

CRL における VLBI 観測による NOZOMI の位置天文解析：進捗報告

関戸 衛、近藤哲朗、市川隆一、大崎裕生、小山泰弘 (通信総合研究所)

1 はじめに

CRL では飛翔体の位置を VLBI データを使って推定するためのシステム開発を行っており、宇宙科学研究所の火星探査機 NOZOMI を具体的ターゲットとして、探査機からの信号および、電波星を実際に VLBI 観測し、探査機の天球面上の位置を推定するべく、ソフトウェア群の開発をおこなっている。本稿では、観測されたデータを紹介しながら、飛翔体の位置を推定するための位置天文解析ソフトウェアの開発進捗状況について報告する。

2 解析ソフトウェア

2.1 遅延予測値計算ソフト

太陽系内を航行する惑星探査機を電波源とする VLBI 観測では、電波源を無限遠点にあると仮定する通常の VLBI 遅延モデルを使うことができない (e.g. Sovers & Jacobs;1996)。そこで関戸・福島 (2003) の提案した有限距離電波源に対する相対論的 VLBI 観測方程式を、NASA/GSFC が開発した VLBI の遅延予測値計算ソフトウェア CALC9 を改修して組み込み、VLBI でよく使用される観測スケジュール形式のファイル (skd ファイル) を入力として、VLBI 観測遅延量の高精度な予測値ソフトウェアを開発した (仮称: calc_skd)。calc_skd は外部入力として惑星暦 DE403/405、および地球回転パラメータを読み込み、潮汐や極運動による観測局位置のずれを計算して、与えられた時刻における正確な観測局の位置を計算するなど、CALC9 の機能をそのまま引継いでいる。自然電波源だけでなく、飛翔体電波源の太陽系重心座標系上の位置を外部入力として、電波源の VLBI 予測遅延量、遅延変化率、や電波源位置、乾燥大気、大気勾配などに関する遅延/遅延変化率の偏微分係数も出力する。表 1 に calc_skd の主な入出力を示す。

2.2 最小自乗推定ソフトウェア

上記 calc_skd により算出された予測値、偏微分係数、および観測された遅延量/遅延変化率を入力として、電波源の位置を推定するため、簡易型最小自乗推定ソフトウェア (仮称: lsq_src) を作成した。表 2 に lsq_src の主な仕様を示す。

表 1: 予測値計算ソフトウェア calc_skd の主な入出力

入力	惑星暦 (DE403/DE406), 地球回転パラメータ (EOP), 天体位置 (ICRF), 観測局位置 (ITRF), 電波源位置 (XYZ), 気象データ、観測スケジュール (skd file)
出力	予測値 遅延 遅延変化率 偏微分係数 天体位置 (α, δ, r^1) , 天体位置変化率 $(\dot{\alpha}, \dot{\delta}, \dot{r}^1)$, 天頂乾燥大気, 乾燥大気勾配, 天頂湿潤大気, 天頂電離層

表 2: 最小自乗推定ソフト lsq_src の主な仕様

観測量	遅延, 遅延変化率
基線数、観測数	無制限
推定パラメータ	電波源位置 (α, δ, r) とその変化率 $(\dot{\alpha}, \dot{\delta}, \dot{r})$, 天頂乾燥大気 $(\tau_{dry}, \dot{\tau}_{dry})^1$, 天頂湿潤大気 $(\tau_{wet}, \dot{\tau}_{wet})^1$, 天頂電離層 $(\tau_{ion}, \dot{\tau}_{ion})^1$, 大気勾配 ¹ 、クロック $(\tau_{clk}, \dot{\tau}_{clk})^1$
束縛条件	電波源位置を除く上記推定パラメータ全てに設定

1: 複数エポックを設定可能

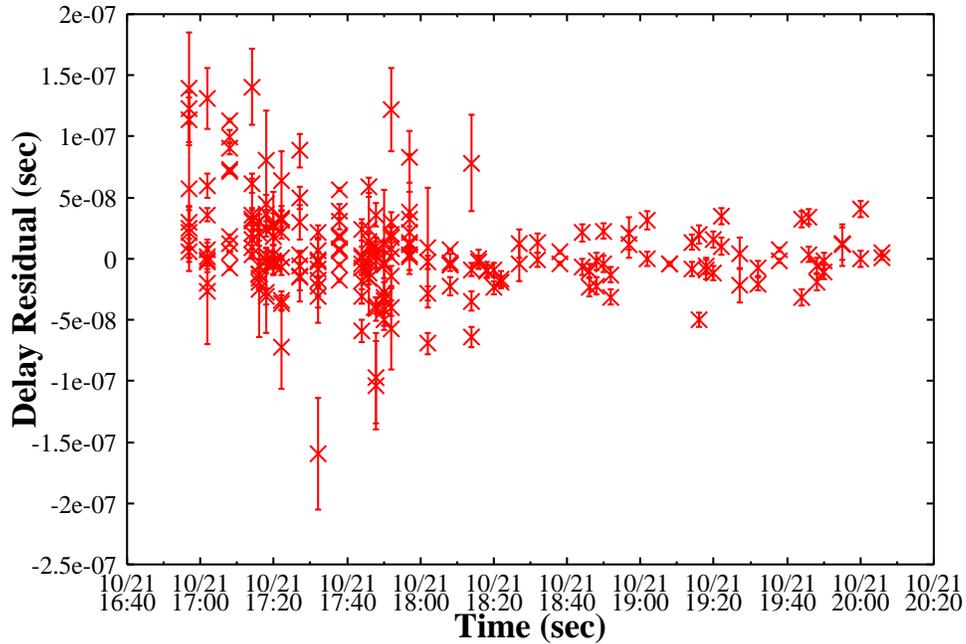


図 1: 群遅延解析の post-fit 残差例：2002/10/21, 鹿島 34m, 臼田 64m、岐阜 11m、山口 32m、鹿島 11m の観測データを使用した。

3 群遅延

信号が十分に強いときには、NOZOMI のレンジ信号を受信して群遅延の測定が可能である。2003 年 1 月までは信号強度が強く、鹿島 34m - 臼田 64m アンテナ間で群遅延を計測することができた。図 1 に群遅延解析結果の残差の例を示す。解析残差は rms で 50ns 程度であった。群遅延の決定精度は有効大域幅の逆数に比例し、2MHz バンド幅 1ch で観測している NOZOMI の場合、有効大域幅は最大でも 580KHz 程度である。そのため、10ns から数十 ns の遅延残差は、通常の測地 VLBI が数十 ps の残差であることと比較するとかなり大きい。この場合の観測システムとしては妥当な値である。最小自乗法推定によって推定された NOZOMI 位置は、まだ ISAS の R&RR による軌道決定値と差が大きい。現在原因を調査中である。

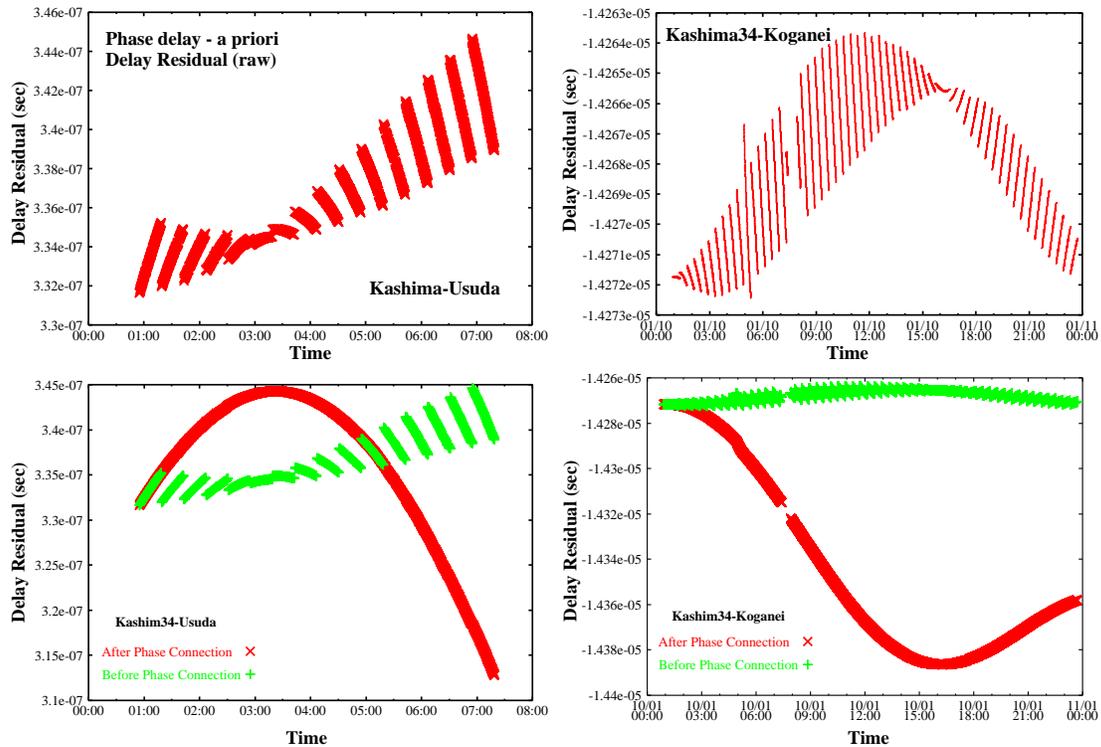


図 2: 位相遅延の計測例：2003/1/10. 図はどれも、計測された遅延量から VLBI 遅延予測モデルを差し引いた結果をプロットしている。上の図は、位相接続前の相関処理から出力された位相遅延量であり、変化率を使って位相接続した結果である。左は鹿島-臼田基線 (約 8 時間)、右は鹿島-小金井基線 (約 24 時間) のデータ。

4 位相遅延

今回の NOZOMI の場合、2003 年 1 月-5 月の期間は、ハイゲインアンテナが地球を指向しない期間があり、信号強度が非常に小さくなっている。この場合変調信号によって周波数拡散した信号の群遅延を計測することが困難になり、送信信号をトーン信号にして、ある周波数にエネルギーを集中して SN 比を改善し、位相遅延を計測することが唯一の選択肢となる時期がある。また位相遅延のが正確に計測できれば、 $2\pi n$ の不定性の問題はあるものの、その遅延測定誤差は群遅延に比べてはるかに小さくなる。1 月 10 日はまだ群遅延の計測も可能であったが、データ処理で位相遅延の計測を試みた。図 2 に相関出力から出力された位相遅延量の、位相接続前 (上の図) と、変化率を使って接続した結果 (下の図) を示している。まもなく位相遅延についても、群遅延と同様、クロックオフセットなどと共に、NOZOMI の天球座標を推定した結果を出力できる見込みである。

参考文献

O. J. Sovers, & C. S. Jacobs, 1996, "Observation Model and Parameter Partials for the JPL VLBI Parameter Estimation Software "MODEST"-1996", JPL Publication 83-39, Rev. 6, p.8

関戸衛、福島登志夫, 2003, "有限距離電波源に対する VLBI 遅延モデル", This issue.