

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)



Radio Astronomy Applications Group
 Kashima Space Research Center



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 VLB 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、数光年以上離れた天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 VLB 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、行ってきた技術開発項目について報告する。

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 46m 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。鹿島-白田基線で得られたフリンジを図 3 に示す。

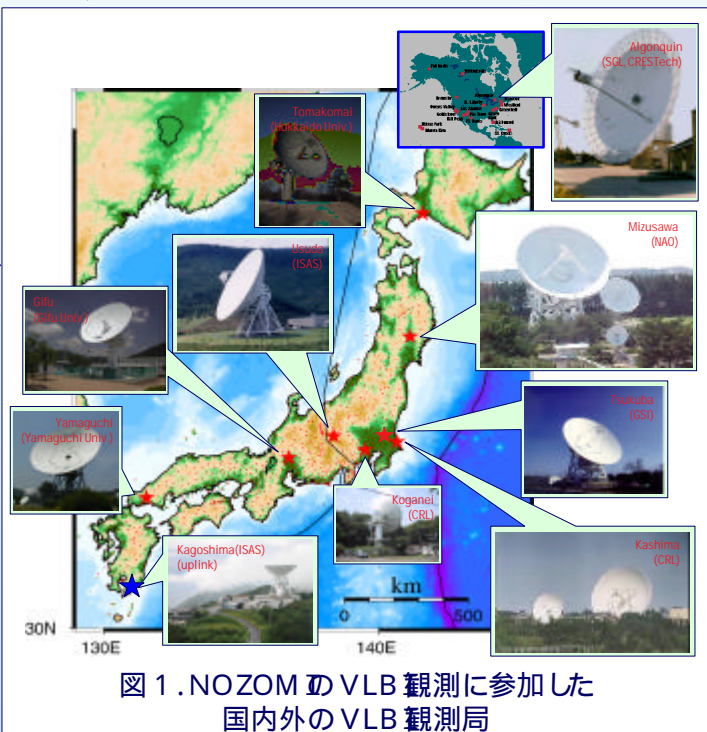


図 1 . NOZOMI の VLB 観測に参加した国内外の VLB 観測局

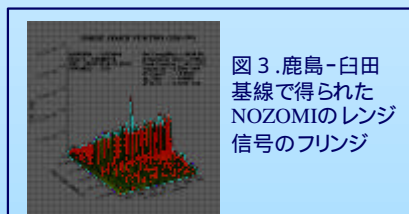


図 3 . 鹿島-白田基線で得られた NOZOMI のレンジ信号のフリンジ

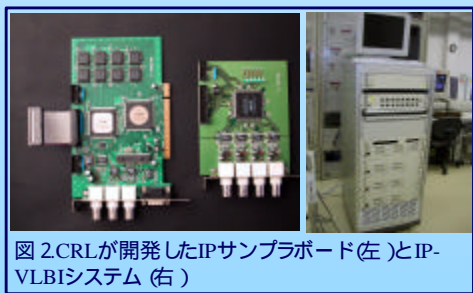


図 2 CRL が開発した IP サンプルボード (左) と IP-VLBI システム (右)

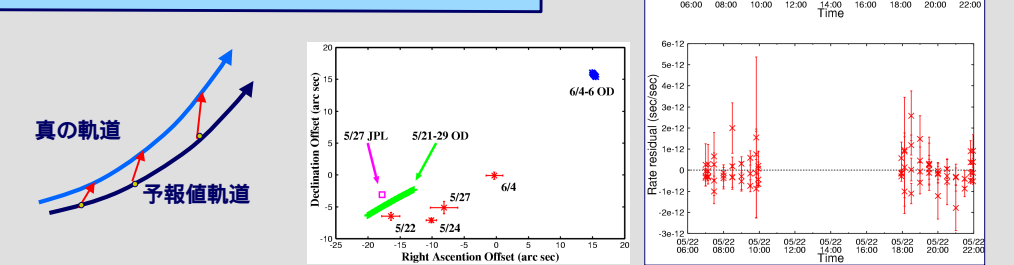


図 4 . NOZOMI の VLBI 観測から得られた群遅延・遅延変化率の最小二乗推定残差の例 (5月22日) (右) と 2003 年 5 月 22 日から 6 月 4 日間の VLBI 観測データから推定された飛翔体位置 (中: 原点が軌道予報値)。飛翔体の位置は予報軌道からの真の位置のずれを推定した (左図)。

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。鹿島 34m、白田 64m、山口 32m、岐阜 11m などの基線で観測された群遅延データを最小二乗法解析して得られた残渣の例及び、群遅延データから推定された NOZOMI の天球面上の位置を図 4 に示す。群遅延の残差は、クエーサの遅延量を中心に、100ns オーダでばらばらしている。これは NOZOMI の変調信号 (レンジ信号) の帯域幅が 1MHz オーダである結果と考えられる。

3.技術的開発項目

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「コンセンサスモデル」(McCarthy 2003) が広く世界中で使用されている。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。太陽系内の電波源の場合、波面が球面であることを考慮した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、コンセンサスモデルと同様な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)。

$$t_1 - t_2 = \frac{\Delta t_g - \frac{\vec{K}' \cdot \vec{b}}{c} \left[1 - (1+g)U - \frac{V_{\oplus}^2 + 2\vec{V}_{\oplus} \cdot \vec{w}_2}{2c^2} \right] - \frac{\vec{V}_{\oplus} \cdot \vec{b}}{c^2} \left(1 + \frac{\hat{R}_{02} \cdot \vec{V}_2}{c} - \frac{\vec{K} \cdot (\vec{V}_e + 2\vec{w}_2)}{2c} \right)}{1 + \frac{\hat{R}_{02} \cdot \vec{V}_2}{c}}$$

3.2解析ソフトウェア群

CRL で行っている位置天文解析のデータ処理・解析のスキームを図 5 に示す。飛翔体の軌道決定については、得られた遅延データを提供して、レンジ & レンジレート のデータと合わせて ISAS/JAXA で軌道決定を行う。

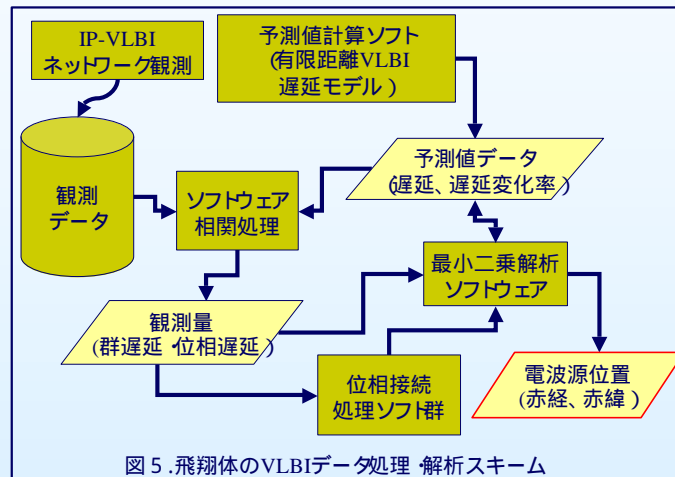


図 5 . 飛翔体の VLBI データ処理・解析スキーム

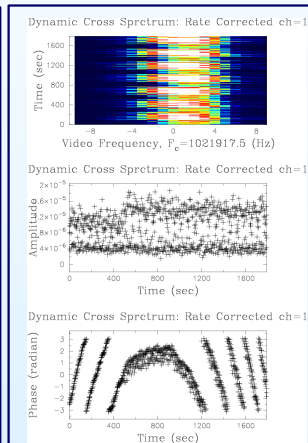


図 6 . 狭帯域ライン相関処理ソフトのフリンジ (白田-つくば基線) 上相関パワースペクトルの時系列コンター図 (中: 相関が最大の周波数における相関係数の時系列データ、下: 相関が最大の周波数における相関位相の時系列データ)

3.3 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、数ナノ秒以上の精度を得ることができない。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て解析において、VLBI データの誤差が大きいため、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、マドリド、チドペンビ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 2 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 6 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作業が位相接続の作業である。位相接続を行った後、鹿島-つくば、鹿島-白田、白田-つくばの基線の位相遅延量の Closure をとった結果を

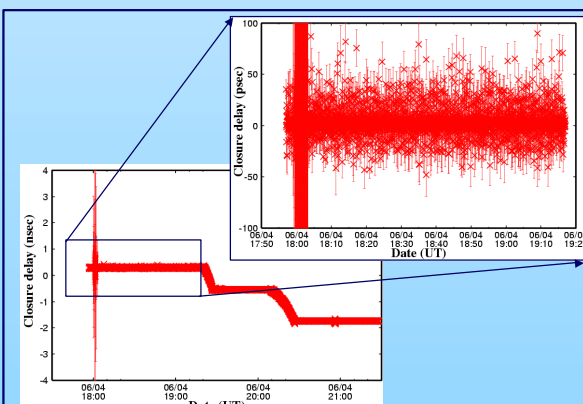
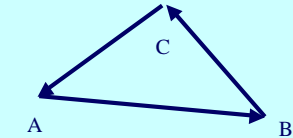


図 7 位相遅延量の Closure テスト。2003 年 6/4 の NOZOMI の観測データ (鹿島-つくば、鹿島-白田、白田-つくば) の基線で位相遅延量を算出し、位相接続の後 Closure をとった。3 基線では位相接続後も全体のオフセットとなる不定性を除くことはできないので、データの前半の Closure を 0 としている。

図 7 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 7 (右上) から、位相遅延量が 2-30 ピコ秒の精度で観測できていることがわかる。全体 (図 7 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。この原因については、データ処理ソフトのバグであると考えられており、今後解決していく。

Closure とは？
 観測局 A, B, C を順番に遅延量でつないで、元の局に戻る遅延量の合計が原理的に 0 になること。観測精度の評価に役立つ他、観測量の拘束条件として使うことができる。



4.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、白田 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 8)。軌道決定値との比較や位相遅延量の抽出など、処理を進めている。

5.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

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
 Fukushima T. (1994) Lunar VLBI observation model. A&A 291: 320-323
 McCarthy D.D. and Petit G. (2003). IERS Conventions 2003, IERS Technical Note No. 32.
 Moyar, T.D. (2000) Formulation for Observed and Computed Values of Deep Space Network Data Types for Navigation. JPL Monograph 2 (JPL Publication 00-7).
 Sovers, O. J. & Jacobs C. S. (1996) Observation Model and Parameter Partials for the JPL VLBI Parameter Estimation Software "MODEST"-1996". JPL Publication 83-39, Rev. 6: 6-8
 Sekido M. & Fukushima T. (2003) Relativistic VLBI Delay Model for Finite Distance Radio Source, Proc. of IUGG 2003 (Sapporo), in printing.

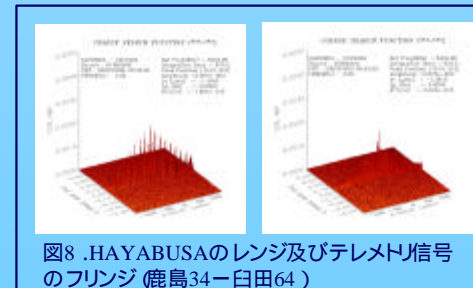


図 8 . HAYABUSA のレンジ及びテレメトリ信号のフリンジ (鹿島 34-白田 64)