

VLBIによる飛翔体位置計測 —データ解析の現状について—

関戸衛、市川隆一、大崎裕生、近藤哲朗、小山泰弘(通総研)

吉川真(宇宙航空研究開発機構/宇宙科学研究本部)

大西隆史(富士通先端科学ソリューション本部)

「のぞみ」相対 VLBI グループ (JAXA, 通総研、国立天文台、
国土地理院、北大、岐阜大、山口大、SGL/Canada)

1 はじめに

通信総合研究所では時空基盤技術プロジェクトの一環として、宇宙飛翔体の高精度位置計測の研究を行っている。2002年終わりから2003年の前半にかけて、宇宙航空研究開発機構(JAXA)/宇宙科学研究本部(ISAS)の火星探査機NOZOMIの地球スイングバイをサポートするため、日本の多くのVLBIアンテナとカナダ・アルゴンキンのアンテナの協力を得て飛翔体の位置決定を目的にVLBI観測を行った。VLBI(超長基線電波干渉計)による宇宙飛翔体のナビゲーションは、JPL/NASAにより群遅延観測量を用いて行われているが、我が国でも今後高精度の探査機誘導が求められており、宇宙科学研究にとって獲得すべき基盤技術のひとつである。

宇宙飛翔体をターゲットとしたVLBI観測は、数光年以上離れた自然の電波源を観測する通常のVLBIと異なり、電波源までの距離が有限であること、電波源が時々刻々と位置を変える事、電波源の帯域が狭帯域であることなど、多くの点で通常行われている測地・天文のVLBI観測とは異なり、宇宙飛翔体のVLBI観測は新しい技術開発が必要である。我々は飛翔体からの変調信号を利用した群遅延、及び、より高精度が期待される位相遅延量の観測量を利用して、飛翔体電波源の位置推定するための技術開発を行っている。ここでは、これまで行った観測の概要と、それぞれの技術開発項目について報告する。

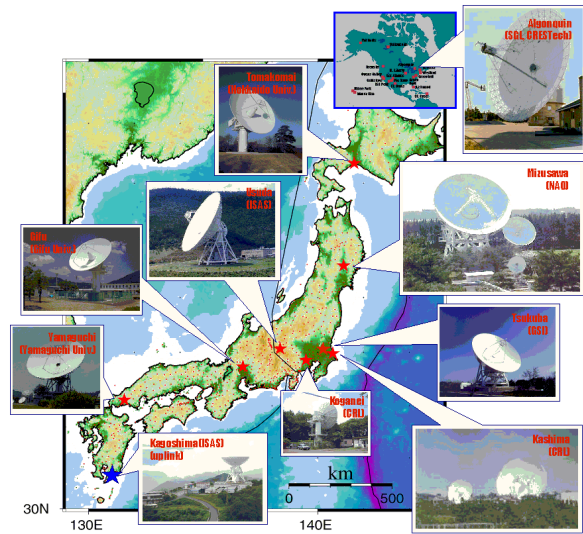


図 1: NOZOMI の VLBI 観測に参加した国内外の VLBI 観測局

2 NOZOMI の VLBI 観測

火星探査機 NOZOMI の VLBI 観測には国内 8 基のパラボラアンテナとカナダの Algonquin 46 m 口径のアンテナが参加し(図1)、2003年1月から7月までに計26回の観測を行った。データ収集にはCRLで開発したIP-VLBIシステム(図2)を用いて、データを直接PCに取り込み、ソフトウェアによる相関処理を行った。NOZOMIのレンジ信号は帯域幅1MHz程度を持った変調信号で、群遅延を計測することができる。群遅延の計測精度は、数10ナノ秒オーダであった。群遅延量の計測精度をリミットしている主な要因は、NOZOMIの変調信号(レンジ信号)の帯域幅、および信号対雑音比(SNR)である。

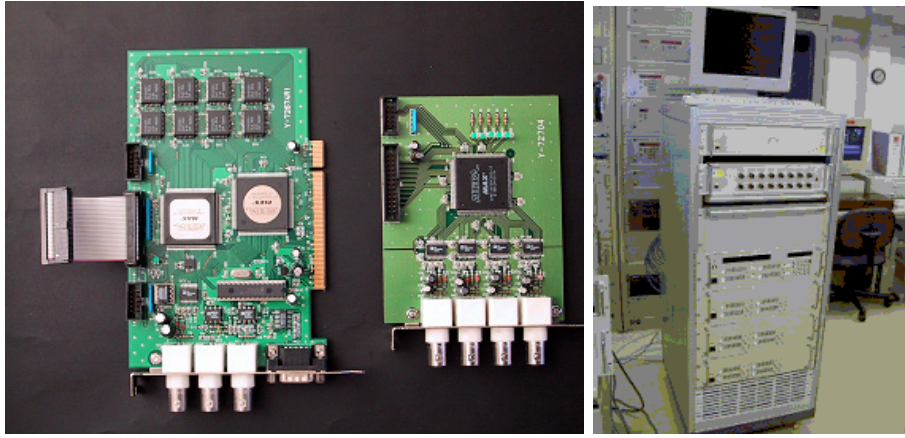


図 2: CRL が開発した IP サンプラボード (左) と IP-VLBI システム (右). 4 台の PC にそれぞれ 4ch のサンプラボードが位置枚ずつ装備されており、計 16ch の観測が可能である。

3 開発技術的項目

3.1 有限距離電波源に対する VLBI 遅延モデル

VLBI の観測方程式は、M.Eubanks (Eubanks,199) がまとめた「コンセンサモデル」(McCarthy 2003) が広く世界中で使用されている。このモデルの誤差は、地球上の観測局を使った VLBI 観測に対し、1 ピコ秒以下と言われている。しかし、これは数光年以上離れた電波源を対象として、電波信号を平面波近似して計算されているため、太陽系内の電波源に対して VLBI 観測を行う場合、波面が球面であることを考慮した新たな観測方程式が必要である。このような VLBI 遅延モデルは Sovers&Jacobs(1996), Fukushima(1994) らによって議論されているが、コンセンサモデルと同様な形式での、ジオイド上の観測遅延量としては表現されていなかった。また、JPL/NASA では光差方程式を解くアプローチで観測方程式を作っている (Moyar, 2000) が、我々は標準的 VLBI 予測値計算ソフトウェア CALC へのモデルの組み込みを意図して、VLBI-like なアプローチのために有限距離電波源に対する VLBI 遅延モデルを開発した。ジオイド上での観測遅延量は以下の式で表される (Sekido&Fukushima 2003)。

$$\tau_2 - \tau_1 = (1 + \beta_{02})^{-1} \left\{ \Delta t_g - \frac{\vec{K} \cdot \vec{b}}{c} \left[1 - (1 + \gamma)U - \frac{V_e^2 + 2\vec{V}_e \cdot \vec{w}_2}{2c^2} \right] - \frac{\vec{V}_e \cdot \vec{b}}{c^2} \left(1 + \beta_{02} - \frac{\vec{K} \cdot (\vec{V}_e + 2\vec{w}_2)}{2c} \right) \right\}, \quad (1)$$

この観測方程式の誤差は、地球の基線で観測した 10^9 m 以遠の電波源に対して、数ピコ秒以下である。

3.2 群遅延と位相遅延

クエーサなど連続波電波源を観測対象とする通常の VLBI では周波数帯域幅が 500MHz 程度もあるので群遅延が数ピコ秒の精度で測定できるが、宇宙飛翔体の信号は変調信号でも 1MHz 前後しかないため、ナノ秒以下の精度を得ることが難しい。実際に NOZOMI の場合、レンジ&レンジレートの観測データとあわせた解析において、VLBI データの誤差が数十ナノ秒であったため、国内基線のデータでは有効な寄与とならなかった。一方、JPL/NASA ではカリフォルニア、マドリード、チドピンピラといった深宇宙観測局間の数千 km の基線長を生かして数ナノ秒の遅延誤差でも高い空間分解能を得ている。日本国内の数百 km の基線を使って飛翔体位置を精度よく決めるためには、高い遅延計測精度を持つ位相遅延量を使うのが有効と考えられる。位相遅延量を観測量とする飛翔体のナビゲーションは JPL/NASA も行っていない非常にチャレンジングなテーマである。位相遅延計測の主な課題は、位相特有の 2π の不定性を解くことであり、ひとつの VLBI 観測全体にわたって不定性なく位相が接続できる条件があれば、観測量として使用可能である。

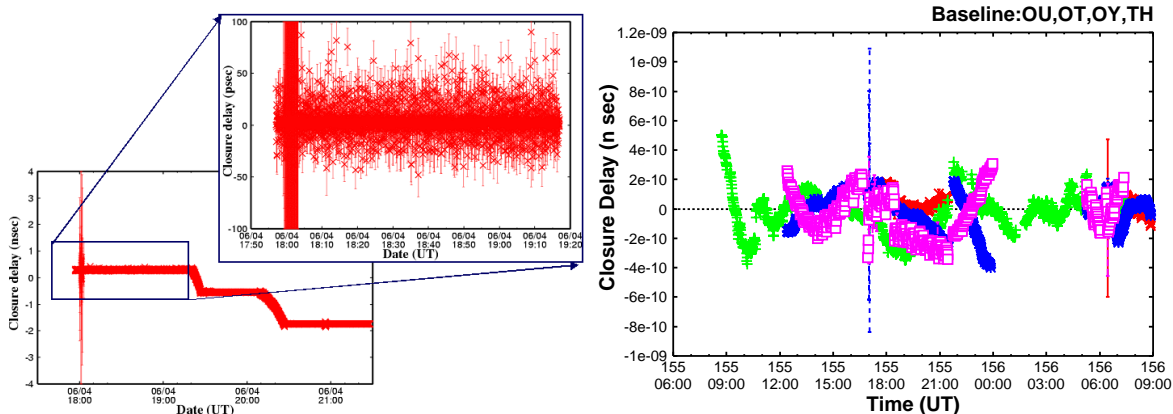
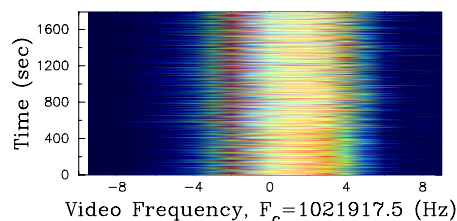


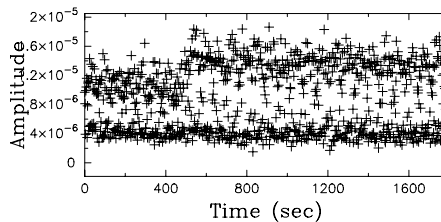
図 4: 左：位相遅延量の Closure テスト。2003 年 6/4 の NOZOMI の観測データ鹿島-つくば、鹿島-臼田、臼田-つくばの基線で位相遅延量を算出し、位相接続の後 Closure をとった。右：位相遅延量の解析後の残差。

図 3 はラインスペクトル専用の相関処理ソフトで相関処理した相関係数・位相データである。相関処理から得られた相関位相を観測遅延量として観測全体（数時間から 24 時間）にわたって不定性なくつなぎ合わせる位相接続の処理を行った後、鹿島-つくば、鹿島-臼田、臼田-つくばの基線の位相遅延量の Closure をとった結果を図 4 左に示す。最初の 1 時間半の間に 2 回の観測中断が入っているが、問題なく位相接続できている。図 4 (左上) から、位相遅延量が 20-30 ピコ秒の精度で遅延計測ができていることがわかる。全体 (図 4 左下) では 19:20、20:20 頃に位相のドリフトがあり、ステップ状に 3 つにデータがスプリットしているが、これはデータ処理ソフトのバグであることがわかっており、現在対処中である。図 4 右に鹿島-臼田、鹿島-つくば、つくば-苫小牧、鹿島-岐阜の基線のデータを使った、位相遅延量の post-fit residual を示す。約 200ps の残差に収まっている。群遅延量の場合と比較すると 2-3 桁の精度向上に相当する。ここでは詳しく示さないが、推定された飛翔体の位置も基線の数を増やすごとにある一点に収束し、これらすべての基線のデータが整合性を持っていることを示していた。ただし、推定された位置を、ISAS の R&RR による軌道決定値と比較すると、赤緯はよく一致しているが赤経は 10 秒角オーダのオフセットがあり、この差が真のものが、あるいは解析ソフトのバグであるのか検証を進めている。

Dynamic Cross Sprctrum: Rate Corrected ch=1



Dynamic Cross Sprctrum: Rate Corrected ch=1



Dynamic Cross Sprctrum: Rate Corrected ch=1

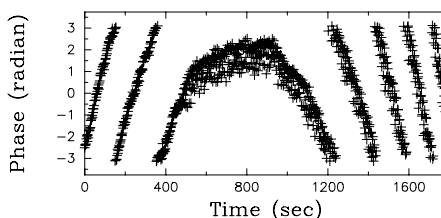


図 3: 狭帯域ライン相関処理ソフトのフリンジ (臼田-つくば基線) 上：相関パワースペクトルの時系列コンター図、中：相関が最大の周波数における相関係数の時系列データ 下：相関が最大の周波数における相関位相の時系列データ

3.3 HAYABUSA の観測

2003 年春に小惑星探査機 HAYABUSA が打ち上げられた。VLBI による飛翔体 Navigation の次のターゲットとして、最初の観測を鹿島 34m、臼田 64m、岐阜 11m、つくば 32m、山口 32m が参加して、11 月 26 日に行い、HAYABUSA からのレンジ信号、テレメトリ信号、それぞれでフリンジが検出されている (図 5)。

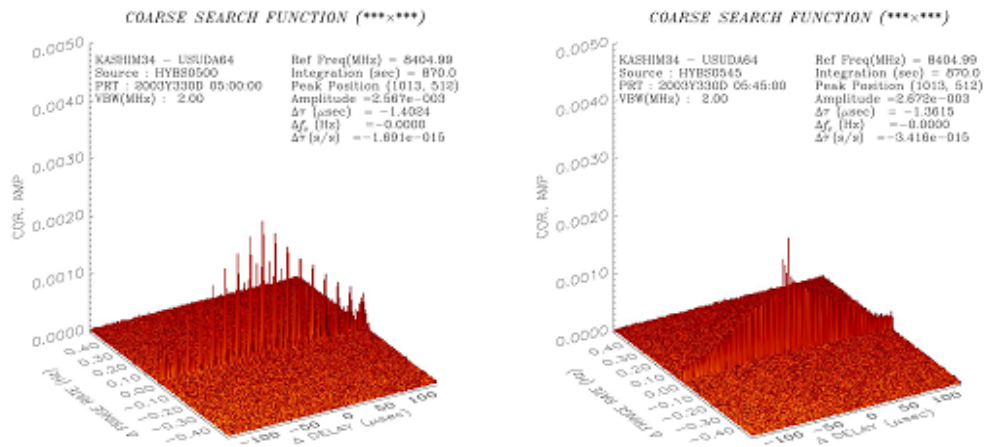


図 5: HAYABUSA のレンジ (左) と、テレメトリ (右) 信号のフリンジ (鹿島 34 - 臼田 64)

4 まとめと課題

VLBI の宇宙飛翔体位置計測技術確立のため、これまでに、観測方程式の理論式の導出や、各種ソフトウェア群の開発を行い、(1) 群遅延を観測量として飛翔体位置を推定すること、(2) フリンジ位相を接続し、位相遅延量を 20-30ps の精度で計測できることの確認、などを行った。VLBI の飛翔体位置計測への実用化へはもう一歩である。引き続き群遅延、及び位相遅延の両観測量の利用を平行して、開発を進めていきたい。

参考文献

- [1] Eubanks, T. M. (1991) A Consensus Model for Relativistic Effects in Geodetic VLBI. Proc. of the USNO workshop on Relativistic Models for Use in Space Geodesy: 60-82
- [2] Fukushima, T. (1994) Lunar VLBI observation model. A&A 291: 320-323
- [3] Hellings, R. W. (1986) RELATIVISTIC EFFECTS IN ASTRONOMICAL TIMING MEASUREMENTS. AJ, 91: 650-659
- [4] McCarthy, D. D. and Petit, G. (2003), IERS Conventions 2003, IERS Technical Note No. 32.
- [5] Moyer, T. D. (2000) Formulation for Observed and Computed Values of Deep Space Network Data Types for Navigation, JPL Monograph 2 (JPL Publication 00-7).
- [6] Sovers, O. J. & Jacobs C. S. (1996) Observation Model and Parameter Partial for the JPL VLBI Parameter Estimation Software "MODEST"-1996". JPL Publication 83-39, Rev. 6: 6-8
- [7] Sekido, M., & Fukushima, T., Relativistic VLBI Delay model for Finite Distance Radio Source, Proc. of IUGG 2003, in press.