

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

○ 市川隆一、近藤哲朗、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、山口大学、岐阜大学、通総研)

Performance of Delta VLBI Observation using IP-VLBI System for the Orbit Determination of the GEOTAIL Spacecraft

ICHIKAWA Ryuichi, KONDO Tetsuro, KOYAMA Yasuhiro, NAKAJIMA Junichi, SEKIDO Mamoru,
KWAJ Eiji, KIMURA Moritaka, OSAKI Hiro, and OHKUBO Hiroshi (CRL)

NOZOMI Delta-VLBI group (ISAS, NAO, NASDA, Yamaguchi Univ., Gifu Univ, FUJITSU co. Ltd., and CRL)

Key Words: NOZOMI, GEOTAIL, Delta VLBI, orbit, IP-VLBI

Abstract

We performed a preliminary differential VLBI (DVLBI) observation with National Astronomical Observatory (NAO) and the Institute of Space and Astronautical Science (ISAS) to determine precise orbit of the GEOTAIL spacecraft. The purpose of this observation is to establish the positioning technology for the interplanetary spacecraft using differential VLBI in real-time. Our main concern is to determine the PLANET-B (NOZOMI) orbit just before the second swing-by on next March [Yoshikawa et al., 2001]. We evaluate the errors in group delay observable obtained by the IP-VLBI system through the correlation process. The errors less than 1 nsec are achieved for the Kashima-Koganei baseline (about 110km). We will try to determine the spacecraft orbits based on these group delay data sets using the software package (currently underdevelopment).

1. はじめに

通信総合研究所では、宇宙科学研究所、国立天文台、および山口大学と共同で磁気圏観測衛星 GEOTAIL の相対 VLBI 試験観測を 2002 年 6 月 4 日以降数度にわたって実施した。この観測は、相対 VLBI 法による高精度軌道推定技術の確立が目的であり、2003 年 6 月に予定されている火星探査船「のぞみ」の第 2 回スイングバイの直前に相対 VLBI 法で軌道決定を行うための技術開発という位置づけである [1]。これは、その第 2 回スイングバイの直前には、探査船に搭載されたハイゲインアンテナが地球に正対しないため、従来の RANGE&RANGE RATE (R&RR) 法で必要とされる信号を十分な強度で取得できず、相対 VLBI 法での軌道推定が必要とされていることによる。また、通信総合研究所では「宇宙における時空標準基盤技術の研究」というプロジェクトの中で実時間での宇宙飛翔体軌道決定技術の確立を目指しており、今回の試験観測はこの研究を推進する上でも重要である。本報告では、この試験観測で取得された相対 VLBI データの予備的な解析結果について述べる。

2. 観測スケジュールとデータ取得システム

まず、表 1 に 2002 年 8 月 20 日現在までに行った観測の概要を示す。

表1 GEOTAIL 衛星試験観測の概要

観測日	観測参加局	記録システム	観測した QSO
2002.5.23 09:00UT-11:00UT	鹿嶋 34m、鹿嶋 11m	K4、IP-VLBI	3C273B,3C345
2002.6.4 06:45UT-13:45UT	鹿嶋 34m、臼田 64m、山口 32m	K4(※)、IP-VLBI	3C273B,3C274
2002.6.25 07:00UT-14:00UT	鹿嶋 34m、鹿嶋 11m、小金井 11m	IP-VLBI	3C273B,3C279, 1219+044,1222+037
2002.6.28 02:00-03:00UT	鹿嶋 34m、鹿嶋 11m、小金井 11m	IP-VLBI	なし
2002.7.20 01:30UT-04:15UT	鹿嶋 11m、小金井 11m、岐阜 11m	IP-VLBI	3C273B、4C39.25

※鹿島と臼田のみ

この表に示した一連の相対 VLBI 観測の中で、最初に実施した 2002 年 5 月 23 日の観測は観測スケジュールや信号強度の評価を目的とした予備観測である。我々が通常の VLBI 観測で受信する電波源であるクェーサーは赤道座標系ではほぼ不動点と見なした位置で記述されるのに対し、宇宙飛行体を観測対象とする相対 VLBI 観測では赤道座標系で記述した電波源位置が常に移動するため、アンテナ制御と関係の深い観測スケジュールの作成について特に留意した。具体的には、鹿島 34m アンテナや鹿嶋、および小金井の 11m アンテナを用いた通常の VLBI 観測では、まずクェーサーの赤経・赤緯の値を観測スケジュールファイルに記載しておき、そのファイルをアンテナ制御用計算機に読み込ませる。観測が開始されると、アンテナ制御用計算機は入力された赤経・赤緯にしたがって、任意の時刻でのアンテナの方位・仰角を計算してアンテナを自動的に駆動する。

しかしながら、時々刻々と赤経・赤緯が変化する宇宙飛行体からの発信電波をアンテナビームの中心で確実に受信するためには、その位置変化に対応したスケジュールを作成し、アンテナを小刻みに駆動する必要がある。今回は GEOTAIL 衛星から発射される S 帯と X 帯の電波を受信したが、鹿島 34m アンテナで X 帯受信に有効なアンテナビームの半値幅はわずか 0.073 度である。これに対し

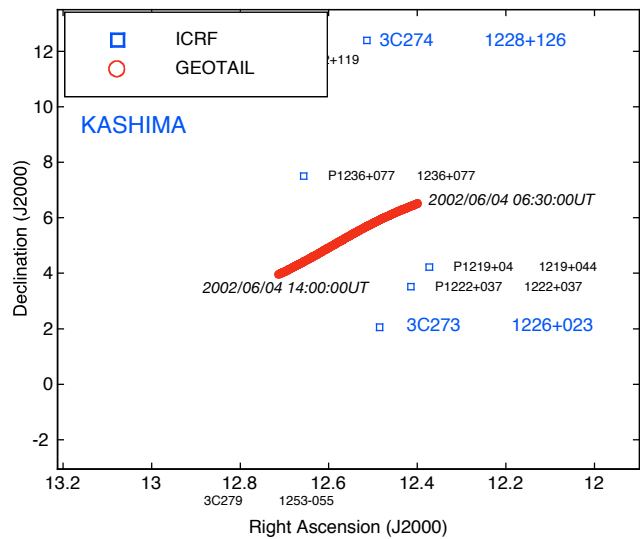


図1 GEOTAIL 衛星の位置変化と相対 VLBI 観測の対象とした電波現天体位置

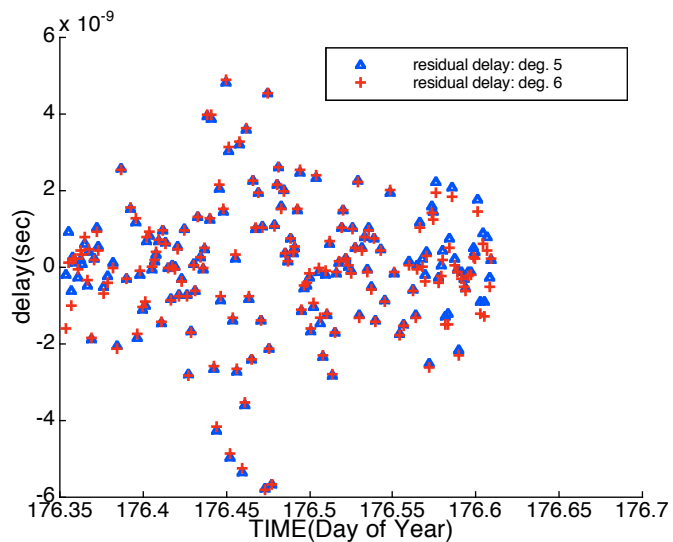


図2 2002 年 6 月 25 日の鹿島 34m-小金井 11m 基線での GEOTAIL 群遅延データに対する多項式近似結果

て、図1の2002年6月4日のGEOTAIL衛星の位置変化の例に示すように、GEOTAIL衛星は天球上を1分あたり約0.014度移動するため、計算上は5分強でこの半値幅から外れることになる。そのため一連の観測では、半値幅のさらに2分の1以下の範囲内にGEOTAIL衛星が収まるように、1ないし2分毎の天球上の衛星位置を各時刻毎に記載した専用の観測スケジュールファイルを作成し、これによりアンテナ制御を行った。

3. 相対VLBI観測

相対VLBI法による本観測は、今までに2002年6月4日、6月25日、7月20日の3回実施した。これらの観測では、各々3～6時間程度の観測時間を設定し、観測開始直後や終了前の約30分間、あるいは観測時間中に1～数回キューサーとGEOTAIL衛星を交互に観測し、その他の時間帯は連続してGEOTAIL衛星を観測するといったスケジュールを使用した。6月4日の観測で従来のVLBI観測システムであるK4システムをバックアップに用いた他は、主に通信総合研究所で現在開発中のインターネットVLBIシステム[2]を用いてデータ取得を行った。これは、遠隔地にある複数の電波望遠鏡で受信した信号をPCで取得してデータ生成、さらにそのデータをインターネットで相関局へ伝送し、将来的には実時間で相関処理・解析を目指す画期的なシステムである。本システムの詳細については近藤他[2]の解説を参照されたい。現時点での観測では、IP-VLBIシステムに搭載されているハードディスクにデータを取り込むため、このディスクで取得可能なデータ容量に合わせて、スケジュールの各々の時刻ではGEOTAIL衛星を10～50秒観測した。なお、一連の観測に参加した電波望遠鏡の配置についても、同論文の図2に示されている。

4. 予備的な解析結果

既に近藤他[3]に報告があるように、各局で受信したGEOTAIL信号を相関処理した結果、信号のモードにもよるが群遅延決定が可能であることが確かめられている。そこで、得られた群遅延データの精度評価を簡単に試みた。ここでは、群遅延データの時系列に対して多項式を当てはめ、双方の残差のRMS(root mean square)を計算し、そのRMSの大きさを評価の指標とした。本来は、飛翔体位置や速度、

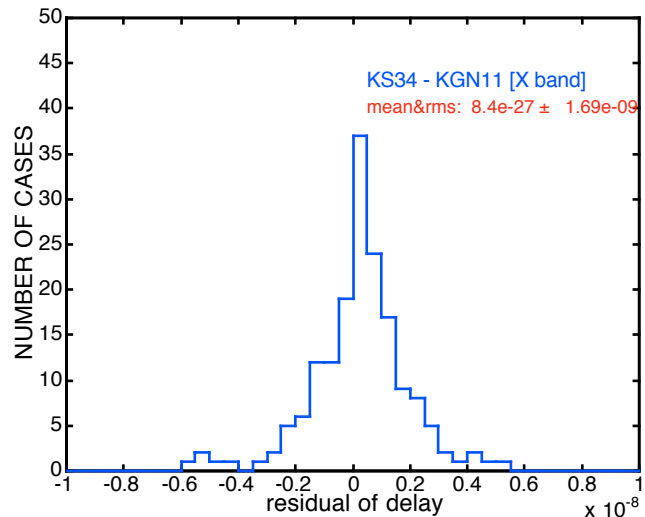


図3 2002年6月25日の鹿島34m-小金井11m基線でのGEOTAIL群遅延データに多項式近似でフィッティングをかけた際の遅延残差頻度分布

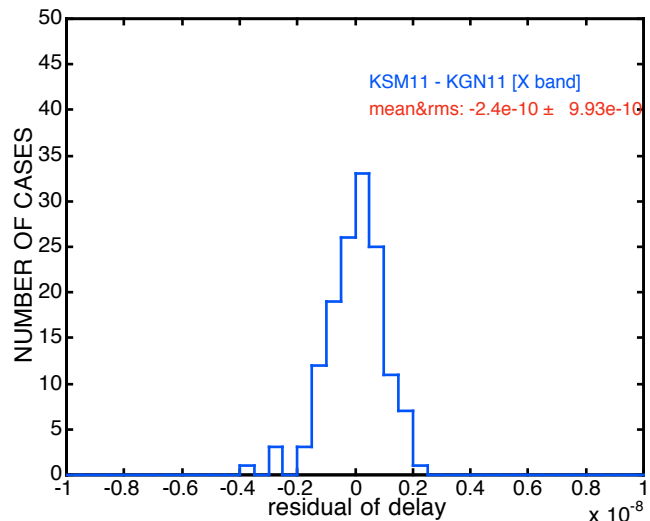


図4 2002年7月20日の鹿嶋11m-小金井11m基線でのGEOTAIL群遅延データに多項式近似でフィッティングをかけた際の遅延残差頻度分布

表2 GEOTAIL 群遅延データに対する多項式近似で得られた遅延残差のRMS

(単位：ナノ秒、KS11:鹿嶋 11m、KG11：小金井 11m、KS34:鹿島 34m、GF11:岐阜 11m、US64:白田 64m)

観測日	KS11-KS34	KS11-KG11	KS11-GF11	KG11-GF11	KS34-KG11	KS34-US64	KS11-US64
2002/6/4	-	-	-	-	49	48	47
2002/6/25	1.2	4.2	-	-	1.7	-	-
2002/7/20	-	0.99	2.1	2.5	-	-	-

加速度、中性大気や電離層での伝搬遅延などをパラメータとする観測方程式がここで用いた多項式の代わりに組み込まれて、実際の軌道推定を行うことになる。この軌道推定プログラムは現在開発中である。

図2に6月25日に取得されたGEOTAIL群遅延データに対する多項式近似の結果例を示した。これは、群遅延データの近似に用いた多項式の次数毎に、双方の残差をプロットした時系列であり、解析対象としたのは鹿島34m-小金井11m基線である。図中では次数5と次数6の例を示した。この解析では次数

6の場合に残差の自乗和が最小となったため、その時点で近似が収束したと判断した。図3はこの解析での残差の頻度分布を示したものであり、このときの残差の平均値とRMSは、それぞれ 8.4×10^{-27} 秒、1.7nsecであった。さらに、図4は7月20日に取得された鹿嶋11m-小金井11m基線でのGEOTAIL群遅延データに対して同様に多項式近似した際の残差頻度分布で、残差の平均値とRMSは、それぞれ -2.4×10^{-10} 秒、0.99nsecであった。

表2に、今まで実施した3回の相対VLBI観測で得られたGEOTAIL群遅延データに対する多項式近似で得られた遅延残差のRMSをまとめた。表中、6月4日の解析結果でRMSの値が他と比べて一桁程度悪いのは、IP-VLBIシステムによるデータ取得に若干の問題があったことに起因する。この問題は既に解決され、正常な状態で6月25日、および7月20日の観測でのデータが取得された。この表からわかるように、各観測時間中のGEOTAIL衛星から得られた全群遅延データに何らかの関数をあてはめることにより、概ね1~4nsec程度の精度が確保されていることがわかる。

しかしながら、「のぞみ」の高精度軌道決定では0.1nsec程度の精度が要求されており、今回の群遅延データの予備的な精度評価結果では不十分である[4]。そこで、群遅延データの時系列にみられる比較的短周期の変動にも追従してフィッティングができるように、全データを約15分ごとの区間に分けて再度多項式近似を試みた。図5は、7月20日に実施した相対VLBI観測で得られた群遅延データへここで示した方法を用いてフィッティングをかけた結果である。図中では、特に鹿嶋11m-小金井11m基線で残差のRMSが0.5nsec程度で決まっていることが示され、全データを15分ごとに区間で分けて解析を行った効果が明ら

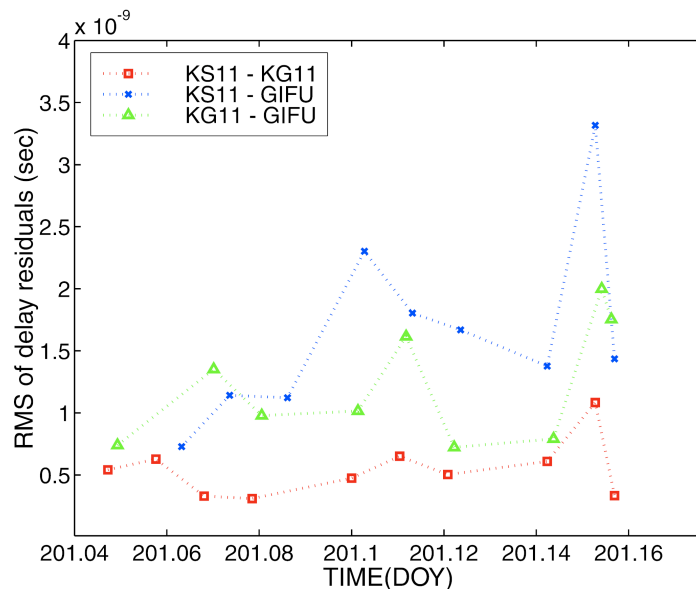


図5 2002年7月20日のGEOTAIL群遅延データを約15分毎に分割して区間毎に多項式近似を行った場合の遅延残差RMSの時間変化。

かである。

一方、その他の鹿嶋 1 1 m-岐阜 1 1 m、および小金井 1 1 m-岐阜 1 1 mの両基線では RMS が 1nsec を切る結果が数ケース得られているものの、鹿嶋 1 1 m-小金井 1 1 m基線に比べると顕著な効果が見られない。実は、この日の観測では観測スケジュールの不具合と各局でのアンテナ制御計算機の時刻同期が不充分という 2 つの理由から各局での GEOTAIL 衛星の観測時間にずれが生じ、基線毎で相関処理可能なデータにばらつきがあった。これが両基線での RMS がさほど改善されていない主な要因と考えられる。

5. まとめ

2003 年 6 月に予定される火星探査船「のぞみ」の高精度軌道決定、および将来的に実時間で軌道決定技術の確立を目指して、地球磁気圏観測衛星 GEOTAIL をターゲットとした相対 VLBI 観測を実施した。取得したデータを相関処理した結果から群遅延データを得ることが可能であり、これの精度評価を簡単に行った。簡単な多項式近似による評価では、最大約 300km の国内基線において得られた群遅延残差の RMS が 1~4nsec 程度であることがわかった。さらに、観測時間を約 1 5 分ごとに区切った評価では、約 110km の基線で 0.5nsec 程度まで改善されることが確かめられた。今回の観測では一部トラブルがあったため、今後さらに長基線での GEOTAIL、および「のぞみ」の試験観測によりデータを取得し精度向上を目指すと同時に、実際の軌道推定で必要とされる飛翔体位置、速度、加速度、地球大気での伝搬遅延誤差などをパラメータとした観測方程式を構築し、実際の軌道決定ソフトウェアを開発する予定である。

参考文献

- [1] Yoshikawa M., Sekido M., Kawaguchi N., Fujisawa K., Hanada H., Kono Y., Hirabayashi H., Murata Y., Sawada-Satoh S., Wajima K., Asaki Y., Kawaguchi J., Yamakawa H., Kato T., Ichikawa T., and Ohnishi T., Present status and future problems of the orbit determination for Nozomi spacecraft, IVS Technical Development Center News, No. 19, p.37-40, 2001.
- [2] Kondo, T., Koyama Y., Nakajima J., Sekido M., Ichikawa R., Kawai E., Okubo H., Osaki H., Kimura M., Ichikawa Y., and GALAXY team, Real-time Gigabit VLBI System and Internet VLBI System, IVS 2002 General Meeting Proceedings, 142-146, 2002.
- [3] 近藤他、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-、第 46 回宇宙科学技術連合講演会集録(本集録)、2002.
- [4] 石橋史朗、軌道決定グループ、V L B I 観測データを用いた軌道決定精度解析、平成 14 年度アストロダイナミクスシンポジウム、A8、2002 年