

飛翔体の VLBI 観測

- 飛翔体の信号と相関処理手法について -

関戸衛, 市川隆一, 近藤哲朗 (NICT/Kashima),
吉川真, 加藤隆二, 村田泰宏, 望月奈々子 (JAXA/ISAS)

概要

我々は、従来の R&RR 計測に加えて VLBI 観測データを併用することにより、宇宙飛翔体のナビゲーション精度を向上させるための研究を進めている。今回、飛翔体の VLBI 観測において群遅延量の計測精度を向上させる上で重要な、飛翔体からの信号形態 (レメトリ信号、レンジ信号) について比較を行い、また信号対雑音比 (SNR) を改善するためのフィルタリング処理について検討を行った。HAYABUSA を対象として行った観測データを使って、レメトリ信号とレンジ信号の間に遅延の計測精度を特徴づける遅延分解関数の違を明らかにし、高精度な遅延計測にはレンジ信号が有効であることを確認した。また、信号強度が弱く SNR が十分でない場合には、周波数フィルタリングによる雑音抑圧により、SNR を改善できることを示した。

1 はじめに

従来、深宇宙探査機の軌道決定に使用されている距離とその変化率 (R&RR) の観測は主に観測者から探査機への視線方向の探査機位置決定に高い感度をもつものに対し、VLBI は視線と垂直な面に高い感度をもつ観測方法であるため、両技術を併用することにより、深宇宙探査機のナビゲーション精度を飛躍的に向上させることができると期待されている [1][2]。VLBI の観測量には、群遅延量 ($d\phi/df$) と位相遅延量 (ϕ/f) がある。これらを違いを図 1 に模式的に示している。我々は、群遅延量より遅延計測精度の高い位相遅延量を使った方法についても研究を行っているが [3][4]、ここでは遅延量が不定性なしに得られる群遅延量の遅延計測精度について考える。VLBI の深宇宙飛翔体のナビゲーションへの応用は、JPL/NASA が DDOR (Delta Differential One way Range) という方法で実用化しているが、これは群遅延量を観測量とする方法である。群遅延量の計測精度は信号の周波数帯域の逆数に比例する。このため、変調方式など飛翔体の信号の種類によって遅延の計測精度に差がでる。我々は、2003 年 11 月 26 日に小惑星探査機 HAYABUSA を VLBI 観測した。本報告では、このデータを使って信号形態の違いと、周波数フィルタリングによる信号対雑音比 (SNR) の改善効果について調査した結果を報告する。

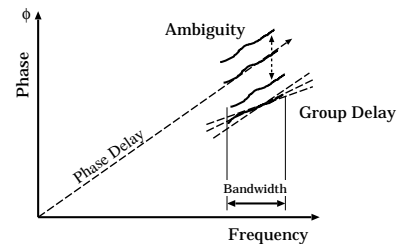


図 1: 群遅延と位相遅延量の違いを周波数-位相関係で表示している。遅延計測精度は、群遅延量では帯域幅の逆数に比例し、位相遅延量は観測周波数の逆数に比例する。

2 テレメトリ信号とレンジ信号の比較

2003 年 11 月 26 日 UT4 時 30 ~ 10 時に鹿島 34m、臼田 64m、鹿島 11m、岐阜 11m の電波望遠鏡を使って、小惑星探査機 HAYABUSA の信号 (観測周波数は 8.408GHz) の VLBI 観測を行った。このとき観測時間中に HAYABUSA からの信号はテレメトリ信号とレンジ信号が切り替わり、両方の信号の性質を比較するのに適したデータが得られた。図 2 に、鹿島 34m - 臼田 64m 基線で観

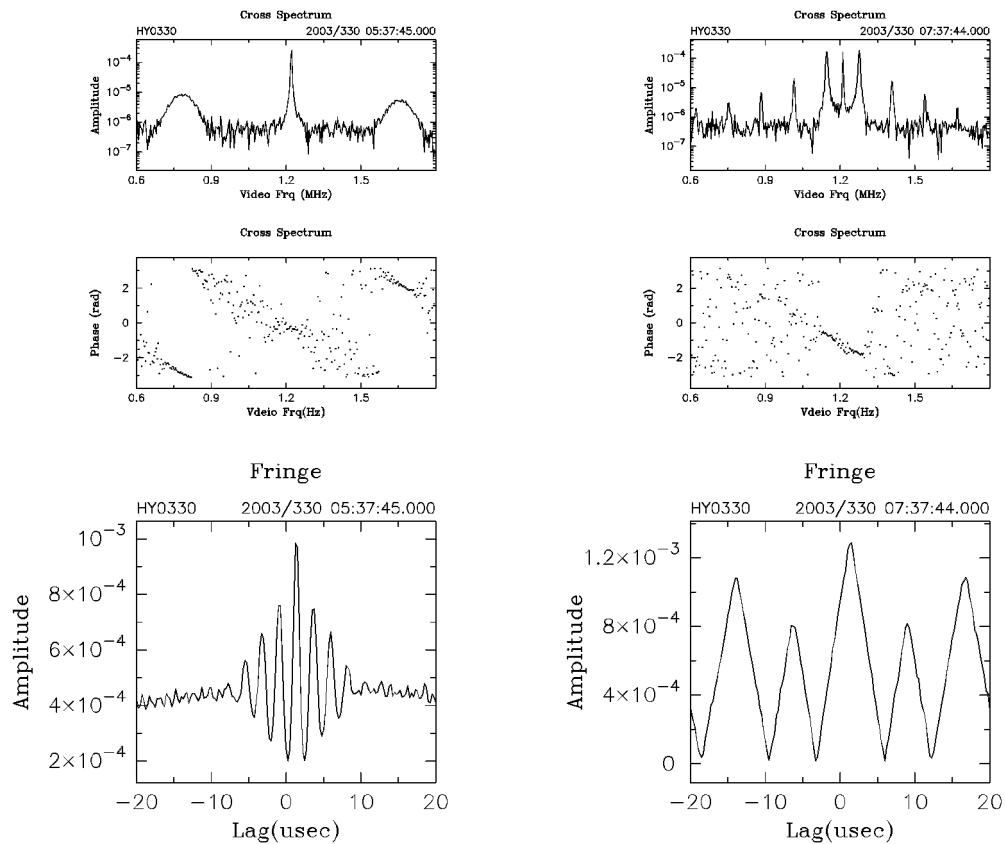


図 2: 2003 年 11 月 26 日、鹿島 34m - 臼田 64m の基線で観測した HAYABUSA の信号の相互相関スペクトルと相互相関関数。左の列はレンジ信号、右はテレメトリ信号。上段二つは相互相関関数で、上側が振幅下は位相、それぞれの図の横軸は 8406.99MHz をローカル周波数とするビデオ周波数である。最下段は相互相関関数 (遅延分解関数) である。

測された HAYABUSA のレンジ信号とテレメトリ信号の、相互相関スペクトルと相互相関関数 (遅延分解関数) の典型例を示す。レンジ信号は、キャリア信号の両側約 450kHz に帯域幅約 150kHz の側帯波を伴っており、相互相関関数は周期約 $2.2\mu\text{sec}$ の櫛の歯状の形をしている。これは有効帯域幅が約 450kHz であることに対応している。一方テレメトリ信号は、キャリア信号の両側約 70kHz とその外側に約 140kHz 周期の高調波を伴っている。相互相関関数は周期が約 $10\mu\text{sec}$ の三角波の形をしており、有効帯域幅約 100kHz に対応している。両信号の相互相関関数の比較から、同じ SNR が得られる場合には、レンジ信号の方がテレメトリ信号に比べて約 4-5 倍の遅延分解能があることがわかる。

3 相関処理手法による SNR の改善

我々は 2003 年に火星探査機 NOZOMI の VLBI 観測を行ったが、これまでのところ、遅延測定値の解析残差が約 100 ナノ秒のオーダーであった。一方、NOZOMI を使った飛翔体の観測で JPL は約 1 ナノ秒の計測精度を得ていたと言われている。我々と JPL との違いは、遅延計測に使用した信号についても検討の余地があるが (前節参照)、飛翔体の信号の相関処理のやりかたにも違いが

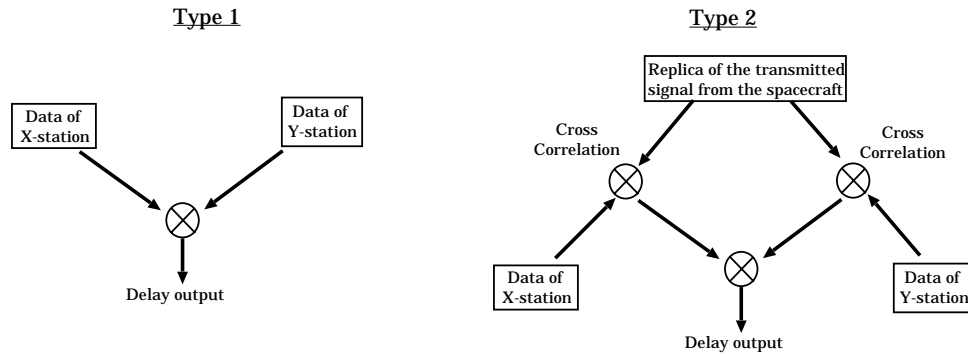


図 3: 相関処理の手法を模式的に示したブロック図。我々は通常の連続波電波源の処理と同様に、二つの局のデータを直接相関処理している (左)。これに対し、JPL は一旦送信信号のレプリカとの相関処理を行い (フィルタリングに相当)、それぞれの観測局の相互相関スペクトルどうしを掛けあわせて、最終的な 2 局の相互相関関数を計算している。(右)。

あることがわかっている (図 3 参照)。我々は通常の天然電波源を対象とした VLBI と同様に、2 局のデータの直接相関処理を行ってきた。これに対し、JPL は、飛翔体から送信する測距信号のレプリカをそれぞれの VLBI 観測局のデータと相関処理し、こうして得られたレプリカ信号との相互相関スペクトルを観測局のペアについて掛け合わせて相互相関関数を計算している。JPL の相関処理は、送信信号自身のスペクトルによるフィルタリングを行っていることと等価であり、効率的に雑音を抑圧し、信号部分の相関だけを取り出すのに有効であると考えられる。現在のところ設備の都合で、我々はレンジ信号のレプリカを得ることができないため、JPL と同様な処理を行うことができないが¹、次善の策として、取得した信号から飛翔体の信号とわかる周波数スペクトル部分だけを切り出し、相関処理することで SNR を改善できると考えられる。図 4 に臼田 64m-鹿島 11m 基線の、周波数フィルタリングによる相互相関関数の SNR の改善効果の例を示す。レンジ信号の側帯波の部分に矩形のフィルタを掛けることで信号がない周波数スペクトルの雑音成分を抑圧した結果、雑音の多い鹿島 11m - 臼田 64m の相互相関関数が、鹿島 34m - 臼田 64m の相互相関関数 (図 2 左下のパネル) と同程度に改善していることがわかる。フィルタリングによる SNR の改善は、通常の相関処理で SNR が低い場合に顕著に表れる。2003 年 11 月 26 日の観測データは HAYABUSA が比較的地球に近いときのものであるが、探査機が深宇宙を飛行している場合、SNR はより低く、ここで示したような SNR の改善が有効に機能すると考えられる。

4 まとめ

飛翔体の VLBI 観測において群遅延両を利用する場合、探査機から送信される信号形態により、VLBI 観測時の遅延決定精度が左右される。今回 HAYABUSA のテレメトリ信号とレンジ信号を比較し、レンジ信号の方が、テレメトリ信号より高い遅延分解能をもつことを示した。また、周波数フィルタリングによる雑音の抑圧が相互相関関数の SNR を改善する上で有効であることを示した。

¹現在レプリカ信号を取得するための準備も進めている

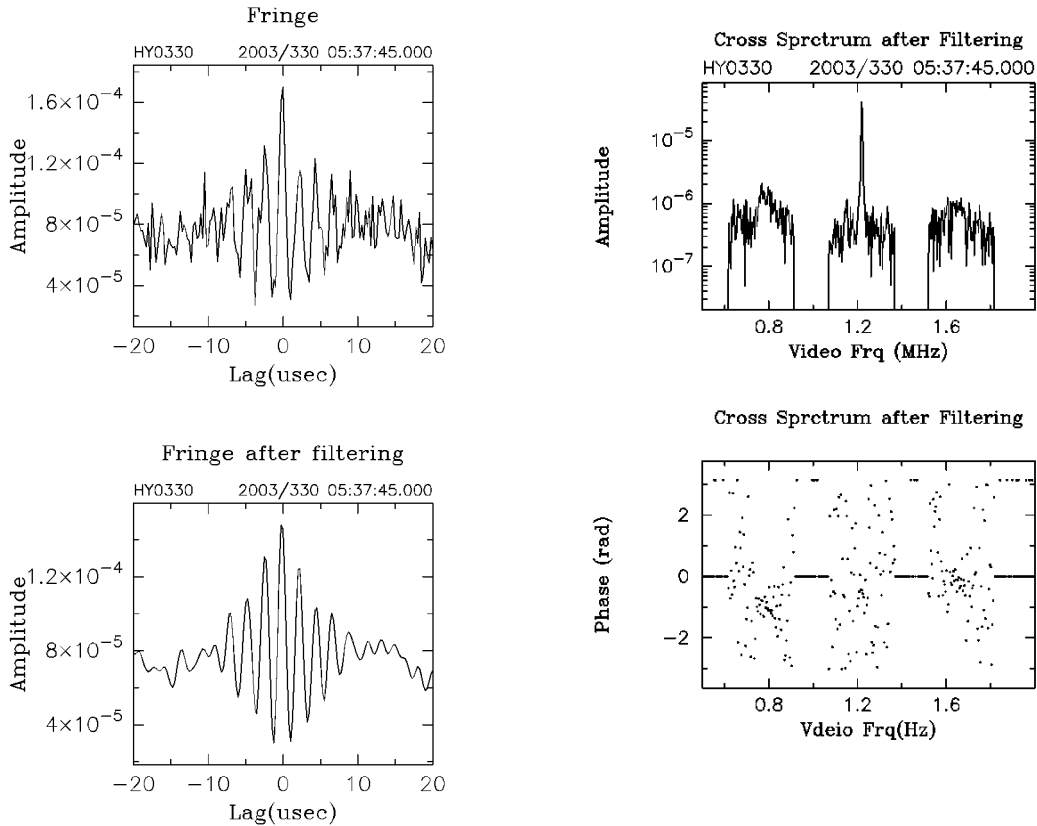


図 4: 周波数フィルタリングによる相関関数の SNR 改善効果。2003 年 11 月 26 日の HAYABUSA の信号を白田 64m - 鹿島 11m 基線で観測して得られた通常の相関処理による (全帯域 2MHz を使用する) 相互相関関数 (左上) と幅 150kHz の矩形フィルタをキャリア信号の両側 ± 450 kHz を中心に適用した (右) 場合の相互相関関数 (左下)。

参考文献

- [1] 加藤隆二、大西隆史、“軌道決定の将来構想”,「VLBI 技術による宇宙研究」研究会 集録、pp.47-54, 2004.
- [2] 市川 勉,“惑星探査機における (相対) VLBI 観測の電波航法への導入について”,「VLBI 技術による宇宙研究」研究会 集録、pp.55-60, 2004.
- [3] 関戸衛、市川隆一、近藤哲朗、吉川真、大西隆史,“飛翔体の VLBI 観測—位相接続について—”, VLBI 技術による宇宙研究 研究会集録, 2004 年 11 月 30 日-12 月 1 日, 2005.
- [4] 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 Comission-F Triennium Open Symposium proceedings. pp.163-170. 2004.