

K S P 相関器チェックあれこれ

近藤 哲朗¹、木内 等²、関戸 衛¹

1 鹿島宇宙通信センター

2 標準計測部

1. はじめに

我が国初の（当時としては世界2番目の）測地VLBI処理用相関器（K3相関器）が開発されてから、10数年が経つ。そして今回我が国としては2番目（実運用に耐えうるという意味で）の測地目的相関器（KSP相関器）が開発された。ところで相関器の開発は相関が検出できた段階で、その開発の大半が終わったように思われがちだが、実は相関が出た後が大変である。特に測地目的の場合は、相関が出たが答えはでたらめ、というのでは後の基線解析には使えない。相関が出た後の答え（具体的には遅延時間）が正しいか妥当なものか、そうでないかの検証が大変なのである。ここでは、KSP用相関器の開発最終段階で行ったチェックとデバグの例を紹介する。

2. 出口のないトンネル

KSP相関器は時系列上で処理を行う相関器であり、時系列上でかけ算の演算（ X ）をしその後必要に応じて周波数領域（ F ）に変換を行うことから XF タイプと呼ばれる。このタイプの相関器では1つの観測（数10秒から数100秒）データは数秒単位（この単位をPP（パラメータピリオド）と呼ぶ）毎に処理される。この処理単位の間、相関結果は積分されていくが、次に述べる項目すべてが正常に機能または正常値でなければ相関は検出されないか、意味ある遅延時間を得ることができない。それらは①再生されたデータの同期（同期再生）、②遅延時間および変化率の予測値、③遅延オフセット、④遅延追跡、⑤フリンジストッピング、⑥ビットシフト毎の90度位相ジャンプ、さらにバンド幅合成と呼ばれる遅延時間の精密決定時に必要となる⑦位相校正（PCAL）信号の検出である。

これらの機能がすべて正常に動作しているかを相関器出力のみから判断することは容易ではない。これらのチェックには相関器出力から各項目を抜き出したり、PP毎の相関関数を表示したり、観測全体にわたって積分したりといった専用のツール（ソフトウェア）が必要となる。まずはこうした専用のソフトウェアを開発しなければならない。

K3相関器を開発した当時はFORTRANしか使用できないこともあり、チェック用プログラムの開発が大変であり、そのプログラム自体のデバグにも時間を費やされたものである。ところが、KSP相関器開発にあたっては計算機環境が大きく進歩し、PV-WAVE（またはIDL）という非常に強力な行列処理、FFT、グラフィック表示機能を有した会話型言

語を使用することができるようになり、相関器デバッグツールを簡単に開発することができるようになった。

それではKSP相関器開発の山場となったデバッグの一例を示そう。

まず、相関が検出され、バンド幅合成も一見正常に行なわれるようになったあと（この段階に達するまでに幾多のデバッグはあったが省略）、K3処理結果とKSP処理結果の比較を行った。その結果、粗決定と呼ばれるビデオ帯域内の情報のみでの遅延時間の決定結果はK3相関器の処理結果と良く一致するのだが、精決定（バンド幅合成）結果が全然一致しないという致命的問題が発生した（図1）。このままでは測地目的に使用することは

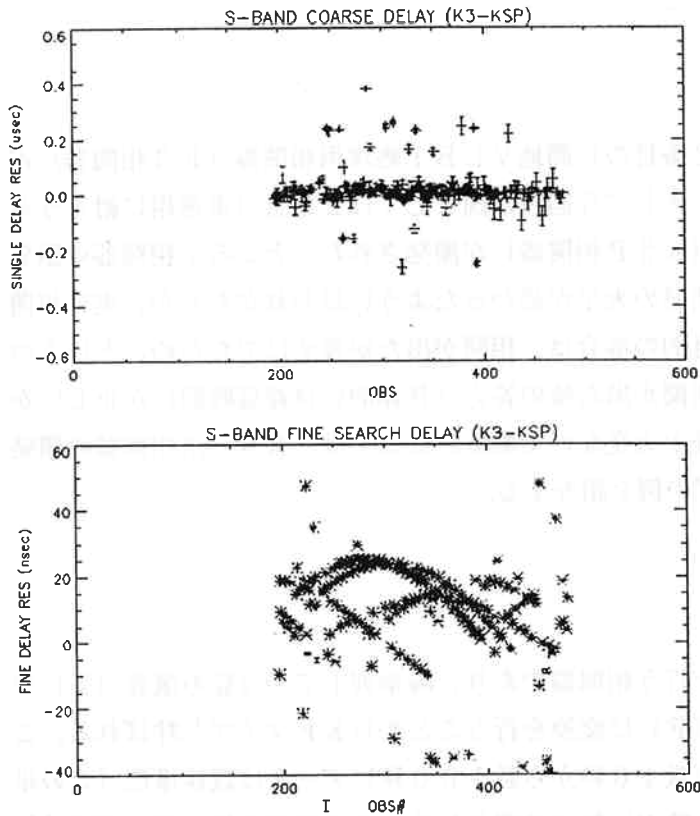


図1 K3処理結果とKSP処理結果の比較（改修前）。上図：粗決定結果、下図：精決定結果

いちはFORTRANプログラムでやっていたのでは時間がかかるばかりでなく、原因究明への論理的思考の流れが寸断されてしまう。その点、PV-WAVEを使ってのインタラクティブ処理では問題点に集中することが可能となり、原因を芋づる式に解明していくことができた。

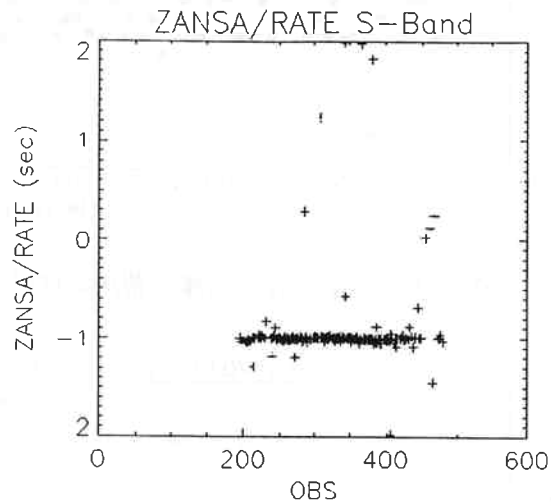
さて、図1に示されるように粗決定遅延はK3と同じ結果が得られているのだが、精決定遅延が大きくばらついており、そのバラツキはXバンドの場合はバンド幅合成をやる限りはさけることのできない遅延時間のアンビギュイティ全体にばらついていた。これでは、答えが求まっていないのと同じである。

このデバッグは困難を極めそうであったが、K3との差に見られる放物線のようなパターンが原因解明の大きなヒントとなった。観測する電波星に依存したパターンとなっており、

できない。何とか原因を解明しなくては行けないが、糸口が掴めない場合、こうしたデバッグ作業は出口のないトンネルに入ったような絶望的な感じからスタートする。しかしながら推論を重ねていくうちに、やがて推理小説の中で犯人に迫っていくような楽しみに変化してくる。こうなればしめたもので原因解明は間近に迫っていることが多い。この時のデバッグも後半はこうした醍醐味を味わった。

こうした、不具合原因の推論にあたってPV-WAVEで作成したプログラムが大いに役立った。不具合点の目星をつけ、その部分を集中的にインタラクティブに処理し、図示していくのだが、こうした処理をいち

これはランダム誤差ではなく系統誤差が現れていることを物語っている。この原因の解明はある程度の目星をつけたあとは試行錯誤（またはひらめき）の世界ともなり、如何に多くの要因を思いつうことができるかが勝負となってくる。この場合は直感的に遅延変化率と関係がありそうだとねらいをつけて、図1で見られた精決定の残差（K3との差）をそれぞれの遅延変化率で割った量をプロットしてみた。するとどうだろう、見事に-1秒に値が集中したのである（図2）。このとき用いていたPPが1秒であった。つまり、相関処理のPP毎に用いられる予測値と実際にその予測値が反映されなくてはいけないPPとの間に1PP分のずれがあったのである。



こうして無事、出口のないトンネルのように思えたこの難関もくぐり抜け1基線処理ではあったが、KSP相関処理システムが実処理に耐える装置として産声を上げた。1995年11月のことである。

図2 精決定残差(K3-KSP)/遅延変化率。-1秒のところにデータが集中する。

3. 閉じない三角形

完成したかに見えたKSP相関器に意外な落とし穴があったことが多基線処理が始まるとともにあきらかとなってきた。その中で最後まで残っていた問題は粗決定遅延に見られるビット単位のオフセット（とび）であった。このオフセットは粗決定結果を元に各局のクロックオフセットとして相関処理にフィードバックするとき問題となる。このバグは3基線データのいわゆるクロージャーテスト（図3）を

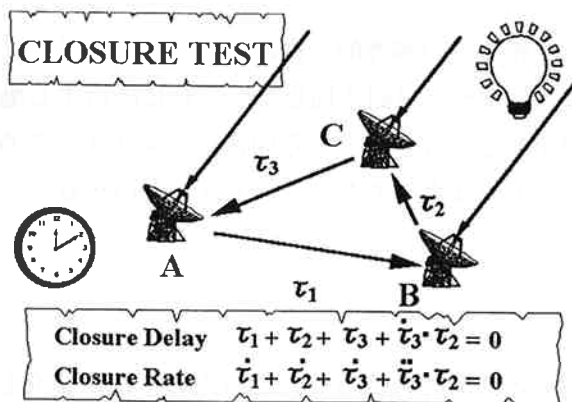


図3 クロージャーテスト

行って初めて明らかになった問題点であった。つまり、三角形が閉じなかったのである（図4）。1基線処理では全く問題が生じないのであるが、3局以上のデータレコーダを同期再生する段階での主従関係から生じるビット単位の誤差の蓄積で発生することが明らかになった。この原因追究にも臨機応変に問題点をグラフ化して表示できたPV-WAVEの使用が大いに威力を発揮した。

現在、この問題点も改修され、図5に示されるような良好な結果が得られるようになっ

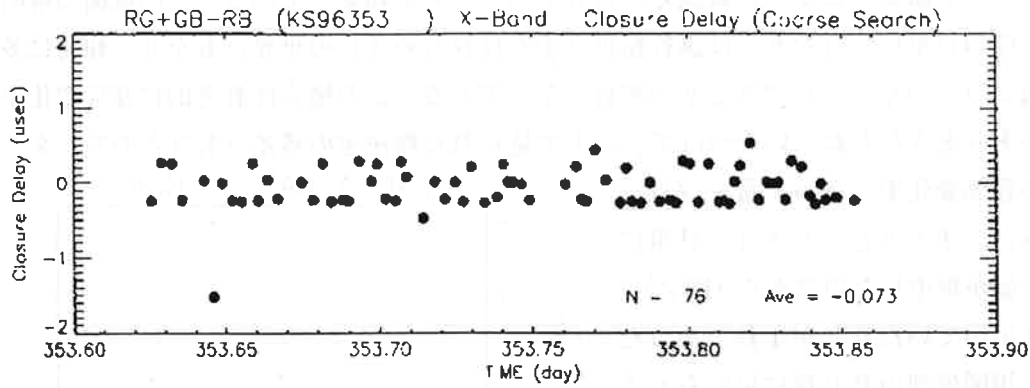


図4 鹿島-小金井-三浦 粗決定遅延クロージャータテスト (改修前)

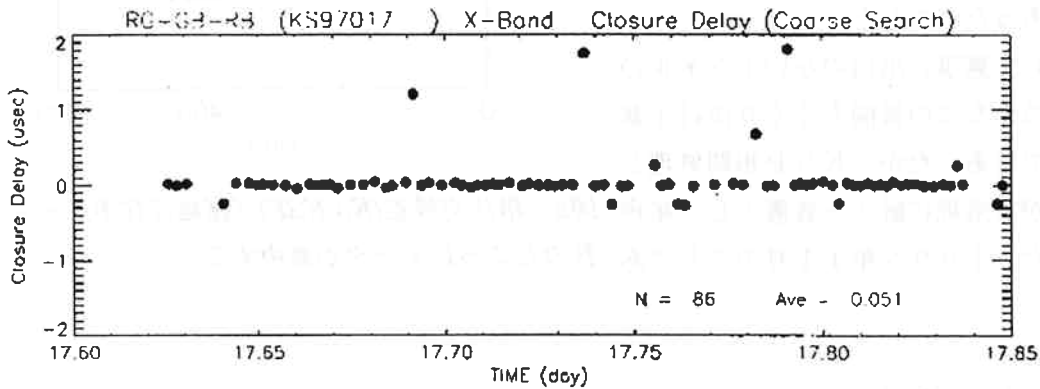


図5 鹿島-小金井-三浦 粗決定遅延クロージャータテスト (改修後)

た。こうした相関器の基礎的な機能を確立しておくことは相関データを測地以外の副産物（たとえば天文学や惑星間空間擾乱観測）に応用する場合の絶対条件である。

現時点で相関器に残されている問題は、マイナーな点ばかりであり、測地応用に重大な影響を及ぼすものはすべてクリアーできたといえる。

4. 最後に

KSP相関器開発時のデバッグ作業の内の2例を紹介したが、デバッグ時の苦勞の一端と、推理のおもしろさを多少でもわかっていただければ幸いである。こうした努力は定常運用となると忘れられてしまうものであり、私（TK）としてもいつまでも心に留めておいてもらいたいというつもりはない。技術の継承のためにはデバッグ作業のすべてを文書化して残して置かなくてはいけないのだろうが、残念ながら大半は私の頭の中にしか、それもその場に遭遇しないと思い出せないような記憶としてしか残っていない。これはいわば経験と呼ばれるものである。年寄りが大事にされるとするならば、ひとえにこの経験と呼ばれるものの豊富さ故であるが、それも段々と必要性が感じられない（報われない）ような組織と成りつつあるような気がするのは私だけであろうか。故に同じ過ちは繰り返される。ということで私の経験は墓場の中に持っていくしかないか。