

VLBI データ処理解析ソフトウェアの開発

その3. K-3型 VLBI バンド幅合成ソフトウェア (KOMB)
および フォーマット変換ソフトウェア (KONV)

鹿島支所 第3宇宙通信研究室

近藤哲朗, 国森裕生

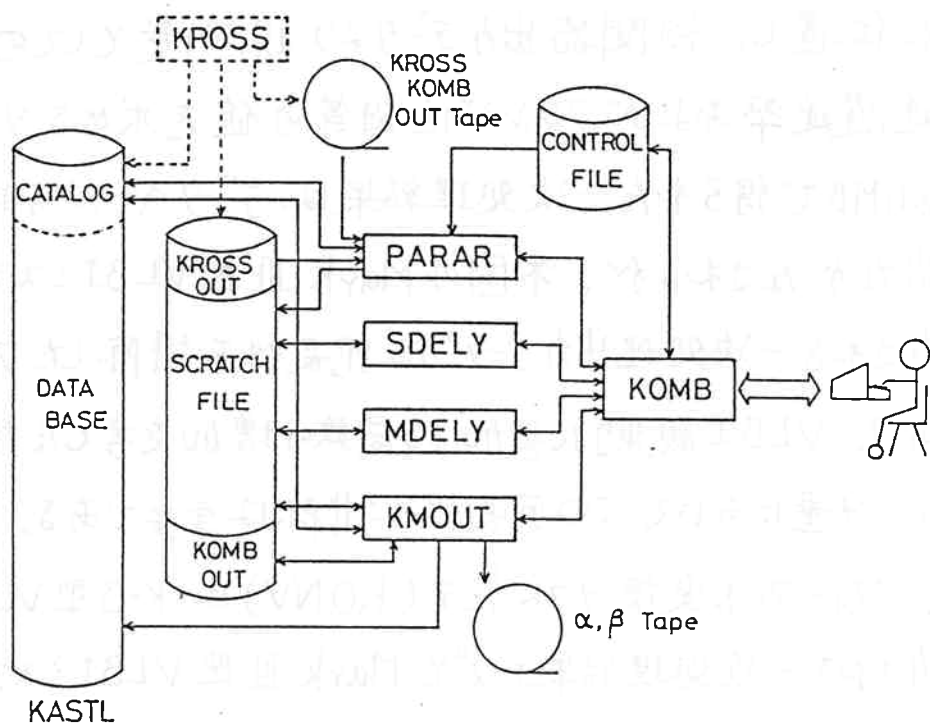
1. はじめに

K-3型 VLBI データ処理解析ソフトウェア群において、バンド幅合成ソフトウェア (KOMB) は、一次処理ソフトウェア群の最終段に位置し、相関器出力データより観測量としての相関強度、遅延、遅延率およびフリンジ位相等の値を求めるソフトウェアである。KOMBで得られた一次処理結果は、データベースおよび磁気テープ出力がなされるが、米国の Mark III 型 VLBI システムで同様に出力される一次処理出力テープから冗長性を排除したフォーマットとなっており、VLBI 観測に参加する局数の増加を考えた場合に蓄積するデータ量において、この冗長性の排除は重要である。

フォーマット変換ソフトウェア (KONV) は K-3型 VLBI システムより出力される一次処理結果テープと Mark III 型 VLBI システムの出力する一次処理結果テープとの間のフォーマット変換を行なうソフトウェアであり、必要に応じて Mark III システムでの一次処理結果との比較が可能となる。KONV のもう一つの重要な機能に、国際的測地関係者用に定められたフォーマットである "NGS フォーマット" でのデータ出力機能があり、一般の測地応用使用者への提供を可能としている。

2. バンド幅合成ソフトウェア (KOMB: Kashima Observatory Mathematical Technique for Band Width Synthesis)

本ソフトウェアは K-3型 VLBIシステム 相関器出力データより、観測量としての、相関強度、遅延、遅延率およびフリッジ位相等の値を求めるソフトウェアであり、この処理までを K-3型 VLBIシステムにおいて一次処理と呼んでいる。本ソフトウェアの概要をオ1図に示すが、オペレータの介在による会話型処理の他に、ほとんどオペレータの介在を必要としない自動処理を行なうことが可能である。



オ1図. KOMB 概要

本ソフトウェアによるデータ処理は以下の手順で行なわれる。⁽¹⁾まず K-3型相関器⁽²⁾より、積分時間 (AP: Accumulation Period) ごとの複素相関関数が得られるが、このデータに対して、1bit サンプルングによる損失補正等の補正を行ない、規格化相関関数を求める。引き続き、規格化

された相関関数に対してフーリエ変換を行ない、APごとのビテオクロススペクトルを求める。このクロススペクトルをもとに、最尤法により、遅延および遅延率の単周波粗決定を行なう。単周波粗決定による、遅延の決定精度は単チャンネル受信帯域巾及び電波星のコヒーレンスフラックス強度と積分時間により定まるが、K-3システムでは約10 nsecと見込まれる。粗決定の値をもとにして、バンド幅合成手法により、各受信周波数チャンネルごとの位相校正も考慮に入れた、遅延および遅延率の決定を行なう。これを多周波精決定と呼ぶが、遅延決定精度は、最大受信周波数間隔に依存する値となり、現在予定されているシステムでは、単周波粗決定に比べて、100倍以上の精度となる。以上の処理結果は、使用したデータおよびパラメータと共に、データベース (KASTL) および磁気テープ出力がなされるが、以下に、その処理の流れに沿ったモジュールごとに更に詳しく述べる。

2.1. KOMB

バンド幅合成ソフトウェアを統括するモジュールであり、オペレータとのインターフェイス および PARAR から KMOU1 までの各モジュールのスケジューリングを行なう。オペレータとの会話型による処理、またはオペレータの介在を必要としない非会話型の自動処理の選択が可能である。自動処理の際は、コントロールファイル中の処理コントロールパラメータが使用されるが、このコントロールファイルの作成機能も有する。コントロールパラメータとして、以下の項目が予定されている。

[コントロールパラメータ]

A. 処理する相関データに関して

- (1). 実験日時による指定 (範囲で指定も可)
- (2). 観測電波源による指定 (複数も可)

- (3). 基線による指定 (複数指定可)
- (4). 実験局による指定 (複数指定可)
- (5). 受信周波数グループによる指定 (単一周波数也可)

指定なしの場合は、ディスク中に存在する全相関データに対して処理が行なわれる。

長. サーチパラメータに関して

- (1). 単周波遅延、遅延率のサーチ幅
- (2). 多周波遅延、遅延率のサーチ幅
- (3). その他

C. その他

- (1) エラーステータスのマスク
- (2) データ品質判定用パラメータ (パーティエラレートなど)
- (3) 位相校正信号位相のマニュアル設定
- (4) 処理結果出力モード
- (5) その他

2.2. PARAR (Parameter Read module)

コントロールパラメータ (会話型の場合はコンソール入力, 非会話型の場合はコントロールファイル入力) の解析を行ない、実際の処理で必要な諸パラメータの設定を行なうモジュールである。コントロールパラメータにより指定された処理すべき相関器出力データは、相関生データの保護および以降のモジュールでの処理速度向上の為、スクラッチファイル上にコピーされる。更に、以降のモジュールで使用する必要パラメータの設定終了後、SDELYに処理が引き継がれる。

2.3 SDELTY (Single band Delay search module)

スラッシュファイル上の相関器出力データに対し、規格化及び補正を行ない、最終的に単周波粗決定により遅延および遅延率の値を求めるモジュールである。相関器より相互相関の cosine および sine 成分として、積分間隔 AP ごとの積分カウンターの値（積算されていき AP ごとにリセットはされない）が得られるが、これを (1) 式により 真の積分カウンタ値 N_T になおす。

$$N_T = \begin{cases} N - N_{-1} & \text{for } N > N_{-1} \\ N + n - N_{-1} & N < N_{-1} \end{cases} \quad (1)$$

ここで、カウンターは n 進カウンターと考慮しており、 N および N_{-1} はそれぞれ、現在の AP でのカウント値 および 1 つ以前の AP でのカウント値である。更に (2) 式により、 $-1 \sim +1$ の範囲の値に規格化された相関係数を得ることができる。

$$\begin{aligned} RC &= F \cdot (2 \cdot N_{TC} - C) / C \\ RS &= F \cdot (2 \cdot N_{TS} - C) / C \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、 RC, RS, N_{TC}, N_{TS} は、それぞれ規格化相関係数の cosine 及び sine 成分並びに cosine および sine 成分の真のカウント値である。

C は AP 内の全ビット数を表わし、 F は補正項であり、次式で与えられる。(3)(4)

$$F = \underbrace{\frac{\pi}{2}}_{\textcircled{1}} \cdot \underbrace{\frac{3}{4}}_{\textcircled{2}} \cdot \underbrace{\frac{\pi}{4 \cdot \cos \frac{\pi}{8}}}_{\textcircled{3}} \cdot \underbrace{\frac{1}{1 - \frac{\pi^2}{288}}}_{\textcircled{4}} \quad (3)$$

ここで

- ① 1bit サンプリングによる損失補正項
- ② AP 内全ビットに対する相関ビットの比
- ③ フリッジ回転補正
- ④ 部分ビット補正

こうして得られた規格化相関関数は、ビットラフ ($m=1, 8$), 積分レコード番号 ($k=1, K$) および受信周波数チャネル ($n=1, N$) の3種のインデックスを持つ関数である。すなわち

$$R(m, k, n) = RC(m, k, n) + iRS(m, k, n) \quad (4)$$

更にビットラフ m に関し、フーリエ変換を行ない、積分レコード及び周波数チャネルごとのビデオクロススペクトル $S^V(j, k, n)$ を求める。

$$S^V(j, k, n) = \sum_{m=1}^8 R(m, k, n) \exp(-i\omega_j^V m \tau_s) \quad (5)$$

ここで、 ω_j^V はビデオ帯における周波数インデックス j の角周波数であり、 τ_s はサンプリング間隔で、ここでは 250 nsec である。部分ビット補正が相関器により行なわれていない場合は、(6)式による補正を行ない、これは、遅延が 1 bit 単位という離散的な値である為に生ずるビデオ周波数での位相回転を補正するものである。k-3型相関器ではフリンジパターンの 90° 位相ジャンプという方法により部分ビット補正を行ない、通常は(6)式による補正を必要としない。

$$S_c^V(j, k, n) = S^V(j, k, n) \exp\{-i\omega_j^V(\tau_k - \tau_k')\} \quad (6)$$

ここで、 τ_k は予測した遅延量、 τ_k' は離散化した遅延量

ここで、粗決定サーチ関数 $F(n, \Delta\tau, \Delta\tau')$ を次式によって計算する。

$$F(n, \Delta\tau, \Delta\tau') = \sum_{j=1}^7 \sum_{k=1}^K S_c^V(j, k, n) \exp\{-i\omega_j^n \Delta\tau' \Delta t k\} \times \exp\{-i\omega_j^V \Delta\tau\} \quad (7)$$

ここで、 $\Delta\tau, \Delta\tau'$ は、それぞれ遅延および遅延率のサーチパラメータ、 ω_j^n は n チャネルのローカル周波数、すなわち Δt は積分時間間隔である。単周波粗決定は、 $F(n, \Delta\tau, \Delta\tau')$ の絶対値の n による和を最大にする $\Delta\tau, \Delta\tau'$ を推定することにより行なわれる。

すなわち、

$$\sum_{n=1}^N |F(n, \Delta\tau, \Delta\dot{\tau})| \quad (8)$$

を最大にする $\Delta\tau, \Delta\dot{\tau}$ を見つける。(7)式は、 $\Delta\tau, \Delta\dot{\tau}$ に関して、2次元フーリエ変換の形である為、実際の計算では、FFTによりサ-関数の計算を行ない、計算時間の短縮をはかる。

2.4. MDELY (Multi band Delay search module)

このモジュールでは、SDELY で得た、遅延及び遅延率の粗決定の値をもとに、更に、周波数チャンネルごとの位相差までを考慮に入れた遅延および遅延率の精決定を行なう。まず、相関器より得られるデータの位相校正信号データより、積分間隔 AP での各チャンネルの位相の計算を行なう。粗決定により得られた $\Delta\tau, \Delta\dot{\tau}$ の値を $\hat{\Delta\tau}, \hat{\Delta\dot{\tau}}$ とし、 k 番目のバンドに対して、遅延・遅延率分解関数 $D_S(n, k)$ を定義する。

$$D_S(n, k) = \sum_{j=1}^J S_c^v(j, k, n) \exp\{-i(\omega_j^v \hat{\Delta\tau} + \omega_0^k \hat{\Delta\dot{\tau}} \Delta t k)\} \quad (9)$$

多周波精決定は、 $D_S(n, k)$ に対して、更に微小の遅延と遅延率の補正を行なう。次式を最大にする補正量 $\Delta\tau', \Delta\dot{\tau}'$ を決定する事により行なわれる。

$$D(\Delta\tau', \Delta\dot{\tau}') = \sum_{n=1}^N \left[\exp\{-i(\omega_0^n \Delta\tau' + \Delta\Phi_n)\} \times \sum_{k=1}^K D_S(n, k) \cdot \exp\{-i\omega_0^n \Delta\dot{\tau}' \Delta t k\} \right] \quad (10)$$

こうして得られた $\hat{\Delta\tau}, \hat{\Delta\dot{\tau}}$ を用いて観測量としての遅延および遅延率は、次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \tau &= \hat{\tau} + \Delta\hat{\tau} + \Delta\tau' \\ \dot{\tau} &= \hat{\dot{\tau}} + \Delta\hat{\dot{\tau}} + \Delta\dot{\tau}' \end{aligned} \quad (11)$$

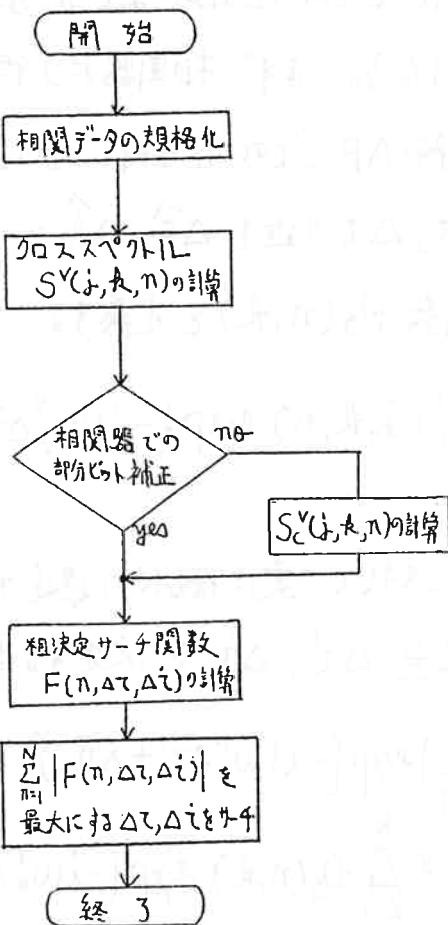
相関強度は最終的に推定した $\Delta\tau, \Delta\tau'$ における D の値として定義される。
すなわち、

$$\hat{\rho} \equiv \alpha |D(\Delta\tau' + \Delta\tau')| \quad (12)$$

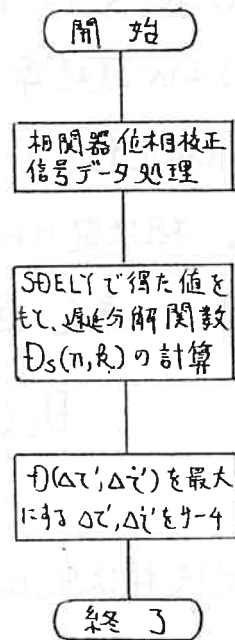
ここで α は規格化係数である。

SDELY 及び MDELY による処理結果は、使用したパラメータと共に
スクラッチファイル上に出力され、KMOUT に処理が引き継がれる。以上、
SDELY 及び MDELY による処理の概要を $\bullet 2$ 図に示す。

SDELY



MDELY



$\bullet 2$ 図 SDELY, MDELY の処理フロー-概要

2.5. KMOUT (KOMB Output module)

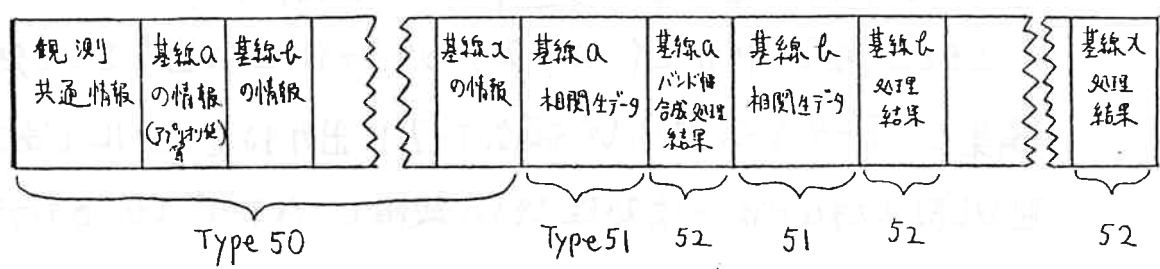
SDELY 及び MDELY によりスクラッチファイル上に出カされた処理結果を編集し、データベース および 磁気テープに出カするモジュールである。Mark III 型 VLBI システムでは 一次処理 終了の段階で、Aテープ 及び Bテープ という 2種類 類の磁気テープ 出カがなされるが、K-3 システムでも、Aテープ、Bテープに相当する α テープ および β テープの 出カを行なう (α テープ と β テープの 違いは、相関生 データを 含むか 含まないかの 違いである)。 α 、 β テープに 含まれるファイルは 1つの 観測に対して 1つのファイルが 対応する。ここで 1つの 観測とは、一連の VLBI 実験中の 観測の単位であり、通常、約 3分前後の 観測時間である。ここで ファイルの レコード 構成において、K-3 システムでは、以下の 点を 考慮に入れた 構造とする。

[ファイル 構造 並びに データ項目での 考慮事項]

- a. 1レコード長は 128ワード (1ワード=16bit) とする。
- b. 1観測につき 1ファイル名
- c. 拡張性のあること。
- d. Mark III システムの Aテープファイル 及び Bテープファイル 内の データ項目を 再現できること。
- e. Mark III システムの Aテープファイル 及び Bテープファイルレコード が 可能なかぎり 冗長性を 排除すること。

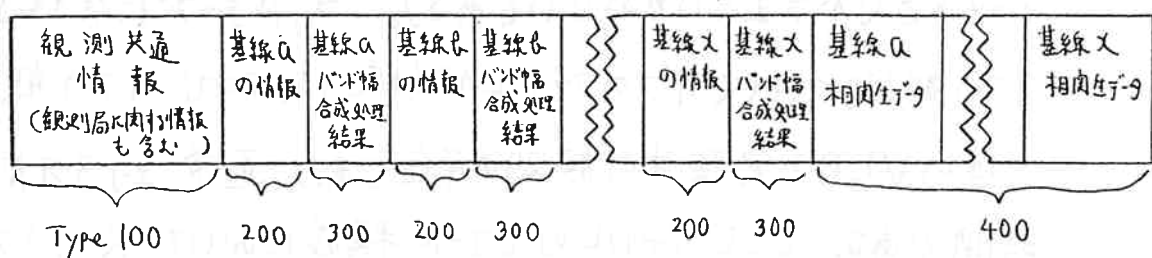
以上の項目中、eの 冗長性の 排除は、今後、VLBI 実験に参加 する局数の 増加を 考えた場合に、蓄積する データ量が 大きく 違ってくる 可能性 があり、重要と 考える。 才3回に Mark III システムの Aテープファイル 構造と、現在 予定している K-3 システム α テープファイル 構造を示す。

(a) Mark III システム A テーポファイル



(B テーポファイルは A テーポファイルより Type 51 を除いたもの)

(b) K-3 システム α テーポファイル



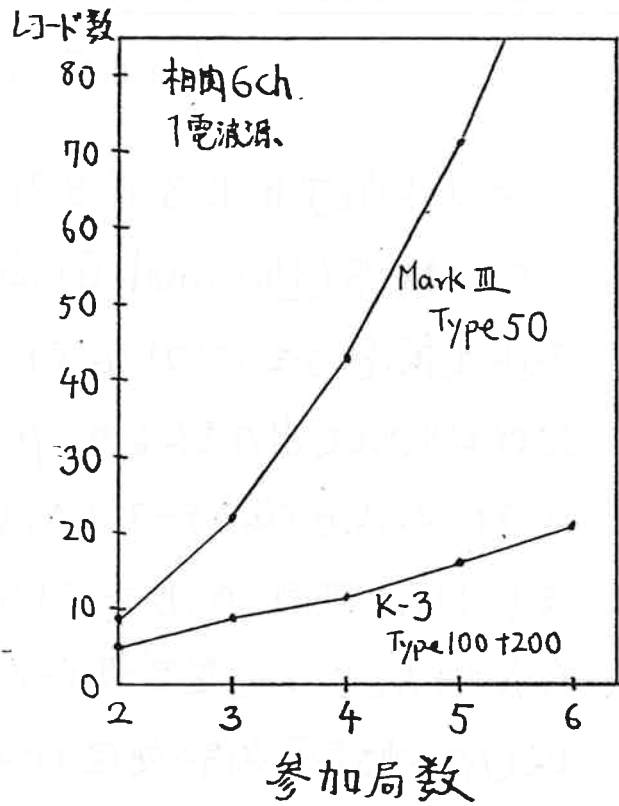
(β テーポファイルは α テーポファイルより Type 400 を除いたもの)

第3図, A テーポファイル, α テーポファイル構成

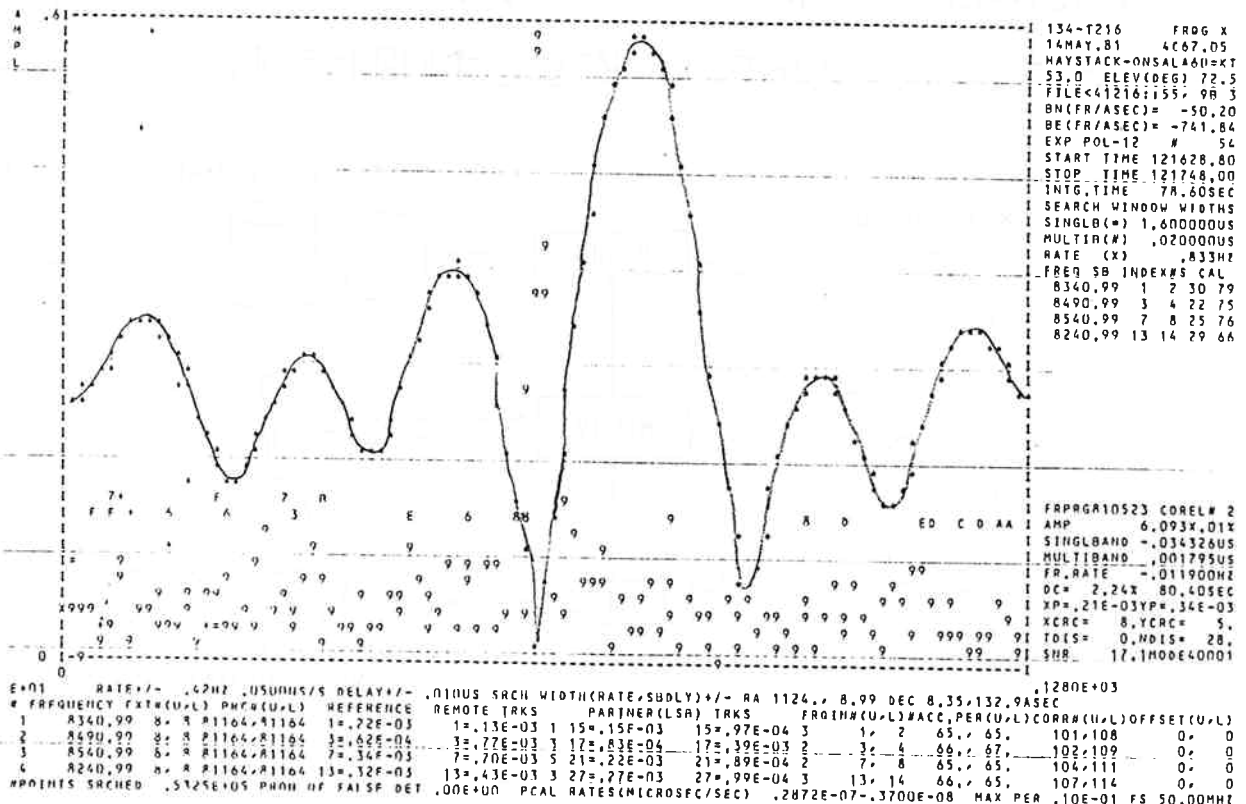
A テーポファイルと α テーポファイル構成では各レコードの並びを変更しただけの様に見えるが、実際には、基線情報中に Mark III システムではデータのかなりの重複が見られ α テーポでは、この重複をなくするようにしている。α テーポファイルにおける Type 100 および 200 レコードは、A テーポファイルの Type 50 レコードに相当するものであるが、現存予定している Type 100, 200 レコードと Mark III システムの Type 50 レコードとのレコード数の比較を第4図に示すが、局数が増えるに従ってデータ量の差が大きくなっていることがわかる。さらに K-3 相関器では Mark III システムに比べて、AP (積分間隔) 時間を2倍以上に設定出来る。その為、相関生データに関しても大幅に、レコード数の減少をはかることが可能である。

KMOUT のもう1つの機能に処理結果のグラフ化出力がある。

才5回にMark IIIシステムによるバンド幅合成処理結果の例を示しているが、K-3システムも同様の出力を行なうが、まずグラフィックターミナルへの出力を行ない、推定量の妥当性を視覚的にもたやすく確認出来るように予定している。



才4回



才5回 Mark IIIシステムにおけるバンド幅合成処理結果出力例 (実線は横軸を遅延残差にした場合の多周波精決定関数を示す)

3. フォーマット変換ソフトウェア (KONV: Kashima Data Format Conversion Program)

本ソフトウェアは K-3 データフォーマットと Mark III データフォーマットおよび NGS (National Geodetic Survey) フォーマット間のフォーマット変換を行なうソフトウェアである。K-3 型 VLBI システムの一次処理結果として出力される α, β テープより、Mark III 型 VLBI システムフォーマットの磁気テープ (A, B テープ) 及びその逆変換の機能を有す。Mark III 型 A, B テープよりの変換の場合には、単に α, β テープの作成のみならず、K-3 型データベースに対して、A, B テープを利用したの二次処理 (バンド幅合成以降の処理) に必要なパラメータの設定も含まれる。

NGS フォーマット (付録参照) とは、国際的測地関係者用に定められたフォーマットであるが、K-3 システムでは KONV により出力される。逆に NGS フォーマットのデータより、データベースのパラメータ及びデータの設定も行なう。本ソフトウェアの概要を Fig. 6 に示す。

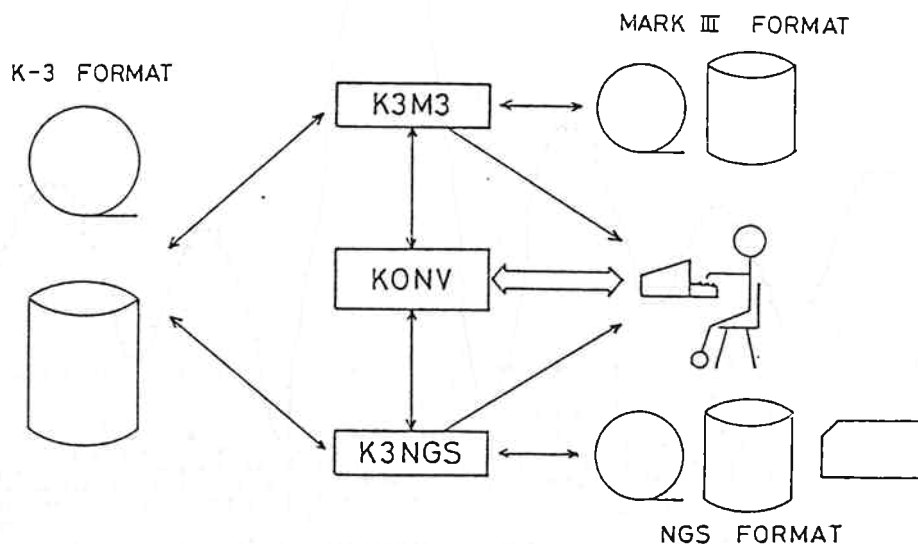


Fig. 6 KONV 概要

表6図に示されるモジュールごとにその機能をまとめておく。

3.1. KONV

フォーマット変換ソフトウェアを統括するモジュールであり、オペレータとのインターフェイスおよび各処理モジュールのスケジューリングを行なう。

3.2 K3M3

K-3型 α, β テープフォーマットデータとMark III型A, Bテープフォーマットデータ間のフォーマット変換並びにデータベースに対して必要パラメータの設定を行なう。

3.3 K3NGS

K-3型データベースデータとNGSフォーマットデータ間のフォーマット変換並びにデータベースに対して必要パラメータの設定を行なう。

4. まとめ

以上、K-3型VLBIシステムのデータ処理解析ソフトウェア群中、一次処理ソフトウェア群の最終段に位置するバンド幅合成ソフトウェア(KOMB)および、データフォーマット変換ソフトウェア(KONV)について述べてきた。バンド幅合成ソフトウェアで使用する処理アルゴリズムはMark IIIシステムで採用しているアルゴリズムと同じものである。Mark IIIチームでは大量のFFTに高速アレープロセッサを使用しているが、我々は現在のところ、アレープロセッサ使用の計画がない。その為、今後の課題として処理時間の短縮の為、積極的に処理アルゴリズムの見直しも必要ではないかと考える。Mark IIIを越える点は蓄積するデータ量の改善にある。また、相関器での積分能力の増加により更に、データ量の減少を

可能としている。

最後に、開発に協力を頂いている VLBI 研究開発本部
および VLBI センター 各位に感謝致します。

参考文献

- (1) 超高精度電波干渉計システム(K-3)研究開発概念書, 電波研究所
- (2) 朽本, 浜, 川口, 雨谷, 河野, 「超高精度電波干渉計(VLBI)システム
の開発 (その4) 広帯域磁気記録装置および再生相関装置」,
第265回研究談話会資料, 1982年7月.
- (3) Whitney, A.R., A.E.E. Rogers, H.F. Hinteregger, C.A. Knight, J.I.
Levine, S. Lippincott, T.A. Clark, I.I. Shapiro and D.S.
Robertson, A very-long-baseline interferometer system
for geodetic applications, *Radio Science*, 11, 421-432, 1976.
- (4) Whitney, A.R., Precision geodesy and astrometry via
very-long-baseline interferometry, Ph.D. Thesis, M.I.T.,
1974.

NGS FORMAT FOR VLBI

Site cards

Col 1- 8: Eight character site name -----
 Col 11-25: X-component of the site position (meters) -----
 Col 26-40: Y-component of the site position (meters) -----
 Col 41-55: Z-component of the site position (meters) -----
 Col 57-60: Axis type (must be AZEL, EQUA, X-YN (for X axis N), or X-YE) --
 Col 61-70: Axis offset (meters)-----

End of site cards is indicated by a card with \$END in Col 1-4

Radio source position cards

Col 1- 8: Eight character source name -----
 Col 11-12: Right ascension hours -----
 Col 14-15: Right ascension minutes -----
 Col 17-28: Right ascension seconds -----
 Col 30 : Declination sign -----
 Col 31-32: Declination degrees -----
 Col 34-35: Declination minutes -----
 Col 37-48: Declination seconds -----

End of source cards is indicated by a card with \$END in Col 1-4

Auxiliary parameters

Col 1-20: Reference frequency (MHz) -----
 Col 21-30: Group delay ambiguity spacing (nsec) -----
 Col 32-33: Delay type (GR-group, PH-phase) -----
 Col 35-36: Delay rate type (GR-group, PH-phase) -----

This card must be followed by a card with \$END in Col 1-4

Data cards

Card # 1:

Col 1- 8: Eight character site name for site 1 -----
 Col 11-18: Eight character site name for site 2 -----
 Col 21-28: Eight character source name for radio source -----
 Col 30-33: Year of observation (e.g. 1979) -----
 Col 35-36: Month -----
 Col 38-39: Day -----
 Col 41-42: Hour -----
 Col 44-45: Minute -----
 Col 47-60: Seconds -----
 Col 61-70: Run identification code (if desired) -----
 Col 71-78: Sequence number -----
 Col 79-80: 01

Card # 2:

Col 1-20: Observed delay (ns) -----
 Col 21-30: Formal error for the observed delay (ns) -----
 Col 31-50: Observed delay rate (ps/sec) -----
 Col 51-60: Formal error for the observed delay rate (ps/sec) -----
 Col 61-62: Data quality flag (blank or 0 indicates good data) -----
 Col 64-65: Delay type (blank if same as in Aux. Par.) -----
 Col 67-68: Delay rate type (blank if same as in Aux. Par.) -----
 Col 71-78: Sequence number -----
 Col 79-80: 02

Card # 3:

Col 1-10: Correlation coefficient (0 - 1) -----
 Col 11-20: Formal error for correlation coefficient -----
 Col 21-30: Fringe amplitude (J) -----
 Col 31-40: Formal error for fringe amplitude (J) -----
 Col 41-60: Total fringe phase (radians) -----
 Col 61-70: Formal error for total fringe phase (radians) -----
 Col 71-78: Sequence number -----
 Col 79-80: 03

Card # 4:

Col 1-10: System temperature at site 1 (K) -----
 Col 11-15: Formal error for system temperature at site 1 (K) -----
 Col 16-25: System temperature at site 2 (k) -----
 Col 26-30: Formal error for system temperature at site 2 (K) -----
 Col 31-40: Antenna temperature at site 1 (K) -----
 Col 41-45: Formal error for antenna temperature at site 1 (K) -----
 Col 46-55: Antenna temperature at site 2 (k) -----
 Col 56-60: Formal error for antenna temperature at site 2 (K) -----
 Col 71-78: Sequence number
 Col 79-80: 04

Card # 5:

Col 1-10: Cable calibration correction (one-way) for site 1 (ns) -----
 Col 11-20: Cable calibration correction (one-way) for site 2 (ns) -----
 Col 21-30: Water vapor radiometer parameter at site 1 (ns) -----
 Col 31-40: Formal error for WUR at site 1 (ns) -----
 Col 41-50: Water vapor radiometer parameter at site 2 (ns) -----
 Col 51-60: Formal error for WUR at site 2 (ns) -----
 Col 62 : Water vapor radiometer parameter definition code for -----
 site 1 as follows:
 0 - parameter is zenith path delay
 1 - parameter is path delay along line-of-sight
 Col 64 : Water vapor radiometer parameter definition code for -----
 site 2 (see above)
 Col 71-78: Sequence number
 Col 79-80: 05

Card # 6:

Col 1-10: Ambient atmospheric temperature at site 1 (deg. C) -----
 Col 11-20: Ambient atmospheric temperature at site 2 (deg. C) -----
 Col 21-30: Ambient atmospheric barometric pressure at site 1 (mb) -----
 Col 31-40: Ambient atmospheric barometric pressure at site 2 (mb) -----
 Col 41-50: Ambient atmospheric humidity parameter at site 1 -----
 Col 51-60: Ambient atmospheric humidity parameter at site 2 -----
 Col 62 : Humidity parameter definition code for site 1 as follows: ---
 0 - humidity parameter is relative humidity (%)
 1 - humidity parameter is dew point (deg. C)
 2 - humidity parameter is wet bulb temperature (deg. C)
 Col 64 : Humidity parameter definition code for site 2 (see above) --
 Col 71-78: Sequence number
 Col 79-80: 06

Card # 7:

Col 1-10: Time difference between the reference epoch (card 1) and ----
 the start of the observation (e.g. -60.) (seconds)
 Col 11-20: Duration of the observation (seconds) -----
 Col 21-30: A priori UTC offset at site 1 (if any) (seconds) -----
 Col 31-50: Observation frequency (MHz) (blank if same as in Aux. Par.) --
 Col 51-60: Group delay ambiguity (ns) (blank if same as in Aux. Par.) ---
 Col 71-78: Sequence number
 Col 79-80: 07

Card # 8:

Col 1-70: Comment text
 Col 71-78: Sequence number
 Col 79-80: 08