

# 飛翔体の VLBI 観測

## —位相接続について—

関戸 衛、市川 隆一、近藤 哲朗 (NICT)、  
吉川 真 (ISAS/JAXA)、大西 隆史 (富士通)

### 概要

飛翔体の VLBI 観測において、スイッチング相対 VLBI を行う際に位相遅延を観測量とできる (位相接続可能な) 条件を、火星探査機 NOZOMI の VLBI 観測データを使って調べた。その結果、短基線の場合には、位相の接続に使用する多項式は 1 次式で十分であり、目安として、外挿誤差 RMS を 30ps (8.4GHz の 4 分の 1 周期) 以下にするためには、飛翔体の観測を 2 分 ~ 5 分行い、電波源の観測を 3 分 ~ 5 分以下にすることが必要であると考えられる。また、長基線の場合には、遅延のモデル誤差 (電波源位置誤差) による高次の遅延変化を外挿するために、2 次多項式を使って外挿することが必要であり、3 次以上の多項式の使用はそれほど効果がないことがわかった。長基線 (9000km) の場合には、外挿誤差 RMS を 30ps 以下にするには、飛翔体の観測時間は 5 分程度、参照電波源の観測時間は 1 分以下に抑えることが必要と考えられる。ただし、これは基線長と電波源の予測位置誤差の大きさに依存する。

## 1 はじめに

深宇宙飛翔体のナビゲーションにおいて、従来のレンジとその変化率 (R&RR) に加えて、VLBI を活用すると軌道決定精度が向上すると期待される。JPL/NASA では、既に群遅延を観測量としてこの技術を活用しているが [1]、群遅延量は飛翔体信号の帯域幅が狭いことから遅延決定精度がナノ秒オーダーに制限される。位相遅延量の利用が可能になれば、観測精度が飛躍的に向上することが期待される [2]。また、この方法はキャリア信号さえ出していればあらゆる探査機に使用できるため汎用性が高い利点もある。位相遅延量を利用する上での最大の問題は、周期の整数倍の不定性である。これは、Scan と Scan の間の位相接続を行い、未知数を減らすことで克服することが可能である。しかし、大気などの伝搬遅延を補正するためにスイッチングによる相対 VLBI 観測を行う場合には、Scan と Scan の間が時間的に隔たるため、位相の変化を外挿した誤差が大きくなり位相接続が難しくなってくる。この報告では、2003 年に火星探査機 NOZOMI の 8.4GHz の信号を VLBI 観測し、このデータを用いてある時間区間のデータを外挿したときに、どの程度の時間先まで 周期の不定性なしに位相接続が可能か、多項式の次数や基線長を変えながら検討した。

## 2 位相の外挿誤差評価

### 2.1 NOZOMI の位相遅延データ

2003 年に火星探査機 NOZOMI が地球スイングバイを行った際には、国内の VLBI 観測施設の多くとカナダのアルゴンキン局が協力して観測を行った。特に 2003 年 6 月 4 日には、24 時間以上の長時間にわたって NOZOMI の連続追尾を行い、良質の位相遅延量が得られた。位相遅延量は、キャリア信号の位相だけを高い周波数分解能で抽出するラインスペクトル専用の相関処理ソフトウェアを使って抽出した [3]。このときには NOZOMI をほとんど連続追尾したので位相接続は比較的容易であり、更に複数の基線のデータが使用できたので、遅延量の閉合関係を使ってより精密な位相の接続が可能であった。図 1 左に鹿島 34m、つくば 32m、アルゴンキン 46m アンテナの位相遅延量を接続した例を示す。遅延の計測精度として 10-20ps 程度が得られていることがわかる。

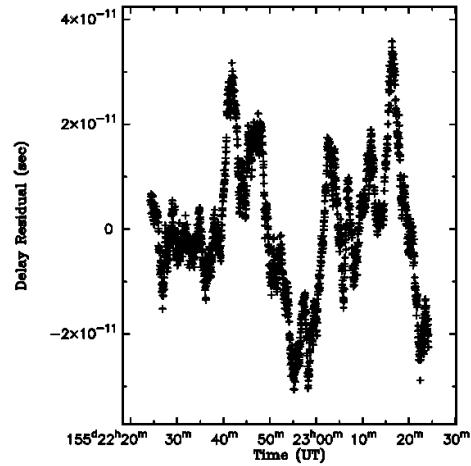
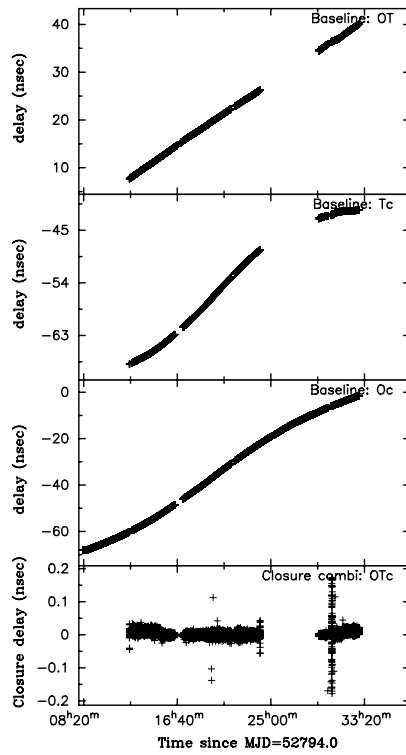


図 1: [パネル左] 位相遅延量の例:鹿島 34m(O)、つくば 32m(T)、Algonquin 46m(c) アンテナ間の位相遅延量残差 (予測遅延量をあらかじめ差し引いてある) と閉合位相遅延量 (最下段)。[パネル右] 位相遅延残差を 1 時間ごとに区切って 3 次多項式を最小自乗フィットし、長周期のトレンドを除いた位相遅延量 (鹿島-つくば基線)。このような短期の位相変動に関しては、基線長に依存せず 9000km 基線でも同様な大きさの変動であることを確認している。

## 2.2 主に大気による短期変動だけ (電波天文) の場合

予測遅延量だけを除いた位相遅延残差データは、図 1 の左のパネルのように数十ナノ秒オーダの大きな変化が残っている。これは、各局の原子時計の同期誤差や幾何学的遅延量のモデル誤差、電波源の位置誤差などによるものである。相対 VLBI 観測は、電波天文 VLBI では大気の揺らぎによるコヒーレンスロス低減するためによく使用される手法であるが、この場合ターゲットや参照電波源の位置はかなりの精度で既知とされるので、この図のような大きな位相遅延残差はほとんど原子時計の同期誤差だけによるもので、変化は 1 次関数的である。図 1 右側に、1 時間のデータから長期のトレンドを除いた遅延量の変動を示している。このような遅延 (位相) の変化が電波天文で補正対象とする、主に大気に起因する位相揺らぎである。このように短期遅延変動だけが遅延残差の場合において、ある区間のデータから外挿してどの程度の時間先まで正確に遅延が予測できるか調べてみる。図 2 左の図に示すように、遅延量のデータのある「推定区間」で推定した直線を外挿し、外挿間隔だけ先の外挿値と実際のデータとの自乗平均値の平方根 (RMS) を計算し図右に示している。遅延の短期変動は、観測局周辺の局所的な大気の影響が支配的であると予測されるが、図のデータからも、このような外挿誤差が基線にほとんど依存せず、長基線の場合と短基線の場合でほとんど差がないことがわかる。また、推定区間を長く取って推定した直線で外挿すると、外挿間隔が短い場合でも短期変動の影響で RMS が大きくなることがわかる。外挿誤差の RMS を観測周波数 8.4GHz の周期  $1/4 (=30\text{ps})$  を外挿誤差の一つの目安と考え、外挿可能な時間間隔が「推定区間」の長さの関数として表 1 のように得られる。

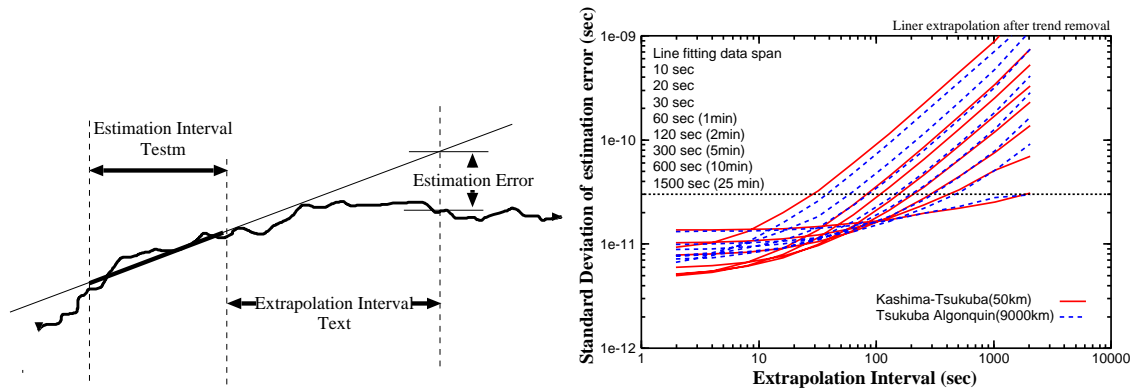


図 2: 外挿による誤差の計算。左の図のように推定区間  $T_{estm}$  のデータから、外挿間隔  $T_{ext}$  だけ外挿したときの、実際の値と外挿値との差の rms が右図。鹿島-つくば (50km) のが実線と、つくば-ARO(9000km) の場合破線を示している。8.4GHz の周期の  $1/4 (=30ps)$  を誤差上限のひとつの目安として点線を引いている。

表 1: 遅延の短期変動だけがあるとき、外挿誤差の RMS を 30ps を上限としたときの、推定区間に対する外挿可能間隔の上限値。遅延の短期変動は気象による影響が支配的であるため、この「推定区間」-「外挿間隔上限」の関係は、基線長にはほとんど依存しない。

推定区間 (sec)	10	20	30	60	120	300	600	1500
外挿間隔上限 (sec)	30	60-90	100	150	200	300	400	1100

### 2.3 モデル誤差を含む長期変動がある（飛翔体観測の）場合

飛翔体の観測の場合には天文観測と異なって、飛翔体の予報位置の精度が悪く（誤差数秒角）、予測遅延量を差し引いた残差には、前節で議論した短期変動だけでなく、電波源位置の誤差による大きな遅延変動が残っている（図 1 左の図は遅延予測値だけを除いた遅延残差の例である）。そのため、前節では 1 次式による外挿しか行わなかったが、2 次以上の多項式による外挿も選択肢として考慮する必要がある。図 3 は 1 次多項式から 3 次多項式まで使用して、多項式の推定区間を 10 秒から 1500 秒まで変化させたときの外挿誤差 RMS を、外挿間隔の関数として表示している。短基線と長基線の例として、鹿島-つくば (50km) と、つくば-アルゴンキン (9000km) を挙げている。前節の短期変動成分しかない場合と比較して、基線長に依存して RMS の曲線の特徴が大きく異なってくる。これは、モデル誤差（電波源位置誤差）がある場合には、遅延残差が基線長に比例して大きくなるためである。図 2 左上の図から、短基線の場合には、1 次式と比べて 2 次以上の多項式で外挿するメリットがあまりないことがわかる。ところが長基線の場合には、30ps 以下の RMS を得る条件で 1 分以上の外挿間隔を得るには 2 次多項式を使う必要があることが、左下の図からわかる。これは、遅延残差に含まれる、電波源位置誤差による高次の変動を外挿するのに 2 次の項が必要であることを示している。しかし、3 次式の外挿を行うメリットはあまりない（図 3 右下）。

これらの図の結果を元に、基線長 50km、9000km それぞれの場合の外挿誤差 RMS が 30ps 以下となる外挿間隔の上限を表 2 にまとめた。この表から、短基線の場合には、飛翔体と参照電波源をそれぞれ 5 分ずつ観測するスイッチング観測や、飛翔体を 2 分間と参照電波源を 3 分間以内で観測するモードなどが考えられる。基線長が大陸間となる場合には、飛翔体の観測時間は 2 分以上、参照天体の観測時間を約 1 分以下とすることが必要となることわかる。ただし、長基線の

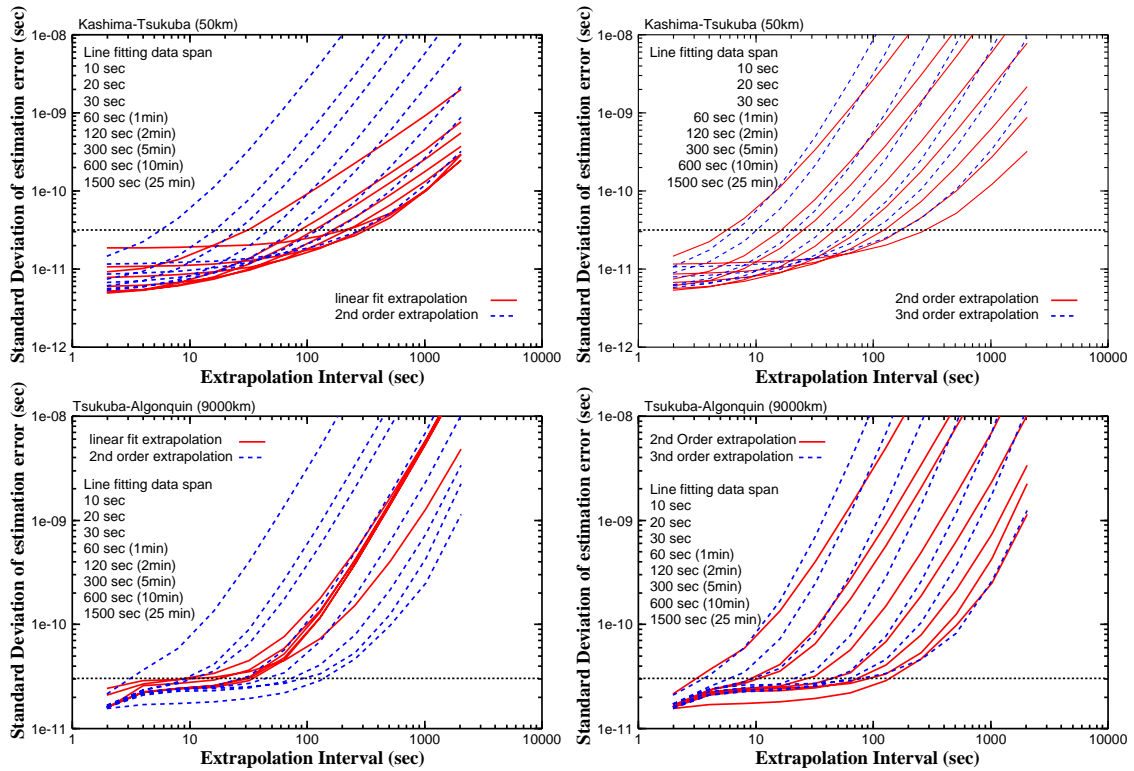


図 3: 予測遅延量を除いた位相遅延残差の外挿誤差 RMS。上の段は鹿島-つくば (50km)、下の段はつくば-アルゴンキン (9000km) の外挿誤差の RMS である。左は 1 次式 (実線) による外挿と 2 次式 (破線) を、右の図は 1 次式 (実線) と 3 次式 (破線) を比較したもの。それぞれの図の複数の線は、外挿多項式の決定に使用した推定区間の時間幅を 10 秒から 1500 秒まで変えた (図内の表示参照)。RMS の大きさの基準として 30ps のラインを点線で示した。

場合には基線長や飛行体の予報軌道の正確さの如何で条件が緩和、あるいは厳しくなることがありうる。短基線の位相遅延データで電波源位置を推定して改良し、長基線のデータにおける位相接続の条件を緩和することも手法の一つとして考えられる。

### 3 まとめ

火星探査機 NOZOMI の VLBI 観測による位相遅延データを用いて、スイッチング相対 VLBI 観測を行う際の、位相接続に必要なスイッチング周期について検討を行った。電波天文 VLBI における位相補償スイッチング観測に比べて、飛行体のスイッチング VLBI 観測はより条件が厳しいことが明らかとなった。短基線では、外挿誤差 RMS30ps 以下を満たすために必要な条件として飛

表 2: 基線長 50km, 9000km それぞれの場合で、適当な多項式を使って外挿したときの RMS が 30ps 以下となる最大外挿間隔を、多項式の推定区間に対してまとめた。

基線長 (km)	多項式	推定区間 (sec)	10	20	30	60	120	300	600	1500
50	1 次	外挿間隔上限 (sec)	30	90	110	160	220	300	300	220
9000	1-2 次	外挿間隔上限 (sec)	10	15	20	30	40	70	90	120

翔体を5分間、参照電波源をスリューを含めて5分以下で観測するモードや飛翔体を2分間、参照電波源をスリューを含めて3分間程度で観測するモードなどが考えられる。長基線の場合には、飛翔体のSCANを2分以上、参照電波源野観測時間は1分以下とすることがその条件となる。ただし、この場合モデル誤差(電波源の位置誤差)が遅延残差の要因であるため、基線長と飛翔体予報軌道の精度に依存して条件が変わることに注意する。また、位相接続に使用する外挿多項式は、短基線では1次式で十分であり、長基線の場合でも、2次式までで十分であることがわかった。

## 参考文献

- [1] Border J.S., F.F. Donovan, S.G. Finley, C.E. Hildebrand, B. Moultrie, & L.J. Skjerrve, "Determining Spacecraft Angular Position with Delta VLBI: The Voyager Determination", AIAA/AAS Astrodynamics Conference Aug. 9-11 1982 San Diego, California, AIAA-82-1471, 1982.
- [2] Mamoru Sekido, Ryuichi Ichikawa, Hiro Osaki, Tetsuro Kondo, Yasuhiro Koyama, Makoto Yoshikawa, Takafumi Ohnishi, Wayne Cannon, Alexander Novikov, and Mario Berube, "ASTROMETRY OBSERVATION OF SPACECRAFT WITH VERY LONG BASELINE INTERFEROMETRY - A STEP OF VLBI APPLICATION FOR SPACECRAFT NAVIGATION -", URSI Commission-F Triennium Open Symposium proceedings. pp.163-170. 2004.
- [3] 関戸衛、市川隆一、大崎裕生、近藤哲朗、小山泰弘、吉川真、大西隆史、のぞみ VLBI 観測グループ、"VLBI による宇宙飛翔体位置計測-データ解析の現状について-", 第4回宇宙科学シンポジウム集録, pp. 641-644, 2004