

VLBIによる飛翔体位置決定技術

一位相遅延計測・解析の現状

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)
「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

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・アルゴンキン局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。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な分野である。現在、飛翔体からの変調信号を利用した群遅延の観測、及び、より高い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のための技術開発を行っている。

現在の問題の一つは、安定的なフリンジ検出、位相遅延量の位相接続、に必要な高精度の予測遅延量・遅延変化率の算出である。カナダのアルゴンキン局と日本の間を結ぶ基線では、NOZOMIのフリンジが安定的には検出できていない。この原因は予測遅延量の誤差によるものと考えられる。また、日本の国内基線を使ったVLBI観測では、基線が短いため、高い角度分解能を得るには位相遅延の利用が不可欠と考えられる。位相スイッチングデータでの位相接続のためにも、高精度の予測値計算は重要である。ここでは、現在の課題について報告する。

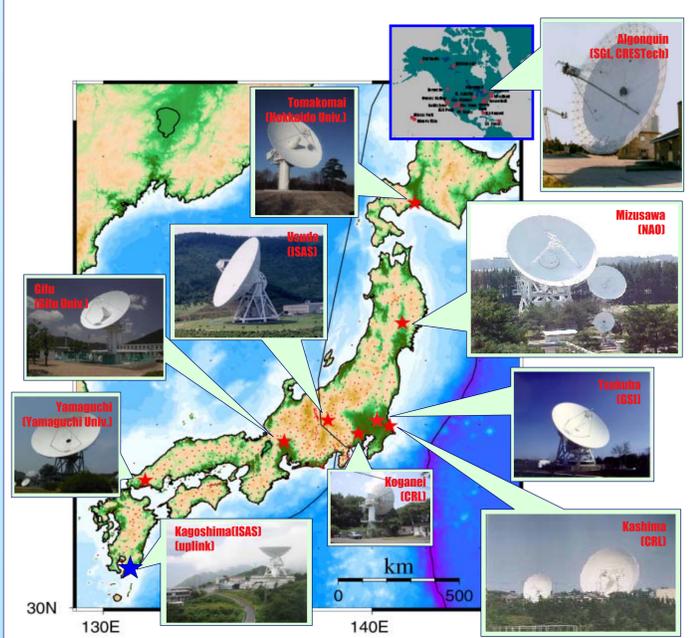
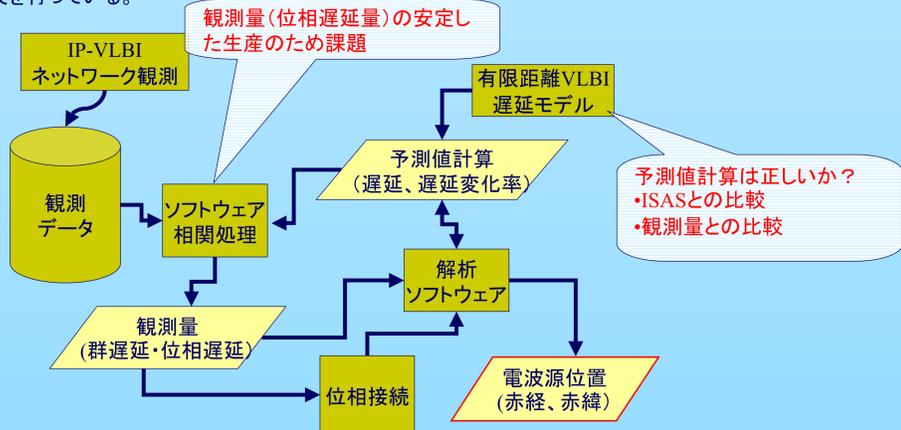


図1. NOZOMIのVLBI観測に参加した国内外のVLBI観測局

2. 処理の流れ

以下に処理の流れを示す。後に示すように、現在問題となっている関連処理ソフトウェア、及び予測値計算部分の改良を行っている。



3. 位相遅延量の処理・位相接続

位相遅延量を利用するには、 $2\pi n$ の不定性を除く必要がある。右の図は位相接続前後の鹿島34m-臼田64m、と鹿島34m-苫小牧11mの基線の位相遅延量データ(6月4日)である。観測と観測の間の位相接続では、位相の遅延変化率を利用した外挿により接続を行っているが、鹿島34m-苫小牧11mの場合には、正常に接続できていないのがわかる。これは、SNRが十分に得られていないことに起因する。この時相関処理では256点FFT(7.8kHz分解能)の相関処理を行っていたが、200万点FFT(1Hz分解能)でデータからキャリア周波数を抽出すると下の図のように、苫小牧局でも信号が確認できる。つまり、周波数分解能を上げて相関処理のSNRを向上させることができるはずである。高い周波数分解能でキャリア周波数成分の位相遅延量を算出する、ライン信号の相関処理ソフトウェアの開発を、現在進めている。

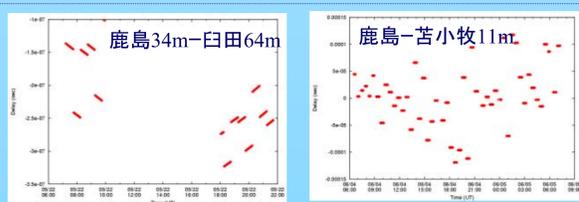


図2a. 位相接続前の位相遅延量生データ

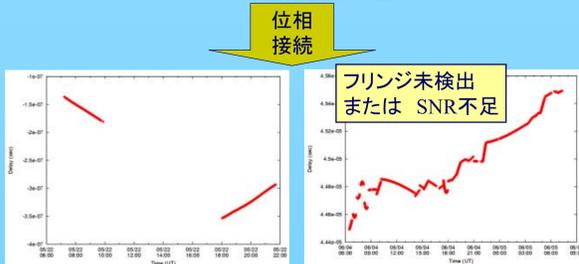


図2b. 位相接続後

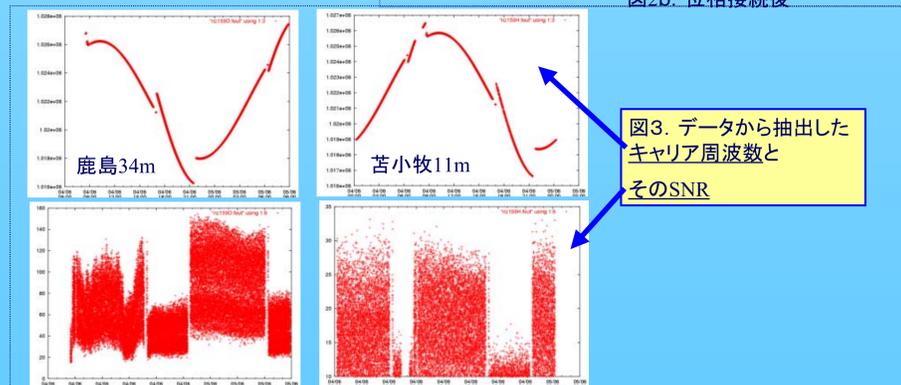


図3. データから抽出したキャリア周波数とそのSNR

4. 予測遅延量の計算値はどれだけ正しいか?

観測されたトーン信号の周波数(ドップラー)からX局に対するY局の遅延変化率を次式で計算できる。この式を使って観測データから遅延変化率を算出し、予測値計算の遅延変化率(理論値)と比較してみると下の図ようになる(2003年6月4日のデータ)。

$$\dot{\tau} = -\frac{f_y - f_x}{f_x}$$

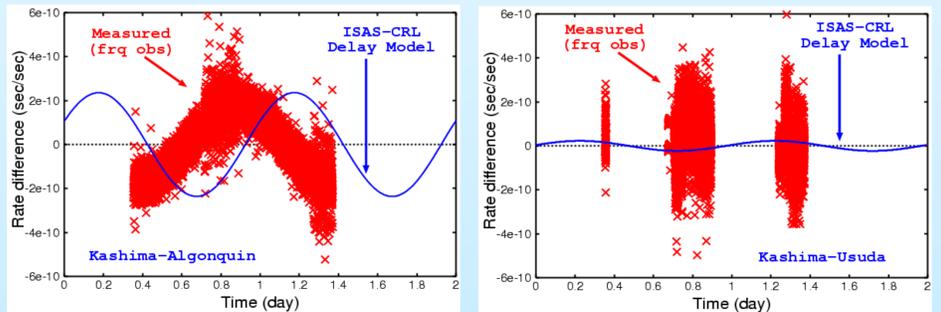


図4. O-CNOZOMIの信号のドップラー差から計算した遅延変化率-遅延モデル(X)とISAS-CRLの予測値モデル(実線青)の比較。左: 鹿島-Algonquin(9000km基線)、右: 鹿島-臼田(約200km基線)

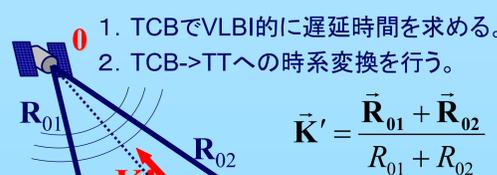
はじめに述べたように、NOZOMIの観測ではカナダのAlgonquin局も参加して何度か観測を行った。しかし、Algonquinと日本の観測局を結ぶ基線では(もちろんフリンジは検出されたが)、NOZOMIの信号に関しては安定的にはフリンジが検出できなかった。図4から、鹿島-Algonquin基線において安定的にフリンジが検出できない主な原因は、予測値モデルの誤差が大きいことが原因であると考えられる。このように予測値が真の値と異なる要因には、①飛翔体の予測位置が真の位置と異なること、②VLBI遅延量の予測値モデル(理論式)の誤差、③予測値モデルのソフトウェア組み込み上のバグ、などが考えられる。①が原因なら、予測値と真の位置の差は10秒角オーダーでずれていることになる。この日の確定値(レンジ&レンジレートで決定された軌道)が発表されていないので比較できないが、2003年1月の時点で予測値と確定値の差は数秒角であった。6月4日は軌道決定が困難な時期でスイングバイ直前であったため予測値の誤差が大きかったということも考えられる。②理論的に導出された遅延を与える式は次節で紹介するが、100万キロメートル以上で5pssec程度の精度を持つと考えられるので、上記の原因とは考えにくい。③ソフトウェアのバグ・コーディングミスの可能性はないとは言えない。

5. 遅延時間理論値の比較: ISAS-CRL

遅延予測値誤差の原因を探るため、ISAS(宇宙航空研究開発機構/宇宙科学研究本部)で計算したVLBI観測の予測遅延量とCRLのそれを比較した。CRLとISASのアプローチはやや異なるが、求めているものは同じ、地上の原子時計(Terrestrial Time)で測った信号の到着時間差である。

CRL: 有限距離VLBIモデル

(Sekido & Fukushima 2003)



$$\vec{K}' = \frac{\vec{R}_{01} + \vec{R}_{02}}{R_{01} + R_{02}}$$
$$\Delta t_g = \frac{\vec{K}' \cdot \vec{b}}{c} \left[1 - (1+\gamma)U - \frac{V_e^2 + 2\vec{V}_e \cdot \vec{w}_2}{2c^2} \right] - \frac{\vec{V}_e \cdot \vec{b}}{c^2} \left(1 + \frac{\hat{R}_{02} \cdot \vec{V}_2}{c} \right)$$
$$\tau_1 - \tau_2 = \frac{\Delta t_g - \frac{\vec{K}' \cdot \vec{b}}{c}}{1 + \frac{\hat{R}_{02} \cdot \vec{V}_2}{c}}$$

ISAS: 光差方程式+時系変換

1. 光差方程式

$$\Delta T_{01} = \frac{\|X_0(T_1 - \Delta T_{01}) - X_1(T_1)\|}{c} - \Delta t_{g01}$$
$$\Delta T_{02} = \frac{\|X_0(T_2 - \Delta T_{02}) - X_2(T_2)\|}{c} - \Delta t_{g02}$$

但し、 Δt_{g0i} ($i=1,2$)は重力(Shapiro)遅延を数値的に解いて ΔT_{01} , ΔT_{02} を求める。

2. TCB->TTへの時系変換を行う。

$$\tau_2 - \tau_1 = \left(1 - U - \frac{V_e^2 + 2\vec{V}_e \cdot \vec{w}_2}{2c^2} \right) (\Delta T_{02} - \Delta T_{01}) - \frac{\vec{V}_e \cdot \vec{b}}{c^2}$$

6月4日の鹿島-Algonquin、鹿島-臼田基線について、ISAS-CRLの遅延時間変化率の差を計算した結果を、図4に示している。ISASの遅延変化率が必ずしも観測値とよく一致している訳ではない。ISAS-CRLの遅延変化率の理論値、観測値、いずれも同程度の差(9000km基線で $1 \cdot 10^{-10}$ sec/secオーダー)で異なっている。

5. まとめと課題

これまで、位相遅延と飛翔体のVLBI観測の理論値について現状の問題点を報告した。NOZOMIのレンジ信号を受信することによって、信号強度がある程度強い場合には、群遅延も観測ができた。スイングバイ時にNOZOMIが地球に接近した5月22日-6月4日の期間がこれにあたる。この期間にVLBI観測から、群遅延を使って推定されたNOZOMIの位置、解析時の遅延残差を図6に示す。群遅延の場合には信号の帯域幅が狭いため遅延決定精度が数nsから100ns程度の範囲でばらついてしまっている。大陸間基線が使える場合にはこれでも μ radian~数n radianの測角が可能であるが、日本国内基線だけを使う場合には、位相遅延の活用が不可欠と考えられる。ここで挙げた課題をできるだけ早期に解決し、VLBIを使った宇宙探査機のナビゲーションを実用化していきたい。

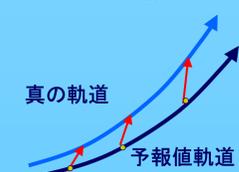


図5. 飛翔体の位置天文解析の概念図。予測値軌道に対する真の軌道の天球面上の(平均)位置を推定する。

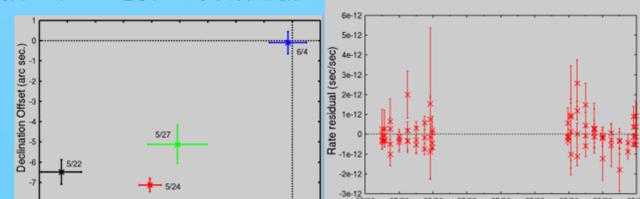


図6. 2003年5月22日から6月4日の間に行った、NOZOMIのVLBI観測から群遅延量を使って推定された飛翔体位置(左)、と遅延・遅延変化率の最小二乗推定残差の例(5月22日)(右)。群遅延の残差は、クエーサの遅延量を中心に、100nsオーダーでばらついている。これはNOZOMIの変調信号(レンジ信号)の帯域幅が1MHzオーダーである結果と考えられる。