する。</li> </ul>

第2表 KROSS コマンド系列の例

行数	コマンド	意味
1	MODE=NOR	ノーマルモードである。
2	IDEX=\$83JUL 05TS	「実験」コード指定。
3	OBS=3	「観測」番号指定。
4	BASE=EF, 1, 2	ベースラインは E (Westford) F(Fortdavis) であり使用クレートは1番と2番である。
5	STAT=E, 1	E (Westford) はデータレコーダ1番にマウントする。
6	STAT=F, 2	F(Fortdavis) はデータレコーダ2番にマウントする。
7	TAPE=120	再生スピードは120 ips である。
8	FRAM=200	PP 中のフレーム数は200(1フレームは20000ビット)である。
9	RUN	上記のパラメータで相関処理を開始せよ。

からデータ取得後のパラメータ推定まで一貫したデータベース (以下 D/B) によるデータ管理を行っている<sup>(6)</sup>。KROSS においてもオペレータからの最小限の指示コマンドによって、必要な項目のデータを D/B から引き出し、所定の処理が終了すると再び処理結果を対応する D/B 項目に出力する (このタスクは主に KROSS 及び VROOT が受け持つ。第2表に KROSS のコマンド系列の入力例を示した。入力例に従って実際の相関処理の手順と D/B との関連を説明してゆく。

まずオペレータから指示された実験コード\* と観測番号\*\*により (表中、第2, 3行)、その「観測」の参加局名、使用電波源名、周波数配列コード、使用テープ番号などが自動的に D/B から読み込まれる。次にオペレータが、どの相関器クレートを用いるか (第4行) 及びどのデータレコーダ装置にどちらの局のテープをマウントしたか (第5, 6行) を指定すると、KROSS はレコーダと相関器間のコネクタ連結方法をオペレータに通知し、相関処理のための予測値計算を開始する。予測値計算に必要な情報――

(1) 局位置情報: 各局直交座標値

\*, \*\* 測地目的の VLBI では、十数種類の電波星を1個の星につき数分間づつ星を切換えながら24時間以上の観測を行うものが典型的である。D/B の構造上では、この1日の観測のことを「実験」と呼び、数分間の観測ことを「観測」と呼ぶ。実験コードとは実験に付された固有の ID コードであり観測番号とは「実験」に含まれる「観測」を先頭から順番に番号付けをしたものである。以下これらの用語を特に一般的な意味とは区別して上記の意味に使う時には「J」をつけて表す。

- (2) 星位置情報 (赤経・赤緯)
- (3) 周波数情報 (ローカル周波数とデータレコーダ記録チャンネルとの対応表)
- (4) 時刻情報 (「観測」開始、終了時刻および両局クロックオフセット値)
- (5) 地球回転・大気補正情報 (極運動, UT1-UTC, zenith path length)<sup>(10)</sup>

及び

- (6) 数学・物理情報 (光速値,  $\pi$  など)

――は全て D/B から取り込まれる。予測値計算結果のうち「観測」の中央時刻 (これを PRT=Processing Reference Time と呼ぶ) における遅延・遅延率などは、D/B に格納され相関処理後のソフトウェアによって使用される。また使用クレート番号や相関処理日付け等のステータスも同時に D/B に保存される。予測値計算後データレコーダの同期運転が開始され相関処理が行われるがこの時のテープ速度、PP 時間はあらかじめオペレータが指定する。(第2表7, 8行)。レコーダの同期運転が終了し相関データが順調に取り込まれると、相関出力ファイルが45Fディスク上に生成される。この時、ファイル名は D/B 管理ソフトウェアによって自動生成され、ファイルの存在場所 (ディスク領域 ID) とともに D/B に格納される。

4.3 予測値計算と相関器予測パラメータへの展開

4.3.1 予測値計算に用いる物理モデル

物理量としての予測値は、まず「観測」の PRT における遅延時間とその3次までの時間微分をとることによ

第3表 採用した物理モデル

No.	物理モデル	説明
1	歳差	Lieske* (1976) のモデル
2	章動	Wahr* (1979) のモデルのうち係数が50/1000 arcsec 以上のもの
3	日周運動	グリニッジ視恒星時 Merit Standard より
4	年周光行差	真太陽黄径近似式
5	星表	J 2000年元期
6	局座標	WGS72→VLBI 座標*
7	長周期極運動	BIH (または IPMS) の値*
8	UT1-UTC	〃
9	大気差	Moran-Chao* のモデル
10	口周光行差	――
11	原子時←力学時*	――

(\* 文献 (10) 参照)

って求められる。その後各 PP における遅延時間とその 2 次までの時間微分を上記の値から Taylor 展開で求めている (4.3.2 参照)。ここでは PRT における予測値を求めるアルゴリズムについて述べる。

K-3 VLBI データ解析ソフトウェアには、非線型な観測方程式を高精度の予測値を用いて線型化し最小 2 乗法を適用するためのアプリオリモデル計算ソフトウェア (KAPRI)<sup>(10)</sup> がある。そのアルゴリズムには遅延量・遅延率に寄与するあらゆる物理効果が含まれており、その計算精度は遅延時間で 0.1 ns 以下、遅延率で 0.1 ps/s 以下であることが確認されている。KROSS では相関処理に必要な精度を保証する範囲内で (3. 参照) 計算時間を短縮するために物理モデルの選択を行っている。第 3 表に KROSS で採用した物理モデルを掲げた。KROSS で計算する予測値の妥当性を証明するために、米国の VLBI システムで長年の使用実績のある Mark III 物理モジュールソフトウェア (CALC)<sup>(11)</sup> の計算値との比較を試みた (第 7 図(a), (b))。CALC の計算値は 1980 年 10 月に行われた 5 局参加の VLBI 実験時の予測遅延時間、遅延率の値である。第 7 図ではこのうち 3 基線 1 日分 (1 基線について約 100 点のデータが含まれている) のデータについて <CALC 計算値> - <KROSS 計算値> をプロットしてある。各ベースラインとも若干の日周成分があらわれているが、大きいものでも  $\tau_i$  で 20 ns,  $\dot{\tau}_i$  で、2 ps/s 程度の差の範囲におさまっていることがわかる。この値は 3. で論じた要求精度を十分満足している。

ここで計算された物理量に、両局のクロック、クロックレートオフセットを加えたものを PRT における予測遅延時間、遅延率とする。クロック、クロックレートオフセットは予測が困難なため実験前後に基準クロックとの間で時刻比較測定を行って別途求めておくのが普通であるが、現実には最初の 2, 3 の「観測」に対し、ラグ数を拡げ\* 相関処理を行い、ソフトウェアによって粗決定サーチ<sup>(1)</sup>を行った後で相関ピークが真中にくるように修正している。

遅延の 2 次、3 次の時間微分 ( $\ddot{\tau}_i$ ,  $\ddot{\tau}_i$ ) はそれぞれ 1 次、2 次の微分計算値を数値微分することによって求めている。

#### 4.3.2 相関器予測パラメータへの展開

各「観測」の PRT で求めた  $\tau_i$ ,  $\dot{\tau}_i$ ,  $\ddot{\tau}_i$  および  $\ddot{\tau}_i$  は各 PP の先頭 (BOPP=Begin of Parameter Period) および中央 (MOPP=Middle of Parameter Period) の  $\tau_b$ ,  $\dot{\tau}_b$ ,  $\tau_m$ ,  $\dot{\tau}_m$ ,  $\ddot{\tau}_m$  を求めるため Taylor 展開の

係数として用いられる。ここで  $\tau_b$ , ( $\tau_m$ ) は BOPP (MOPP) における遅延時間である。MOPP における時刻を  $t_m$  とすると、 $\tau_m$ ,  $\dot{\tau}_m$ ,  $\ddot{\tau}_m$  を求める式は (22)~(24) 式で与えられる ( $\tau_b$ ,  $\dot{\tau}_b$  も同様に求められる)。

$$\tau_m = \tau_b + \dot{\tau}_b(\Delta t) + \frac{1}{2} \ddot{\tau}_b(\Delta t)^2 + \frac{1}{6} \ddot{\tau}_b(\Delta t)^3 \quad \dots\dots(22)$$

$$\dot{\tau}_m = \dot{\tau}_b + \ddot{\tau}_b(\Delta t) + \frac{1}{2} \ddot{\tau}_b(\Delta t)^2 \quad \dots\dots(23)$$

$$\ddot{\tau}_m = \ddot{\tau}_b + \ddot{\tau}_b(\Delta t) \quad \dots\dots(24)$$

ただし、 $\Delta t = t_m - \text{PRT}$

このようにして得られた BOPP 及び MOPP での予測値から相関器が PP ごとに実際に受けとる予測パラメータの形式に編集を行う。これを PP 内予測パラメータ展開と呼ぶ。第 4 表に相関器予測パラメータのうち主なものを掲げた。以下にそれぞれのパラメータの求め方を遅延追尾およびフリンジストップ系のパラメータに分けて説明する。

与えられたパラメータとしては：

- $\tau_b$  : BOPP における予測遅延時間 [sec]
- $\dot{\tau}_b$  : " 遅延率 [sec/sec]
- $\tau_m$  : MOPP における予測遅延時間 [sec]
- $\dot{\tau}_m$  : " 遅延率 [sec/sec]
- $\ddot{\tau}_m$  : " 遅延加速度 [sec/sec<sup>2</sup>]
- $f$  : RF 周波数 (=  $\omega/2\pi$ ) [Hz]
- $B$  : バンド幅 [Hz]
- $S_r$  : サンプルレート (=  $2B$ ) [Hz]

TPP : PP 時間 [sec]

NPP : PP 中のビット数 (=  $\text{TPP} \cdot S_r$ ) [bit]

ABYTE : PP 中に含まれるバイト数 (=  $\text{NPP}/8$ ) [byte]

が挙げられる。また相関器内ハードウェアの構成から下記の条件が与えられる。

- (i) フリンジローテータのアドレスは  $0^\circ \sim 360^\circ$  に対応して  $0 \sim 2^{23} - 1$  (位相単位) まで設定可能である (1 位相単位 =  $1.34\mu^\circ$ )。
- (ii) プログラマブル遅延回路のプリセット値は 0 または 127 が設定可能である。
- (iii)  $4\phi$  のとり得る最大値は  $2^{24}$  [位相単位] である。

(1) 遅延追尾系の予測パラメータの求め方

( $T1$ ,  $\Delta T$ , IBD, APFR, APBT)

ビットシフト繰り返しタイミング ( $\Delta T$ ) に関しては 2 次の効果 ( $\ddot{\tau}_i$ ) を入れることができないので MOPP の  $\dot{\tau}_m$  を用いて

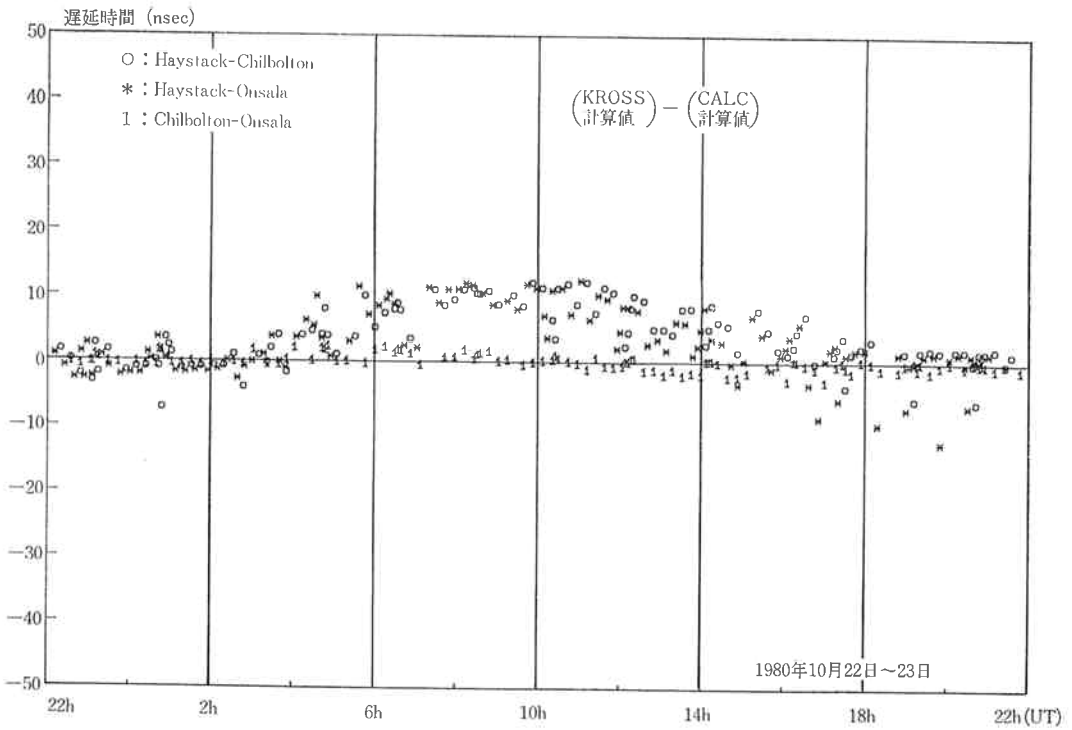
$$\Delta T = 1 / |\dot{\tau}_m| \quad \dots\dots(25)$$

と表すことができる。

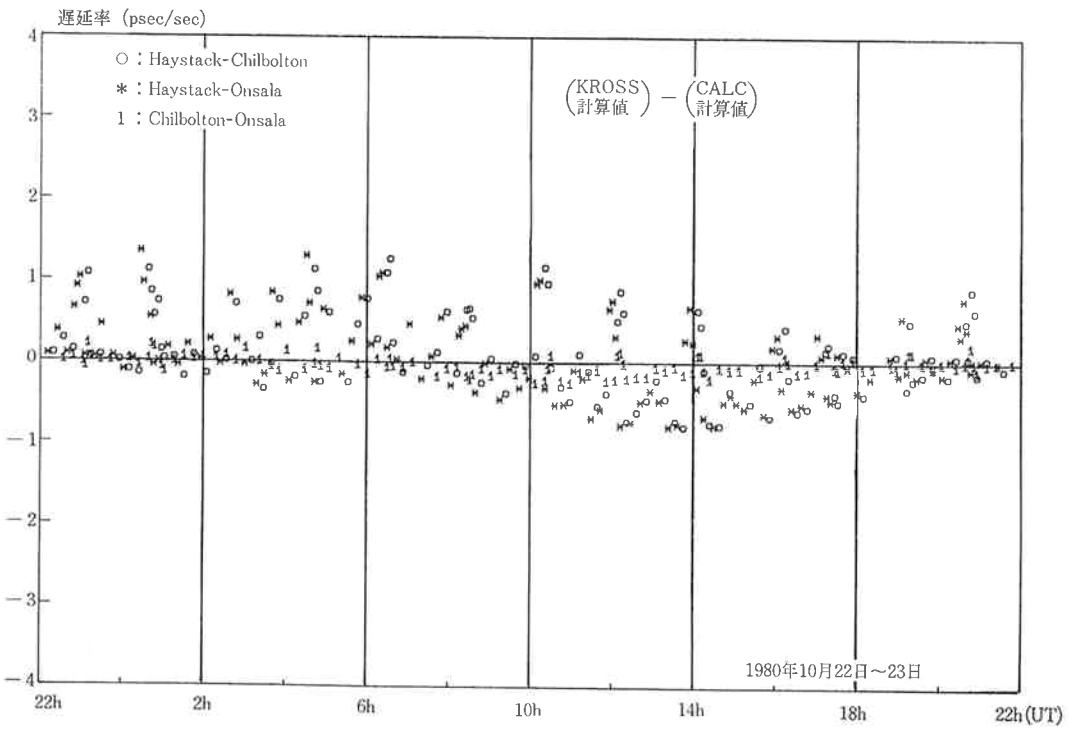
ビットシフト初期タイミング ( $T1$ ) を求めるためにま

\* K-3 相関処理装置 1 チャネルには 8 ビットの相関ラグしかないが、これを 1 クレート分 (64 ビット) に拡大し 8 チャネル分全てに共通の信号を入力し処理することができる (これを KROSS のラインスペクトルモード処理という)。





(a) 予測遅延時間 (CALC との比較)



(b) 予測遅延率 (CALC との比較)

第4表 主な相関器予測パラメータ

No.	mnemonic	項 目	説 明
1	T1	ビットシフト初期タイミング	BOPP から T1 ビット分の時間経過後, 最初のプログラマブル遅延回路のビットシフトが起きる。
2	ΔT	ビットシフト繰り返しタイミング	T1 信号後 ΔT ビット分の経過ごとにプログラマブル遅延回路の1ビットシフトが起きる。
3	IBD	プログラマブル遅延回路の初期値	0の時 プログラマブル遅延回路初期値0で以後1ビットづつ増える。 1の時 プログラマブル遅延回路初期値127で以後1ビットづつ減る。
4	φ <sub>0</sub>	フリンジ回転初期位相	PP の先頭におけるフリンジ初期位相 (0°~360° に対し 0~2 <sup>28</sup> で入力する)。
5	Δφ	フリンジ回転位相変化量	KSEL ビットに相当する時間ごとに変化するフリンジ位相。
6	KSEL	フリンジ回転位相ステップビット数	Δφ を加える (減ずる) タイミングを規定する (1~16ビット選択)。
7	NJUM	90° 位相ジャンプ極性	ビットシフトごとに+90°(=1), -90°(=2) するかを規定する。
8	POL	Δφ の増減	Δφ を加える時 1 " 減ずる 0
9	B <sub>φt</sub>	フリンジ加速度 位相ステップバイト数	位相変化量 (Δφ) を B <sub>φt</sub> バイトに相当する時間ごとに±1する。
10	APFR	予測誤差フレーム数	BOPP における予測全ビットのうちフレーム部分 (1フレームは20000ビット)。
11	APBT	# ビット数	BOPP における予測全ビットのうちフレーム部分を除いたビット部分。

ず BOPP における部分ビット (FBIT) を求める。遅延追尾は第8図の様に遅延が半ビット単位のところでビットシフトが起こるように行っている。したがって、BOPP における遅延時間ビット数  $I_{rb}$  (端数を含む) を用いて FBIT は、

$$FBIT = I_{rb} - NTOT \quad (26)$$

ただし、 $I_{rb} = r_b \cdot S_r$

$$NTOT = NINT(I_{rb})$$

NINT: 最も近い整数を得る演算

である。これを用いて T1 は

$$T1 = \Delta T \cdot (0.5 \pm FBIT) \quad \dots\dots(27)$$

ただし

$$\text{複号は} \begin{cases} + & : r_b < 0 \text{ の時} \\ - & : r_b \geq 0 \text{ の時} \end{cases}$$

と求められる。

プログラマブル遅延回路の初期値は  $\dot{t}_m$  の符号によって

$$IBD = \begin{cases} 0 & : \dot{t}_m < 0 \text{ の時} \\ 1 & : \dot{t}_m \geq 0 \text{ の時} \end{cases} \quad \dots\dots(28)$$

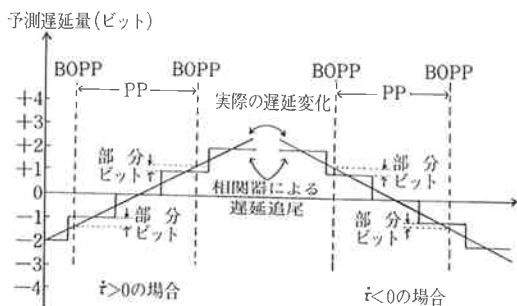
と表される。プログラマブル遅延回路の初期値によって予測ビット数にオフセットを加えなければならない。すなわち (26)式 NTOT は、

$$NTOT = \begin{cases} NTOT + 4 & : \dot{t}_m < 0 \text{ の時} \\ NTOT + 127 + 4 & : \dot{t}_m \geq 0 \text{ の時} \end{cases} \quad \dots\dots(29)$$

と修正しなければならない。但し(29)式中、4はラグの中央に相関ピークを出すための固定オフセットである。

(29)式で求めた NTOT を用いて予測フレーム数 (APFR), 予測ビット数 (APBT) は

$$APBT = \text{mod}(NTOT, 20000) \quad \dots\dots(30)$$



第8図 ビットシフトタイミング

$$\begin{aligned} \text{IF}(\text{APBT} < 0) \text{ APBT} &= \text{APBT} + 20000 \\ \text{APFR} &= (\text{NTOT} - \text{APBT}) / 20000 \end{aligned} \quad \dots\dots(31)$$

ただし、 $\text{mod}(m, n)$  は  $m$  を  $n$  で割った時の剰余、と表すことができる。

(2) フリンジストップ系の予測パラメータの求め方 ( $\phi_0, \Delta\phi, \text{KSEL}, \text{NJUM}, \text{POL}, B_{yt}$ )

まず KSEL の決定法について述べる。KSEL はフリンジストップのための位相変化量 ( $\Delta\phi$ ) を更新する繰り返しタイミングである。通常 KSEL は量子化誤差を最小にするため最大値 (KSEL=16) を選択する。但しこれによって追尾可能なフリンジレートの最大値 ( $F_{max}$ ) は、

$$F_{max} = \frac{S_r}{\text{KSEL}} \cdot \frac{2^{24}}{2^{28}} \quad \dots\dots(32)$$

で与えられる。今、BOPPにおけるフリンジレート ( $F_r$ ) は帯域中央における RF 周波数  $f_M (= f + B/2)$  を用いて

$$F_r = f_M \cdot \tau_b \quad \dots\dots(33)$$

と表されるので、もし  $F_{max} < F_r$  ならば KSEL を変更し

$$\text{KSEL} = \text{KSEL} / 2 \quad \dots\dots(34)$$

となる。必要ならば(32)~(34)の操作を繰り返す。

次に K-3 相関処理装置のフリンジ分解能 (DELFR) は KSEL とサンプルレート ( $S_r$ ) から

$$\text{DELFR} = S_r / (\text{KSEL} \cdot 2^{28}) \quad \dots\dots(35)$$

で与えられる。

(3), (35)式を用いて BOPP における位相変化量 ( $\Delta\phi$ ) は

$$\Delta\phi = |F_r| / \text{DELFR} \quad \dots\dots(36)$$

となる。

次にフリンジ加速度パラメータ ( $B_{yt}$ ) を求める。PP

\* シリアルポー (Serial Poll) IEEE-488 バスの機能の一つ。要求が発せられた装置を見分けるため、コントローラ (計算機) が、バスにつながっている装置に対して順番にステータスを聞きにゆくこと。

中に変化するフリンジレート (DELRT) は

$$\text{DELRT} = i_m \cdot \text{TPP} \cdot f_M / \text{DELFR} \quad \dots\dots(37)$$

と表すことができるので、1位相単仕あたりに要する経過時間 (単位バイト数) は

$$B_{yt} = \text{ABYTE} / |\text{DELRT}| \quad \dots\dots(38)$$

と求めることができる。

$\Delta\phi$  の増減フラグ (POL) および  $90^\circ$  ジャンプの極性 (NJUM) はフリンジレート ( $F_r$ ) の符号から (39)式で決定される。

$$\begin{aligned} \text{IF}(F_r \geq 0) \quad \text{NJUM} &= 1, \text{POL} = 0 \\ \text{IF}(F_r < 0) \quad \text{NJUM} &= 2, \text{POL} = 1 \end{aligned} \quad \dots\dots(39)$$

最後に BOPP におけるフリンジ位相 ( $\phi_0$ ) を求める。フリンジ位相は後の処理で 0 MHz の点を基準に求めるため  $f$  を用いて

$$\phi_0 = \text{mod}(f \cdot \tau_b + \text{FBIT} / 4, 1.0) \cdot 2^{28} \quad \dots\dots(40)$$

で与えられる。ここで  $\text{FBIT} / 4 \cdot 2^{28}$  は第2図(a)で示したように、フリンジストップを帯域の中央で行った時の 0 MHz における部分ビット補正值である ( $-45^\circ \sim 45^\circ$ )。

#### 4.4 高速大容量 I/O

相関処理装置各クレートは、クレート内の8個の相関ユニットからの BOPP 信号が出そろった時点でクレートからホスト計算機 (45F) へ SRQ<sup>(12)</sup> (Service Request) 信号を送出する (但しホスト計算機から SRQ 許可コマンドにより SRQ が可能状態に指定された場合のみであり、SRQ 禁止の時は信号は発生しない)。SRQ 信号を受けると 45F はシリアルポー\*を実行し SRQ を送出しているクレートを検出し、そのクレートコントローラに対して8チャンネル分の相関データの DMA 入力 (READ) を行う。次に同コントローラに対して8チャンネル分の予測パラメータを DMA 出力 (WRITE) する。45F では SRQ 割込みによる SRQ 処理プログラム (SMART) の起動を行い上記の処理を実現している。実際には SMART の負担を少なくするため、各クレート個々の SRQ 信号を許可せず、1つのクレートのみの SRQ で全てのクレートとの I/O を行っている。このため、あらかじめ計算された予測パラメータの PP ごとの参照時刻と実際の PP の先頭時刻がすべての相関ユニットで完全に一致していなければならない。

KROSS ではこの BOPP 時刻調節を

- (1) IEEE-488 バスのユニバーサルコマンド DCL (Device Clear)
- (2) 相関器制御コマンド ABP (Adjust BOPP) の両者を用いて行っている。前者は共通バスコマンドで同一バスに連結されているすべてのクレートに同一のタイミングで信号が供給され、各クレートはこの