

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、SGLCanada)

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、日本の今後の宇宙探査機ミッションでも高精度の探査機誘導が求められており、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 と比べて、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、これまで行ってきた観測と、データ解析の現状について報告する。

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)、2002 年後半から 7 月までに 28 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 Osaki 2002, Kondo 2002) 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あるため、群遅延量を計測することができる。観測の最初と中間、最後に位置の良く分かっているクエーサを観測し、VLBI のクロックパラメータのキャリブレーションに使用した。

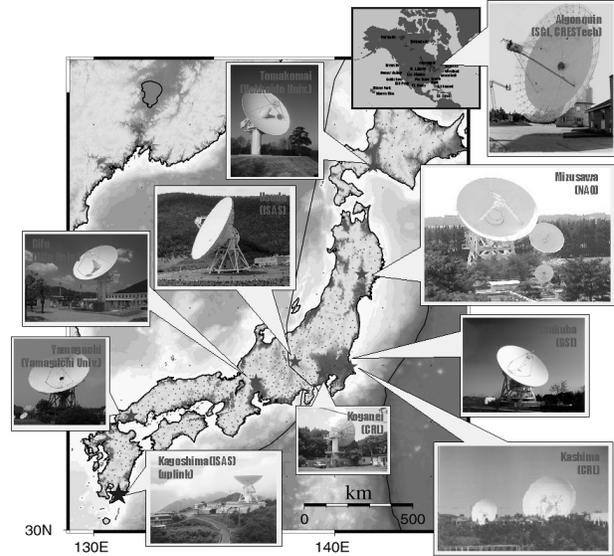


図 1: NOZOMI の VLBI 観測に参加した国内外の VLBI 観測局

3 データ解析と観測量及び観測モデル

3.1 データ解析のスキーム

通信総合研究所で行っている位置天文のデータ処理・解析のスキームを図 3 に示す。2 局で観測されたデータを相関処理することによって遅延量・遅延変化率が計測される。計測された観測量 (O) から、あらかじめ予想される電波源位置に対する遅延量 (C) を計算しておき、観測量 - 予測値 (O-C) をデータとして最小二乗法で電波源位置 (赤経・赤緯) を推定する。現在のところ、天球面上の位置を推定する位置天文的な推定であり、飛翔体の軌道決定には、得られた遅延データを ISAS/JAXA に提供して、レンジ&レンジレートとのデータと合わせて ISAS/JAXA で軌道決定している。

3.2 有限距離電波源に対する VLBI 遅延モデル

解析を正しく行うためには、予測遅延量 (C) の計算が正確である必要がある。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

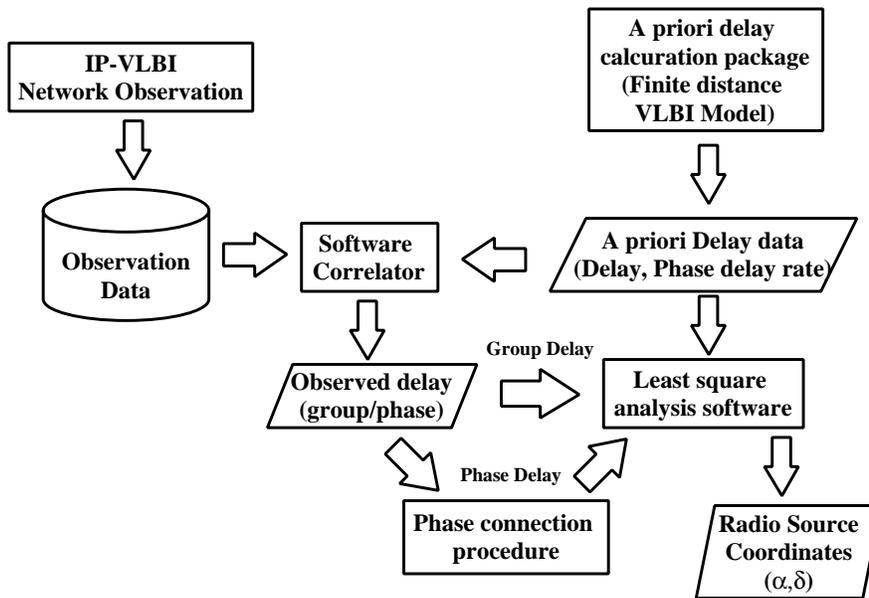


図 3: 飛行体の VLBI データ処理・解析スキーム

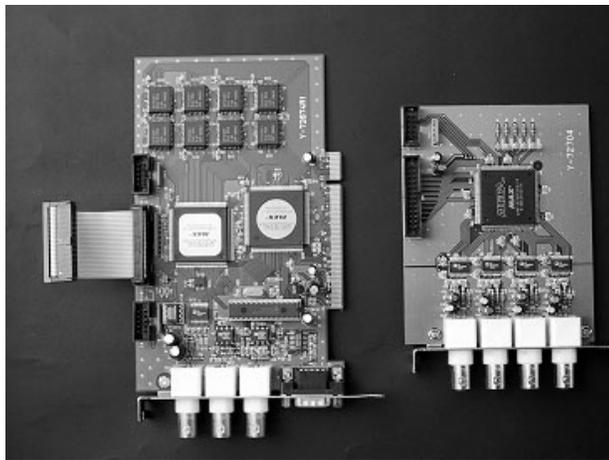


図 2: CRL が開発した IP-VLBI ボード

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)。

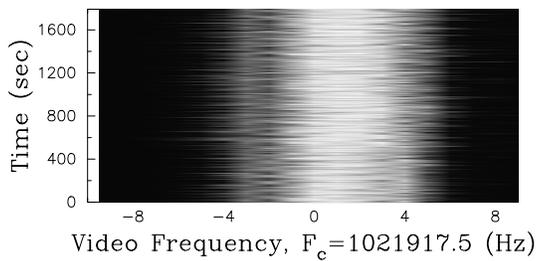
$$\tau_2 - \tau_1 = (1 + \beta_{02})^{-1} \left\{ \Delta t_g - \frac{\vec{K} \cdot \vec{b}}{c} \left[1 - (1 + \gamma)U - \frac{V_e^2 + 2\vec{V}_e \cdot \vec{w}_2}{2c^2} \right] - \frac{\vec{V}_e \cdot \vec{b}}{c^2} \left(1 + \beta_{02} - \frac{\vec{K} \cdot (\vec{V}_e + 2\vec{w}_2)}{2c} \right) \right\},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

この観測方程式は、観測点から電波源までの距離が 10^9m 以上離れていれば、数 mm 以下の精度で正しい遅延量を与える。

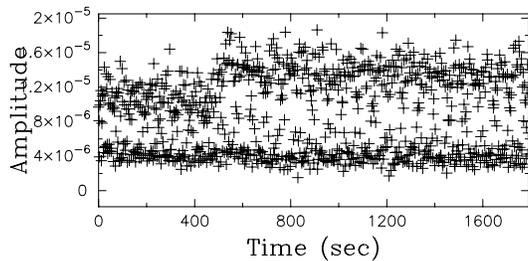
3.3 群遅延と位相遅延

遅延量には群遅延量と位相遅延量の 2 種類があり、群遅延量の計測精度は観測帯域は幅に反比例するので、SN 比が同じであれば、帯域幅が広いほうが有利である。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、宇宙飛行体の信号は変調信号でも 1MHz 前後であるため、遅延計測精度は数ナノ秒オーダーである。このような限られた計測精度であっても JPL/NASA ではカリフォルニア、マドリッド、チドピ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 の基線を使って飛行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行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 の整数倍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



Dynamic Cross Spectrum: Rate Corrected ch=1



Dynamic Cross Spectrum: Rate Corrected ch=1

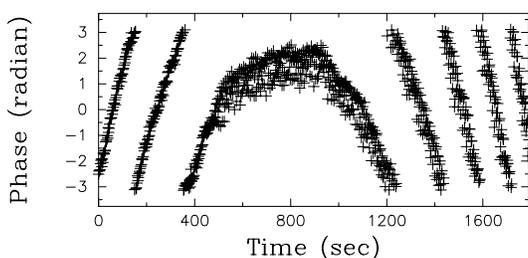


図 4: 狭帯域ライン相関処理ソフトのフリンジ（臼田-つくば基線）上：相関パワースペクトルの時系列カウンター図、中：相関が最大の周波数における相関係数の時系列データ 下：相関が最大の周波数における相関位相の時系列データ

きる条件があれば、観測量として使用可能である。図 4 は新たに開発した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と相関位相データの例を示している。図 3 にあるように、位相遅延の解析では、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～24 時間）にわたって不定性なくつなぎ合わせる作業が必要であり、これ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-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 5 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 5（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 5 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見られており、今後解決していく。

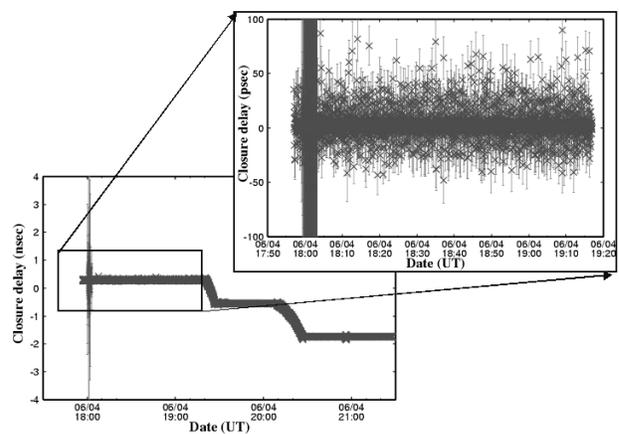


図 5: 位相遅延量の Closure テスト。2003 年 6/4 の NOZOMI の観測データ鹿島-つくば、鹿島-臼田、臼田-つくばの基線で位相遅延量を算出し、位相接続の後 Closure をとった。3 基線では位相接続後も全体のオフセットとなる不定性を除くことはできないので、ここでは便宜的にデータの前半の Closure を 0 として表示している。

3.4 群遅延量の解析結果

群遅延データを最小二乗解析した残差の例（5 月 22 日の鹿島 34m, 臼田 64m, つくば 32m, 岐阜 11m）を 6 に示す。

クエーサの遅延データは、位置がよくわかっており、残差が 0 付近に固まっているが、NOZOMI の観測データは数ナノ秒のオーダーでばらついており、これは約 1MHz の信号の帯域幅と対応していると考えられる。現在のところ、予測値の計算（プログラム）の飛翔体に対する遅延量計算を行う部分に問題があるとみられており、この問題の解決のため調査を行っている。

4 HAYABUSA の観測

2003 年春に日本の小惑星探査機 HAYABUSA が打ち上げられた。VLBI による飛翔体 Navigattion の次のターゲットとして、11 月 26 日に最初の観測を鹿島 34, 臼田 64m, 岐阜 11m, つくば 32m, 山口 32m が参加して行い、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 7）。

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、観測方程式の理論的導出や、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、などを行ってきた。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

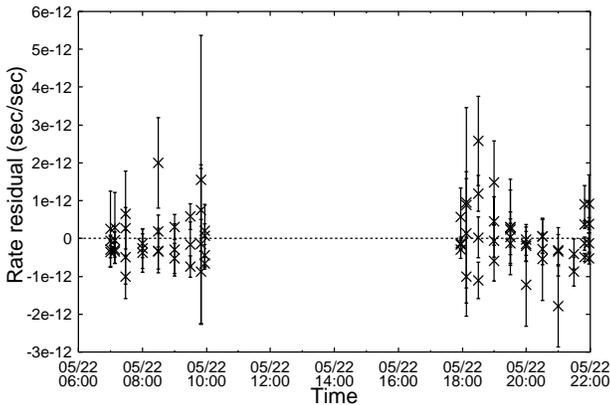
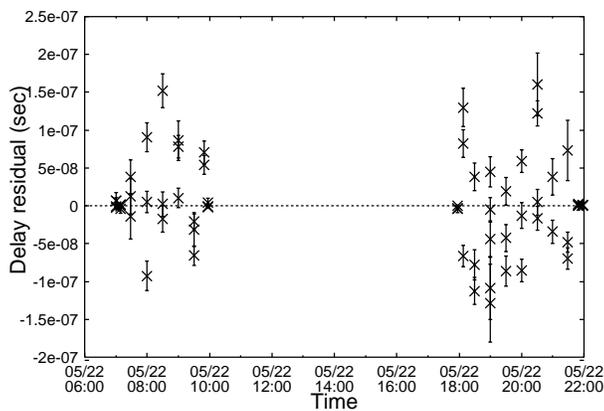


図 6: NOZOMI の VLBI 観測から得られた群遅延・遅延変化率の最小二乗推定残差の例 (5 月 22 日)(右).0 付近に固まっているのはクエーサの観測データ。ばらつきのある大きな分布が NOZOMI のレンジ信号の群遅延データ。

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] Kondo T. et al., (2002) VLBI observations using IP-VLBI system for orbit determination of deep space spacecraft -Group delay measurements of GEOTAIL and NOZOMI telemetry signals -, CRL-TDC News No. 21 pp.18-22.
- [5] McCarthy, D. D. and Petit, G. (2003), IERS Conventions 2003, IERS Technical Note No. 32.

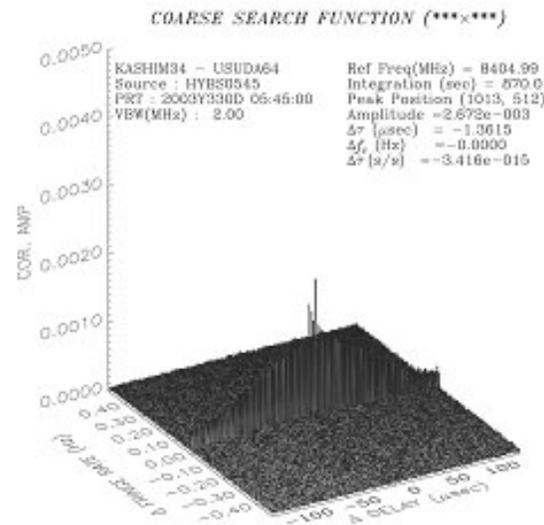
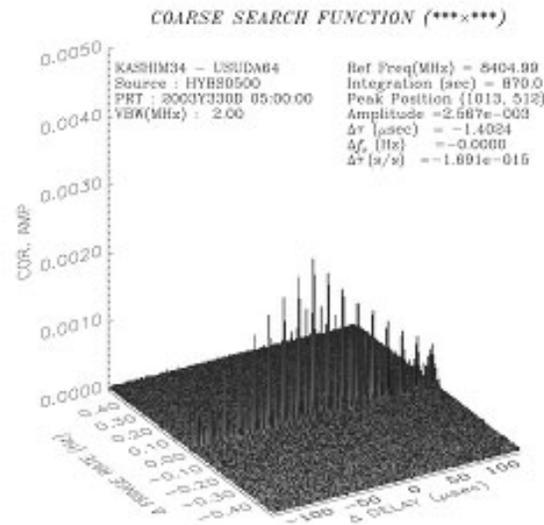


図 7: HAYABUSA のレンジ(上)と、テレメトリ(下)信号のフリッジ(鹿島 34 - 臼田 64)

- [6] 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).
- [7] Osaki H. Kondo T., and Kimura M., (2002) Development of Versatile Scientific Sampling Processor (VSSP) -A Practical Approach, CRL-TDC News No. 20, pp.7-9.
- [8] 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