

1A2 宇宙飛翔体位置決定を目的とした IP-VLBI システムによる相対 VLBI 観測 -- 「GEOTAIL」衛星試験観測結果 --

近藤哲朗, 市川隆一, 小山泰弘, 中島潤一, 関戸 衛, 川合栄治
木村守孝, 大崎裕生, 大久保寛 (通総研)
「のぞみ」相対 VLBI グループ
(宇宙研、国立天文台、NASDA、山口大、通総研)

Delta VLBI Observations Using IP-VLBI System for Orbit Determination
of Deep Space Spacecraft

-- Experimental Results of GEOTAIL Observation --

Tetsuro Kondo, Ryuichi Ichikawa, Yasuhiro Koyama, Junichi Nakajima, Mamoru Sekido
Eiji Kawai, Moritaka Kimura, Hiro Osaki, Hiroshi Ohkubo (CRL)
and NOZOMI Delta-VLBI group

Key Words: GEOTAIL, NOZOMI, Delta VLBI, IP-VLBI, Internet, Group Delay

Abstract

Communications Research Laboratory has promoted a research on the spacecraft positioning technology by using a delta VLBI technique. The general-purpose VLBI system (IP-VLBI) using the Internet and the personal computer has been developed as a part of this project. Although an IP-VLBI system aims at correlation processing in real-time, at present, off-line observations and correlation processing are possible. Delta VLBI test observations of "GEOTAIL" spacecraft were carried out using this IP-VLBI system in collaboration with the Institute of Space and Astronautical Science and the National Astronomical Observatory to check automatic operation software, and to evaluate the accuracy of observed delay (group delay and phase delay) obtained by IP-VLBI system. Our final target is to utilize the delta VLBI observation for the determination of "NOZOMI" spacecraft orbit during the period just before the last earth swing-by to the Mars.

1. はじめに

通総研では相対 VLBI 観測による宇宙飛翔体軌道決定技術に関する研究を進めており、その一環として、インターネットおよびパソコンを利用した汎用の VLBI システム (IP-VLBI) を開発している¹⁾。IP-VLBI システムの目標は実時間 VLBI システムであるが、現時点ではオフライン観測が可能となっている。この IP-VLBI システムを用いて、宇宙研および国立天文台と共同で「GEOTAIL」衛星を利用した相対 VLBI 試験観測を実施した。試験観測の目的は宇宙飛翔体に対する VLBI 観測運用ソフトの開発と実観測での信頼性評価、および VLBI 観測によって得られる観測遅延 (群遅延および位相遅延) の精度の検証を行い、火星探査機「のぞみ」の最終地球スウィングバイ直前の軌道決定可能性の評価に役立てることである。

2. IP-VLBI システム

IP-VLBI システムは VLBI 観測局から相関処理局への実時間データ転送にインターネット・プロトコル (IP) を使用した汎用の実時間 VLBI システムを目指して開発されており、電波星からの信号のサンプリングから相関処理まで、すべてを汎用の PC で行うことができるシステムである。システムの心臓部であるサンプラーボード (PCI バスボード) のサンプリング周波数は 1 チャンネルあたり最高 16 MHz であり、補助ボードの使用により 4 ch 入力が可能である。図 1 にボードの写真、表 1 に仕様を示す。現在、測地 VLBI 観測のデータ速度は 1 ビットの A/D 変換で 16 MHz サンプリング \times 16 ch、すなわち総ビットレートで 256 メガビット毎秒が通常である。したがって観測データ

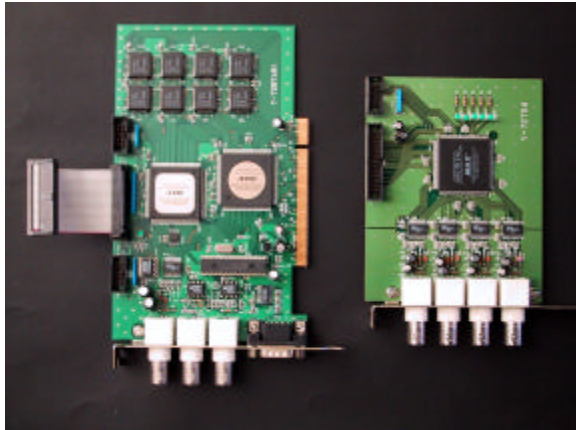


図1 . I P - V L B I サンプラーボード。

を実時間転送するためにはギガビット毎秒クラスのスピードのインターネット接続が必要となるが、すべての観測データをハードディスクに蓄えるオフライン観測や、バッファメモリに蓄えたデータをより低速で転送するという運用形態も可能であり、現在、こうした運用形態を考慮した自動観測ソフトウェアの整備を行っているところである。

サンプラーボード用のドライバーはFreeBSD、Windows 2000用が開発されているが、Linux用も近々リリースされる予定である。

我々が自動運用ソフト開発用に構築しているシステムはFreeBSD 4.5を使用しており、ハードディスクはPC 1台あたり480GBを実装している。サンプラーボードの能力としては4ch、8ビット16MHzサンプリング(=512Mbps)が可能であるが、現状では安定に動作するビットレートの最大は64Mbpsである。したがって、「GEO-TAIL」試験観測時には4ch、4ビット4MHzサンプリング(=64Mbps)モードでの観測を行った。

表1 . I P - V L B I サンプラーボード仕様

基準周波数入力	10 MHz (+10dBm)
基準1 PPS 信号入力	TTL レベル正極性 1 μ s ~ 500 μ s
入力ch数	1ch 4ch (補助ボード使用時)
A / D 分解能	1, 2, 4, 8 ビット分解能
サンプリング周波数	40kHz, 100kHz, 200kHz, 500kHz, 1MHz, 2MHz, 4MHz, 8MHz, 16MHz

注：トータルビットレートが64Mbpsを越えると安定動作しない場合あり(OSおよびディスクによる)



図2 . 観測局配置

3. 「GEOTAIL」試験観測

3-1 観測

2002年6-7月に4回の「GEOTAIL」試験観測を行った(表2)。IP-VLBIシステム

表2. 「GEOTAIL」試験観測日程

年月日	時刻(JST)	参加局(局名の後の数字はアンテナ直径(m))
2002/06/04	15:49-23:00	白田 64、鹿島 34、 鹿島 11、水沢 10 ^{*1} 、 山口 32 ^{*2}
2002/06/25	17:30-23:38	鹿島 34、鹿島 11、 小金井 11
2002/06/28	10:58-12:00	鹿島 34、鹿島 11、 小金井 11
2002/07/20	10:05-13:16	鹿島 11、小金井 11、 岐阜大 11

*1: 落雷障害のため欠測

*2: 時系の不具合のため相関は未検出

の入力4chの内、2chを使用してXバンドおよびSバンドの2MHz帯域の信号を1観測あたり10秒から60秒間観測した。ベースバンド周波数はそれぞれ8473.60MHz、2258.90MHzに設定し、サンプリング周波数は4MHz、A/D分解能は4ビットとした。観測局配置を図2に示す。

3-2 相関処理

IP-VLBIサンプラーボードで取得したデータの相関処理は、幾何学的遅延時間 t 、遅延時間の変化率 \dot{t} 、 \ddot{t} 、および $\ddot{\dot{t}}$ の予測値を用いて行う。測地VLBI用途に開発された予測値計算プログラムでは電波源はクエーサーなど天球上で動かない天体に対して、地球の自転のみを考慮に入れた予測値計算であるために、人工衛星等高速度で移動する電波源に対しては適切な予測値が求められていない可能性がある。そこで6月4日に行った鹿島-白田基線での観測に関して衛星を移動しない天体と扱った場合の \dot{t} の差を求めてみると、図2に示されるように、毎秒数ナノ秒に達する差が生じていることが分かった。受信周波数 $\times \dot{t}$ がフリッジ周波数となるので、8GHz帯ではこの差は10Hz以上ともなり、例えば測地VLBI処理に通常使用される1秒単位の積分を行ってしまうと、フリッジが検出できなく

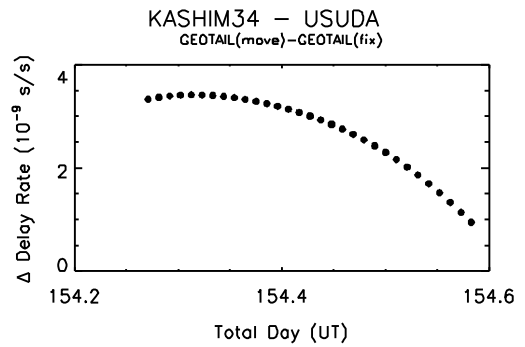


図3. 遅延時間変化率(\dot{t})の予測値の誤差。GEOTAILの実際の移動を考慮した場合と固定した場合の差

なってしまう。そこで、衛星の移動を考慮した予測値計算プログラムを開発し、IP-VLBIデータの相関処理(PCでの相関処理)を行った。なお、積分の最小単位が1秒かつ予測値計算がクエーサーなど非移動天体に限定された従来のハードウェア相関器(KSP相関器など)では、GEOTAIL衛星の相関処理が不可能である。

こうして相関処理したGEOTAILデータの一例(粗決定サーチ関数²⁾)を図4、5に示す。それぞれの図はフリッジレートおよび遅延を予測値に対して変化させた場合の相関強度の変化を示しており、相関強度が最も大きくなるフリッジレートおよび遅延が観測されるフリッジレートおよび遅延(群遅延)ということになる。なお基線は鹿島34m-白田基線であり、図4はGEOTAILのXバンドテレメ

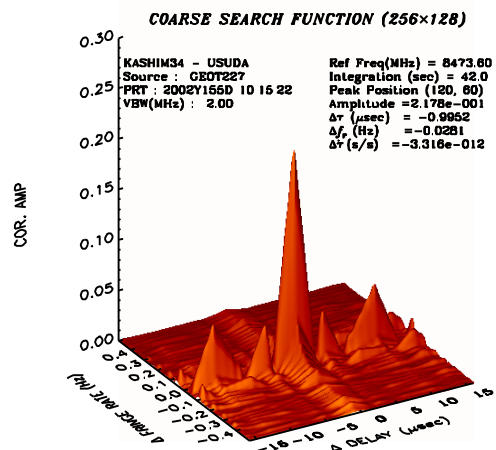


図4. GEOTAILデータ(Xバンド)の相関関数(粗決定サーチ関数)。観測時刻は2002/06/04 10:15UT。

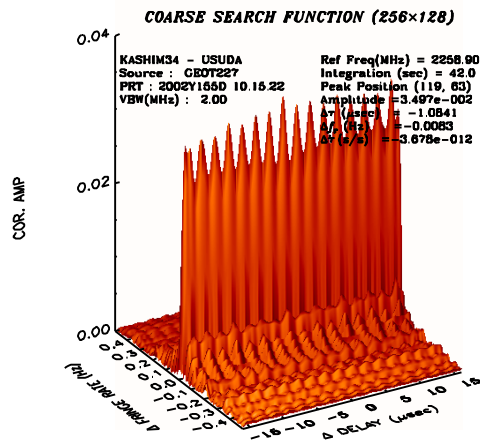


図5. GEOTAILデータ(Sバンドレンジモード時)の相関関数。観測条件は図4と同じ。

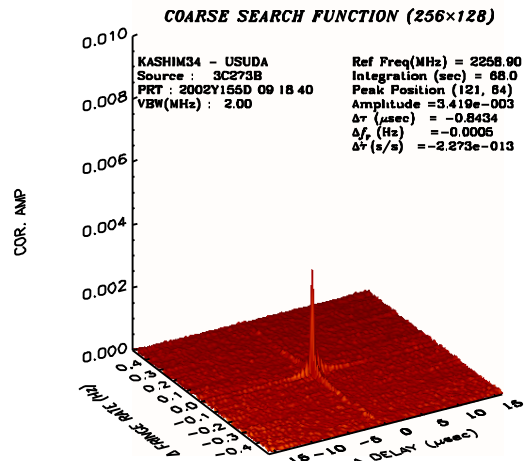


図7. 3C273B(Sバンド)の相関関数(粗決定サーチ関数)。観測条件は図6と同じ。

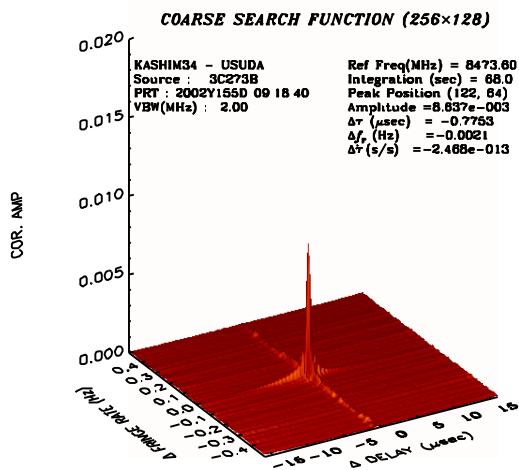


図6. 3C273B(Xバンド)の相関関数(粗決定サーチ関数)。観測時刻は2002/06/04 09:18:00UT。

トリー信号を受信した場合で、図5は同じ時間帯のSバンドテレメトリー信号である。この時間帯Sバンドはレンジモードと呼ばれるモードで運用されており、キャリアから500kHz上下に離れた所にトーン波が立っているスペクトルとなっていた。そのため $2\mu\text{sec}$ ($=500\text{kHz}$ の逆数)のアンビギュイティが遅延時間残差方向に現れている。図6, 7にはクェーサー(3C273B)観測時の相関処理結果を示す。

GEOTAIL受信時の相関関数とクェーサー受信時の相関関数を比較して、ピークの鋭さに違いが

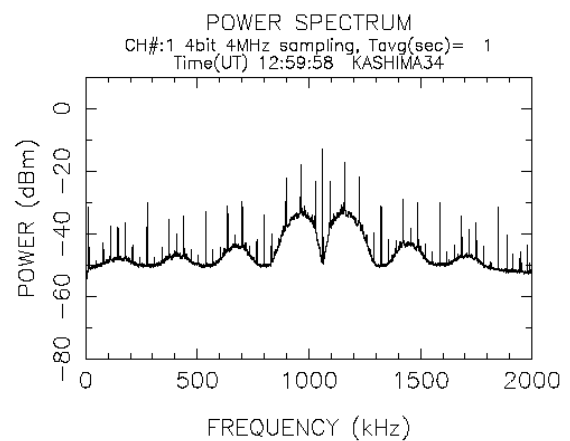


図8. GEOTAIL信号(Xバンド)のスペクトル。0Hzは8473.60MHzに相当する。

見られるが、これはクェーサーが広帯域白色雑音信号であるのに対して、GEOTAILのスペクトルが狭帯域であるためである(図8)。狭帯域なテレメトリー信号で実際に群遅延が計測できるかどうか、試験観測以前に問題となっていたが、今回の試験観測により、テレメトリーのモードにもよるが、アンビギュイティを生じることなく群遅延が計測できることが示された。群遅延計測は、位相遅延計測時のアンビギュイティ除去にもつながることから、今回の試験観測の重要な成果の一つである。

4. クロージャーテストによる精度評価

V L B I 観測システムの客観的評価方法としてク

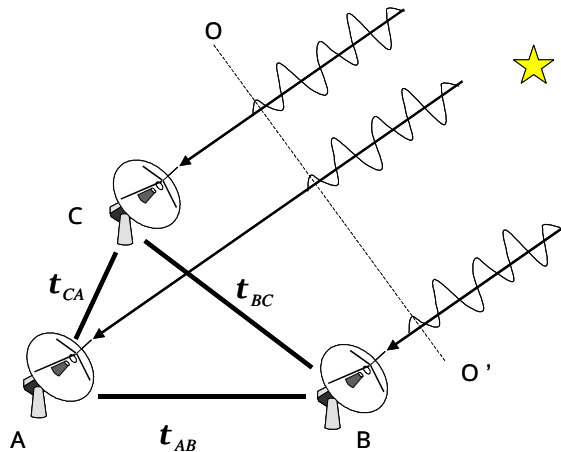


図9 . クロージャーテストの原理。

クロージャーテストと呼ばれるテストがある。図9に示されるような3局 A,B,C で観測を行い、それぞれの基線毎に t_{AB} 、 t_{BC} 、 t_{CA} という遅延が観測されたとき、

$$t_{AB} + t_{BC} + t_{CA} = 0 \quad (1)$$

が成立するという性質を用いて、観測システムおよび相関処理システムの不具合をチェックするものである。なお、ここで t_{AB} などにおいて添字は基線を表し、最初の文字が相関処理の基準局を表している。したがって、相関処理時の基準とする局が t_{BA} のように逆になった場合は符号を考慮する必要がある。また厳密に議論するためには(1)式では不十分で地球回転の影響(遅延時間変化率)を考慮に入れる必要があるが、日本国内短基線で、0.1nsec程度の精度を議論する場合には(1)式で十分である。

今回の試験観測結果に対してクロージャーテストを行った結果を図10から13に示す。それぞれの

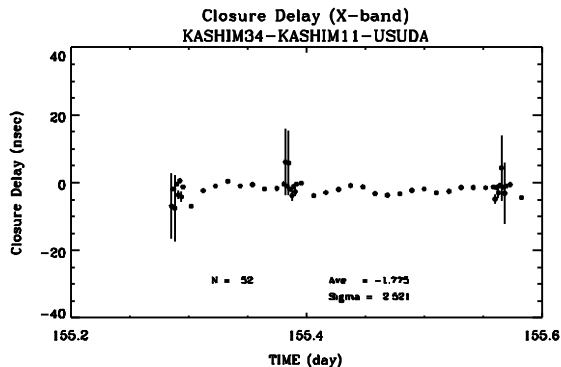


図10 . 2002/06/04 試験観測のクロージャーテスト結果(鹿島34 - 鹿島11 - 白田64)

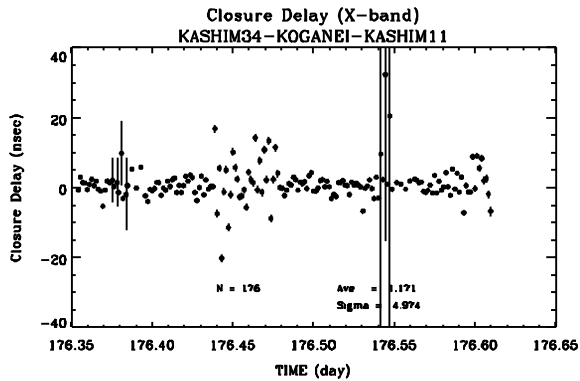


図11 . 2002/06/25 試験観測のクロージャーテスト結果(鹿島34 - 小金井11 - 鹿島11)

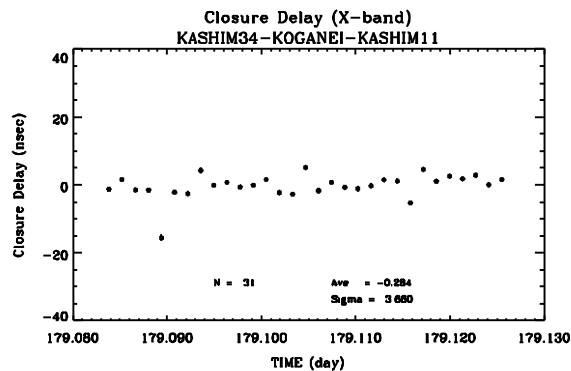


図12 . 2002/06/28 試験観測のクロージャーテスト結果(鹿島34 - 小金井11 - 鹿島11)

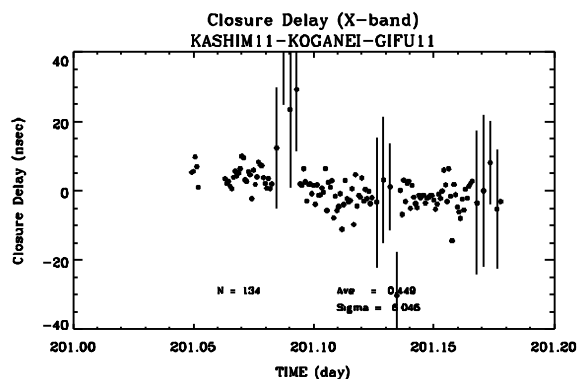


図13 . 2002/07/20 試験観測のクロージャーテスト結果(鹿島34 - 小金井11 - 岐阜大11)

図でエラーバーは相関強度から計算される理論値を示している。大きなエラーバーがクロージャーを観測した場合の結果を示しており、GEOTAIL観測時のエラーバーは非常に小さな値(1nsec以下)となっている。クロージャーテスト結果には大きなバイ

アスは見られず、観測システムおよび相関処理で矛盾が無かったことを意味している。ところでGEOTAILに対するクロージャーテスト結果がエラーパー以上にばらついているが、このばらつきが相関処理も含めたシステムとしての観測精度を表しているものと考えられる。このばらつき（標準偏差）は数nsec程度であり、今回の試験観測の観測時間が10秒から60秒であることを考慮すると、数10分ごとの代表値としては単純なモデル（例えば多項式近似）を使うことにより、精度が数倍向上することが期待される³⁾。

5. おわりに

開発中のIP-VLBIシステムを使用してGEOTAILの試験VLBI観測を行うとともに、自動観測ソフトウェアのチェックとデバッグを行い実運用に耐えうる自動観測ソフトウェア（但しオフライン観測）を完成させた。PCによる相関処理についてもクロージャーテストにより致命的エラーが生じていないことが確認され、IP-VLBIシステムの有用性が示された。

今回の試験観測によりテレメトリー信号を信号源と見なすVLBI観測において、アンビギュイティを生じることなく群遅延が計測できることが示されたが、群遅延計測から更に高精度な遅延時間を与え

る位相遅延計測時のアンビギュイティ除去につなげることができる可能性が示されたと言える。

今後は位相遅延解析を実施し、遅延時間の計測精度を一桁以上向上させ0.1nsec以下の精度の達成を目指す。また現時点ではオフライン観測であるが、インターネットを利用した準実時間相関処理、更には実時間相関処理が可能となるよう自動観測ソフトウェアの整備を進め、2003年6月に予定されている火星探査機「のぞみ」の最終地球スウィングバイに備えた直前の軌道決定観測に臨みたい。

参考文献

- [1] Kondo, T, Y. Koyama, M. Sekido, J. Nakajima, H. Okubo, H. Osaki, S. Nakagawa, and Y. Ichikawa: Development of the new real-time VLBI technique using the Internet Protocol, Technical Development Center News CRL, No.17, pp.22-24, 2000.
- [2] 高橋富士信、近藤哲朗、高橋幸雄：VLBI技術、オーム社、pp.91-97、1997.
- [3] 市川隆一、「のぞみ」相対VLBIグループ：1A3 IP-VLBIシステムを用いた相対VLBI試験観測によるGEOTAIL軌道推定の試み、第46回宇宙科学技術連合講演会集録（本集録）、2002.