

飛翔体の VLBI 観測-2005 年状況報告-

関戸 衛¹、市川隆一¹、吉川真²、
加藤隆二²、望月奈々子²、村田泰宏²、大西隆史³、
飛翔体 VLBI 観測グループ⁴

1:情報通信研究機構 (NICT)

2:JAXA/宇宙科学研究本部 (ISAS)

3:富士通

4: NICT、ISAS、天文台、国土地理院、岐阜大、山口大、北海道大

2006 年 1 月 20 日

概要

我々は、VLBI 観測データを飛翔体のナビゲーションの高精度化に応用するため、JAXA/ISAS の s 深宇宙探査機 NOZOMI、HAYABUSA などターゲットとして研究を進めている。2006 年は ISAS の小惑星探査機 HAYABUSA をターゲットとしての VLBI 観測を行ってきた。その結果、HAYABUSA から送信されるレンジ信号、テレメトリ信号といった信号では遅延計測精度の目標精度とする $1 \text{ ns} (= 1. \times 10^{-9} \text{ sec})$ を切る精度の計測が困難であることがわかってきた。これはこれらの信号の有効帯域幅が十分に広帯域でないことによるものである。JPL/NASA が HAYABUSA を運用する最に使用する DDOR の信号を 2005 年 9 月に日本でも観測することができた。この信号の周波数解析を行うと、約 1MHz 毎のマルチトーン信号が使われていることが確認され、米国の運用では地上からのアップリンク信号を広帯域化することにより、より精度の高い群遅延計測を実現していることがわかった。

1 はじめに

日本の深宇宙探査機のナビゲーションにはこれまで主にレンジとレンジレートの計測データが使用されてきたが、これらは主に視線方向に感度をもっている。一方で、VLBI 観測データは電波源の天球面上の(視線方向に垂直な)座標に高い感度をもつため、両者の組合せによりより精密な機道決定ができると期待されており、実際に米国 JPL/NASA で使用されている [1]。我々は、日本の宇宙技術として VLBI を宇宙探査機の軌道決定に利用する技術を獲得するため、JAXA/ISAS と日本の VLBI 関連研究機関で共同研究を行なっている [2]。

2 2005 年の観測実績

2005 年に行なった HAYABUSA の VLBI 観測に参加した VLBI 局を図 1 に示す。また、2005 年に行なった HAYABUSA VLBI 観測の概要を表 1 に示している。主な要点を以下に列挙する。

レプリカ信号の利用：群遅延計測の精度がなかなか 1 ns を切ることができないことが問題となっている。3月に、白田局からのレンジのアップリンク信号を送信前に分岐して、雑音を含まない信号(レプリカ)を VLBI 観測にあわせて記録した。衛星から折り返されて地上の VLBI 局で観測される信号とレプリカ信号との相関処理を行なうことで大きく SNR を改善することが可能と考えられる。このとき HAYABUSA は地球から見て太陽を挟んだ反対側の軌道にあって、信号は往復で 4AU 近く飛行した後地上局で観測される。交差方程式を使った予測遅延時間を計算し、40分近い遅延時間を入力として相関処理を行なってみると短時間

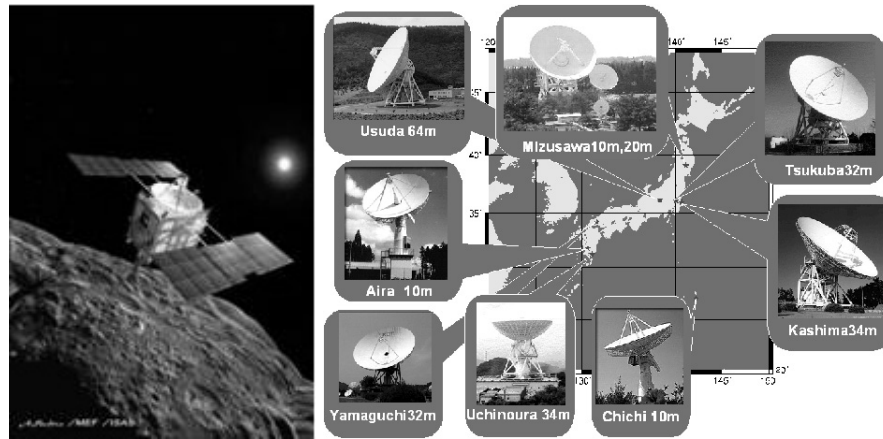


図 1: HYBS のイトカワ接近時想像図 (左: JAXA 提供) と HAYABUSA 観測に参加した 国内の VLBI 観測局 (右)。JAXA 宇宙科学研究本部の臼田 64m、内之浦 34m、NICT の鹿島 34m、国土地理院のつくば 32m、父島 10m、始良 10m、国立天文台の水沢 20m、山口大学の 32m アンテナが観測に参加した。

表 1: 2005 年に行なったの HAYABUSA の VLBI 観測の概要

日付 (yyyy/doy)	参加局数	観測時間 (h)	目的	備考
2005/089	3	4.5	レプリカ信号実験	相関処理レート残差がおおきい
2005/150	7	8.1	群遅延相対 VLBI	群遅延精度不十分
2005/151	7	8.1	群遅延相対 VLBI	群遅延精度不十分
2005/179	5	8.5	群遅延相対 VLBI	HAYABUSA のフリンジ検出不可
2005/181	6	8.5	群遅延相対 VLBI	HAYABUSA のフリンジ検出不可
2005/182	6	8.5	群遅延相対 VLBI	大型 Ant. 間では HAYABUSA フリンジ検出
2005/183	5	8.5	群遅延相対 VLBI	大型 Ant. 間では HAYABUSA フリンジ検出
2005/185	6	8.5	群遅延相対 VLBI	大型 Ant. 間では HAYABUSA フリンジ検出
2005/223	5	7.5	帯域濾過フィルタ除外	フィルタ有無に大きな差は見られず
2005/248	2	7.5	DDOR 観測	DDOR 信号確認
2005/308	6	10.0	位相遅延 相対 VLBI	処理/解析中
2005/316	5	10.0	位相遅延 相対 VLBI	処理/解析中
2005/323	6	10.0	位相遅延 相対 VLBI	処理/解析中
2005/329	4	10.0	位相遅延 相対 VLBI	処理/解析中

(数ミリ秒) の積分でも高い SNR でフリンジは検出されたものの、フリンジレート残差が非常に大きく、正常な遅延量の計測値を出すまでソフトウェアを改良する必要があることがわかった。大きなフリンジレート残差の原因には次のような二つの要因が考えられる。(1) 地上観測データ同士の相関処理では、片道の伝搬時間の差が遅延量となるため多くの誤差要因がキャンセルされるが、レプリカ信号と地上観測データの相関処理の場合には往復の遅延時間の和になるため、探査機の位置誤差、惑星歴の精度などの誤差要因が加算される。それだけ高精度の遅延時間の理論計算が必要となる。(2) 探査機で信号を折り返し送信する際には、UPLINK 信号と異なる周波数に変換して送信される。この時使用される探査機内部の局部発信器 (LO) の安定度が十分高い ($1.e-12$ 以上) か、または LO のリファレンス信号が、UPLINK 信号に同期していれば、信号はコヒーレントに地上に伝送されるので問題ない。そうでない場合、つまり LO に安定度の悪い発振器を使用していた場合、レプリカ信号と受信信号の位相差は、幾何学的な距離の変化率などと無関係にドリフト/変動する可能性がある。実際に、HAYABUSA の LO はアップリンク信号に同期しない設計といわれている。

(1) の問題は、物理モデルの高精度化など、データ処理で解決すべきな問題であるが、(2) は、探査機のハードウェア設計の中で決まることであり、今後の探査機計画の中で検討してもらうように提言しておく必要があるだろう。

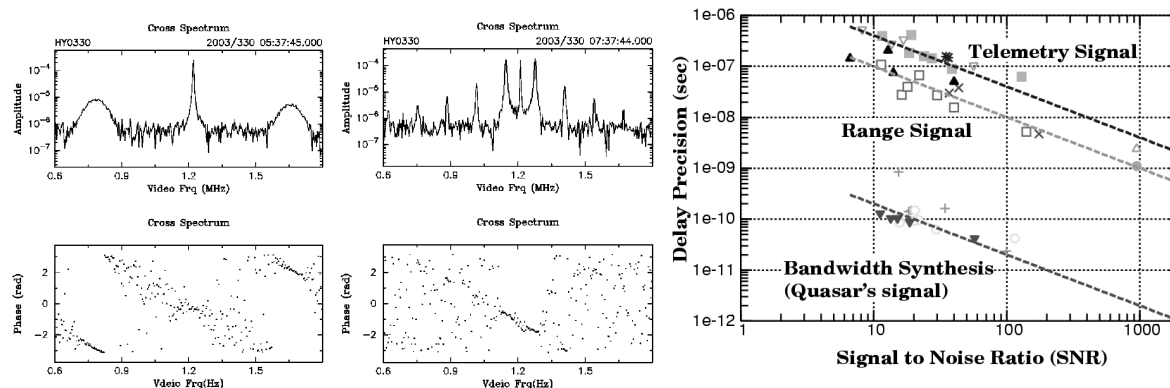


図 2: HAYABUSA のレンジ信号 (左)、テレメトリ信号 (中) の相互相関パワースペクトル (上側) と位相 (下側)。右端の図は、レンジ信号とテレメトリ信号の VLBI 遅延計測精度および、クエーサ信号を 8ch で受信しバンド幅合成したデータの遅延計測精度と SNR の関係。

群遅延を使った相対 VLBI：5 月から 7 月にかけて、群遅延量を観測量とする相対 VLBI 観測を計画し、ISAS の白田 64m、内之浦 34m、NICT の鹿島 34m、NAOJ の水沢 20m、GSI のつくば 32m、父島 10m、始良 10m が参加して HAYABUSA の VLBI 観測を行なった。しかしながら、遅延時間の計測精度は図 2(右) の結果が示すように、現在日本側で行なっている HAYABUSA の信号では、十分高い精度の遅延計測が困難であることが明らかとなってきた。図 2 右のパネルは、HAYABUSA の送信するレンジ信号、テレメトリ信号、それぞれを地上のアンテナで VLBI 観測し、得られた遅延時間の精度 (平均値のまわりのバラツキ) をその信号の信号帯雑音比 (SNR) に対してプロットしたものである。明らかに信号ごとに遅延計測精度に差があり、同じ SNR の場合、テレメトリ信号よりもレンジ信号のほうがやや遅延計測精度が高いことがわかる。これは、レンジ信号 (有効帯域 = 約 450kHz) の方がテレメトリ信号 (有効帯域幅 = 約 100kHz) よりも広帯域である (図 2 左) ことによるものである。一般に群遅延 (周波数に対する位相勾配) の計測精度は信号の帯域幅の逆数と SNR に反比例する。同図の中に比較例としてクエーサを 360MHz 帯域に散らばった 8ch の信号チャンネルで記録したデータを位相合成した場合の遅延計測精度をプロットしている。これは通常の測地 VLBI 観測で使用されるバンド幅合成の手法であり、周波数配列は通常測地 VLBI で使用されるものを使った。このとき有効帯域幅は約 140MHz あり、HAYABUSA の場合とは桁違いに高い遅延計測精度を達成していることがわかる。飛翔体の群遅延計測で目標とする 1ns を切る精度を得るには、信号そのものを見直す必要性が認識された。

フィルタを外して広帯域化試験：8 月には、群遅延計測精度の改善を意図した信号の広帯域化の試みとして、日本側の HAYABUSA のレンジ運用で通常使用されてきた機上のフィルタを取り除いた運用を JAXA/ISAS にお願ひし、VLBI 観測を行なった。しかしながら、その場合の群遅延計測精度はフィルタを用いた場合と大きく変わらず、信号そのものが本質的な問題であることが再認識された。

DDOR 観測：9 月、HAYABUSA が JPL/NASA の DSN 局より運用される機会に、JPL が行なっている DDOR (Differential Delta Oneway Range) の信号を観測することができた (図 3)。このとき我々の観測システムでは 4MHz の帯域しか記録しなかったが、DDOR 信号は約 1MHz 間隔のマルチトーン信号で構成され、4MHz 以上の帯域にわたって広がった信号を使っていることがわかった。我々も、限られた送信電力を使って有効帯域幅を改善するためには、マルチトーンの信号を使うことは一つの有効な手法であると考えており [3]、JPL もマルチトーンを使った信号で有効帯域幅の拡大 → 群遅延計測精度の向上を行なっていることが確認された。

位相遅延相対 VLBI：現在の信号形態では、群遅延量を観測量とする VLBI 実験では十分な精度の遅延計測が困

難であることが明らかになり、高精度を得るには位相遅延量を使うことがますます必要とされてきた。位相遅延には波長の整数倍の不定性の問題があり、トータルの遅延量絶対値を得ることが困難である。しかし、ターゲットの位置があらかじめ高い精度(フリンジ間隔以下)で得られている場合には、不定性をゼロとして取り扱うことが可能となる。HAYABUSA は2005年夏に小惑星イトカワとランデブー飛行に成功し、11月にはイトカワに着陸してサンプルの採取を試みた。小惑星イトカワは高い精度で軌道が既知と考えられており、HAYABUSA が小惑星イトカワとランデブー飛行している期間は、HAYABUSA の位置も高い精度で既知として取り扱うことができる。我々は、位相遅延量を使った相対 VLBI の計測精度の確認/実証を目的に、11月の HAYABUSA が小惑星イトカワとランデブー飛行し、着陸する時期に、ISAS、NICT、国土地理院、天文台、山口大学の VLBI アンテナが協力した VLBI 観測を実施した。現在そのデータの解析中である。

3 まとめ

2005年に行なった観測から、現在の HAYABUSA の信号形態では、高い精度の群遅延を得ることが困難であり、JPL の DDOR 信号のような広い帯域に強度分布を持つ信号を利用する必要性が認識された。また、レプリカ信号の利用は、完全マッチドフィルタと等価であり、SNR の改善に依然として重要だと考えられるが、その実現には、高い遅延予測計算の精度と、宇宙機のトランスポンダの局部発振器に高い安定性が要求されることなどがわかってきた。また、位相遅延量を利用する実験として、軌道が精密に知られている小惑星イトカワとのランデブー飛行を行なっている時期に複数回に渡って複数基線で VLBI 観測を行なうことに成功し、群遅延を越える高い遅延計測精度をもつ、位相遅延量の利用についても貴重なデータを得ることができた。このデータから位相遅延量を利用する実績、あるいは問題点などのノウハウが得られると期待され、解析が急がれている。日本の宇宙機の高精度な軌道決定のために、VLBI を活用する技術の獲得に向けてより一層の奮起が必要とされている。

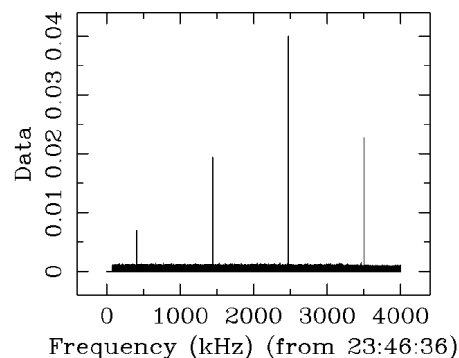


図 3: 白田局で受信した DDOR 信号のスペクトル

参考文献

- [1] J. S. Border, F. F. Donovan, S. G. Finley, C. E. Hildebrand, B. Moultrie, and L. J. Skjerve, "Determining Spacecraft Angular Position with Delta VLBI: The Voyager Demonstration." *AIAA/AAS Astrodynamics Conference Aug.* pp. 9-11, 1982 San Diego, California, AIAA-82-1471. 1982.
- [2] 関戸衛、市川隆一、大崎裕生、近藤哲朗、小山泰弘、吉川真、大西隆史、「のぞみ」相対 VLBI グループ、「VLBI による飛翔体の観測- NOZOMI と HAYABUSA-」, 2003 年度 VLBI 懇談会シンポジウム集録, pp86-89, 2004.
- [3] 関戸衛、市川隆一、「飛翔体の VLBI 群遅延計測に適した信号形態についての検討」第 6 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門 講演会論文集 pp. 395-396. 2005.