

「のぞみ」VLBI観測データの 高次フリンジサーチ法の確立

通信総合研究所

近藤哲朗、関戸衛、市川隆一、小山泰弘、大崎裕生

1. はじめに

通常の測地VLBI観測は数分の積分時間を想定した観測であり、水素メーザ周波数標準を使用した場合は、相関処理データのフリンジサーチにおいても1次の位相変動分をサーチするだけで十分であった。しかしながら、微弱な電波源に対して信号検出を目的として数10分以上の観測を行った場合、位相の2次以上の変動成分の影響により長時間積分が困難となる。特に位置情報に誤差を伴った探査体の場合、2次以上の位相変動成分が大きいことが予想される。そこで、従来のフリンジサーチに2次の位相変動までのサーチ機能を追加した。その結果、30分以上の積分が可能となった。実際に信号強度が極端に弱くなる時期の「のぞみ」探査体に対して2次サーチを適用したところ、従来のサーチ方法では検出できなかったフリンジを検出することに成功し、2次サーチの有効性が確かめられた。

2. 従来のフリンジサーチ（粗決定サーチ）

VLBIの相関処理はまず数秒程度の短い積分時間を単位とした相関処理を行い、その単位積分時間（PP）の処理データを更に積分を行うという二段階のプロセスを経るのが普通である。従来の方法ではPP毎のデータを更に積分する際にフリンジ位相が時間と共にリニアに変動するもの（フリンジレート）とした積分しか行わなかった。

粗決定サーチでは時刻 t におけるビデオクロススペクトル $S_v(f_v, t)$ に Dt 、 Dt によって生じる位相変化を補正しながら周波数および時間方向に積分していき、最終的に得られる相関強度が最大となる Dt 、 Dt の組み合わせを求めている。式で表すと(1)式で表される値の絶対値が最大となる Dt 、 Dt を求める作業となる。

$$\iint S_v(f_v, t) e^{-i2pf(\Delta t + \Delta t)} df dt \quad (1)$$

ここで

$$f = f_0 + f_v$$

f_0 はベースバンドRF周波数、 f_v はビデオ帯域内の周波数である。(1)式の位相項は

$$\begin{aligned} f &= 2pf(\Delta t + \Delta t) \\ &= 2p(f_0 + f_v)(\Delta t + \Delta t) \\ &= 2pf_0\Delta t + 2pf_0\Delta t + 2pf_v\Delta t + 2pf_v\Delta t \end{aligned} \quad (2)$$

と表されるが、最終的に展開された右辺の第1項は積分変数を含まないので積分の外に出すことができる。また第2項はフリンジ位相回転の補正を表し、第3項はビデオ帯域内で

の遅延残差の補正を表している。第4項は Dt により発生する時間と共に増大(または減少)するビデオ帯域内の位相変動を表しているが、今対象とするフリッジ位相の残差の変動が100秒で2 程度のオーダーとすると、RF周波数として8GHzを考えた場合、

$$2p \times 8 \times 10^9 \times \Delta t \times 100 = 2p$$

$$\Delta t = 1.25 \times 10^{-12}$$

であるから Dt オーダーは 10^{-12} 程度となる。したがって、 $t = 200$ 秒とすると Δt は 0.2nsec となるが、 Dt により発生するビデオ周波数帯での位相はビデオ周波数を2MHzとすると僅か0.0025ラジアンとなる。この位相変動を無視すると(1)式は f, t に関して変数分離が可能となり、後で述べる2次元FFTにより計算速度の高速化を図ることができる。そこで、現フリッジサーチにおいては $2pf_v \Delta t$ の項を無視している。つまり、

$$\iint S_v(f_v, t) e^{-i2pf(\Delta t + \Delta t)} df dt \approx e^{-i2pf_0 \Delta t} \int \left\{ S_v(f_v, t) e^{-i2pf_v \Delta t} df_v \right\} e^{-i2pf_0 \Delta t} dt \quad (3)$$

としている。

実際の相関器出力データを使ってのフリッジサーチは以下のように行われる。

相関器出力(複素相互相関関数)を $R(n, k, d)$ 、それをフーリエ変換して得られるビデオクロススペクトルを $S_v(j, k, n)$ とする。ここで、 n : 周波数ch、 k : 時間、 d : ラグ、 j : 周波数(ビデオ帯)を表すインデックスである。

$S_v(j, k, n)$ を用いると(3)式は(4)式のように書ける。但し $e^{-i2pf_0 \Delta t}$ は最終的に補正することとしてサーチ過程の計算では絶対値を変えることはないため省略している。

$$F(n, Dt, Dt) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \left\{ \frac{1}{j-1} \sum_{j=1}^{J-1} S_v(j, k, n) e^{-i2pf_j^v Dt} \right\} \cdot e^{-i2pf_0^n Dt Dk} \quad (4)$$

ここで、 f_j^v ビデオ帯域内の指標 j に対応する周波数
 f_0^n n -chのRF周波数、 Dt 時間方向の間隔

粗決定サーチとは

$$F(\Delta t, \Delta t) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |F(n, \Delta t, \Delta t)| \quad (5)$$

を最大化する Dt 、 Dt を求める作業である。ここで(4)式は、 Dt 、 $f_0^n Dt$ に関して2次元フーリエ変換の式となっているので、サーチに2次元FFTを使用することにより、計算時間の短縮化を図ることができる

2. Δt のサーチ

Δt までのサーチを行う場合、(4)式に Δt の効果を加えた次式をサーチ関数と考える。

$$F(n, \Delta t, \Delta f, \Delta t) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \left\{ \frac{1}{j-1} \sum_{j=1}^{J-1} S_v(j, k, n) e^{-i2pf_j^y \Delta t} \right\} \cdot e^{-i2pf_0^n \{ \Delta f \Delta t k + \frac{1}{2} \Delta f (\Delta t k)^2 \}} \quad (6)$$

したがって粗決定サーチは

$$F(\Delta t, \Delta f, \Delta t) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |F(n, \Delta t, \Delta f, \Delta t)| \quad (7)$$

を最大化する Dt 、 Df 、 Δt を求める作業となる。具体的サーチは以下のように行うこととした。

ア． Δt のサーチ範囲とサーチステップを決める

サーチ範囲 : $-2.0 \times 10^{-15} \sim +2.0 \times 10^{-15}$ s/s²

サーチステップ : 0.2×10^{-15} s/s²

イ． Δt を与えて P P 毎のビデオクロススペクトルを次式で再計算

$$S'_v(j, k, n) = S_v(j, k, n) \cdot e^{-i2pf_0^n \cdot \frac{1}{2} \Delta f (\Delta t k)^2} \quad (8)$$

ウ． $S'_v(j, k, n)$ を用いて (4) 式に相当する次式を計算

$$F(n, \Delta t, \Delta f) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \left\{ \frac{1}{j-1} \sum_{j=1}^{J-1} S'_v(j, k, n) e^{-i2pf_j^y \Delta t} \right\} \cdot e^{-i2pf_0^n \Delta f \Delta t k} \quad (9)$$

エ．粗決定サーチ関数を計算

$$F(\Delta t, \Delta f) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |F(n, \Delta t, \Delta f)|$$

オ．「のぞみ」(キャリア信号) の場合は、 $F(\Delta t, \Delta f)$ を Dt に関して平均化を行う

$$F(\Delta f) = \frac{1}{b-a} \int_a^b F(\Delta t, \Delta f) d(\Delta t) \quad (10)$$

ここで、a, b は Dt のサーチ範囲

カ． $F(\Delta f)$ の最大値をサーチ

キ．イ～カを異なる Δt に対して繰り返す。

ク．こうしてアで与えた Δt の範囲内で最もカの結果が最大となる Δt を求める

ケ．クで求めた Δt を中心にサーチステップをアのステップの半分にして前後の点でイからカの計算を繰り返す(計3点での力の値が得られる)

コ．この3点から最大値となる Δt を放物線近似で求める。

サ．この Δt における(10)式の値が最大となる Df を求める。(キャリア信号の場合は Dt のサーチは行わない)

シ．こうして得られた Df 、 Δt を用いて P P 毎のクロススペクトルを次式で再計算する

$$S'_v(j, k, n) = S_v(j, k, n) \cdot e^{-i2pf_0^n \{ \Delta f \Delta t k + \frac{1}{2} \Delta f (\Delta t k)^2 \}} \quad (11)$$

ス．さらに(11)式を全 P P に対して積分するか、または(9)式の $F(n, \Delta t, \Delta f)$ において Df を 0 (必要ならサーチで強度が最大となる Df を求める。通常はシで補正済みなので 0 となる筈) に固定して得られる $F(\Delta t)$ をフーリエ変換することにより、積分されたクロススペクトルを求める。

セ．スで得られたクロススペクトルから強度最大の周波数を求める

ソ．最終的に R F 周波数での位相補正を施し次式 ((1 2) 式) でクロススペクトルを計算し直し、セで得られた周波数での強度と位相を求める。これが P P 毎の残差位相となる。

$$S'_v(j,k,n) = e^{-i2pf_0^n \Delta t} S_v(j,k,n) \cdot e^{-i2pf_j^n \Delta t} \cdot e^{-i2pf_0^n \{ \Delta t \Delta k + \frac{1}{2} \Delta t (\Delta k)^2 \}} \quad (12)$$

上記すべての計算において Δtk の項は実際には $t - PRT$ で計算する

キャリア信号だけの場合は Dt を求めることができないので、その場合、 $Dt = 0$ として計算を行う。

後日行った臼田 - アルゴンキン (カナダ) 基線処理では、サーチ範囲をさらに広げる必要があった。その時のサーチ範囲は $\pm 1.0 \times 10^{-13}$ とした。

3. 観測 (スキャン) 間の接続

2 のプロセスで得られた Dt 、 Dt 、 Δt を補正した 1 番目の観測の予測値を t_1 、 \dot{t}_1 、 \ddot{t}_1 、 \ddot{t}_1 とする (\ddot{t}_1 には補正は施されていない)。この改良された予測値を使うと、任意の時刻 t における遅延は

$$t(t) = t_1 + \dot{t}_1(t - PRT) + \frac{1}{2} \ddot{t}_1(t - PRT)^2 + \frac{1}{6} \ddot{t}_1(t - PRT)^3 \quad (12)$$

で計算される。こうして計算された次の観測 (2 番目の観測) の最初の P P の時刻での遅延と、次のスキャンで独立に求められた t_2 、 \dot{t}_2 、 \ddot{t}_2 、 \ddot{t}_2 から計算される遅延が一致するように t_2 にオフセットを加える (これを Dt とする)。この場合、(1 1) 式はオフセットも考慮した次式で計算することにより、新たな予測値に対する残差位相が求まる。

$$S'_v(j,k,n) = S_v(j,k,n) \cdot e^{-i2pf_0^n \{ \Delta t + \Delta t \Delta k + \frac{1}{2} \Delta t (\Delta k)^2 \}} \quad (13)$$

3 番目の観測以降も観測間の時間が短いなら (数秒か?)、こうした方法で接続可能と思われる。

4. 実例

2003 年 1 月 10 日の「のぞみ」観測の OBS # 9 および # 10 (表 1) に対して通常のFRINGEサーチおよび 2 次サーチを行った結果を図 1 ~ 4 に示す。OBS # 10 の 2 次サーチ結果には、観測値から計算される遅延が OBS # 9 と連続するように -1.2nsec のオフセット遅延を与えている。

表 1. 鹿島 3 4 - 臼田 6 4 基線「のぞみ」観測時刻

	OBS # 9	OBS # 10
開始時刻	2003/01/10 03:19:00 UT	2003/01/10 03:43:00 UT
終了時刻	2003/01/10 03:42:57 UT	2003/01/10 04:06:57 UT

OBS # 9

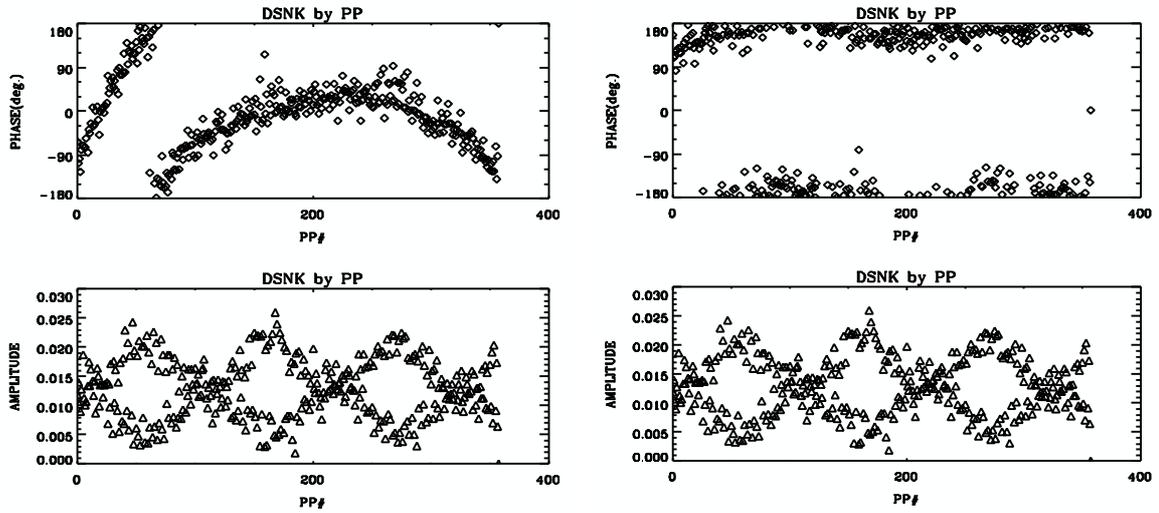


図 1 通常のフリッジサーチ結果 (PP 毎の位相と強度) (PP = 4 秒)

図 2 2 次までのフリッジサーチ結果

フリッジ強度に見られる 2 重正弦波構造は積分単位 4 秒と「のぞみ」のスピン周期 8 秒との僅かなずれによって生じるビートによるものである。

OBS # 10

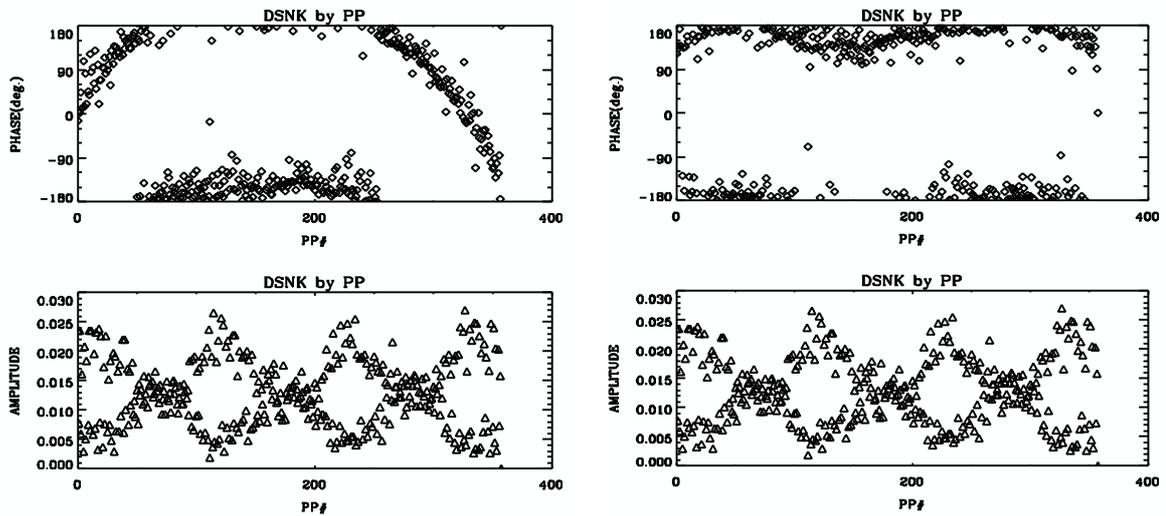
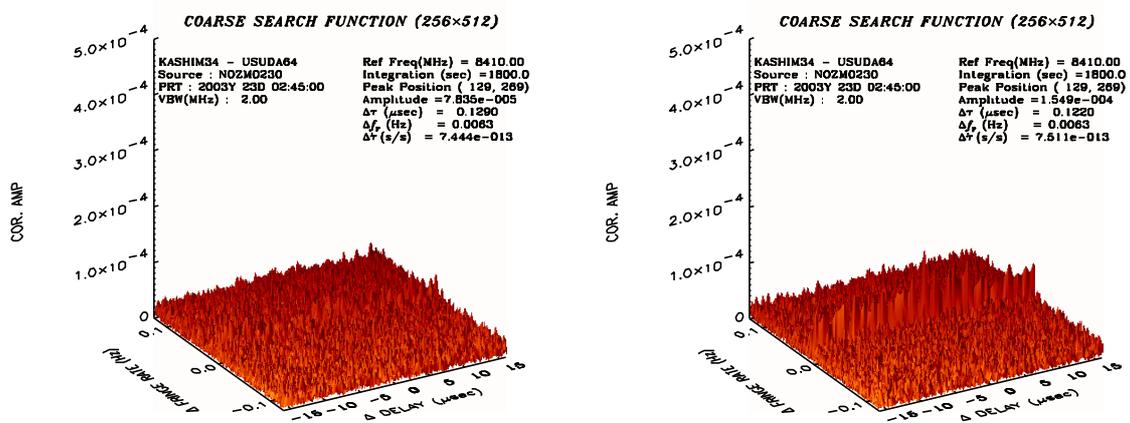


図 3 通常のフリッジサーチ結果 (PP 毎の位相と強度) (PP = 4 秒)

図 4 2 次までのフリッジサーチ結果。得られた予測値が前の観測と接続するように、-1.2nsec のオフセットを与えている

OBS # 9 と # 10 の位相は数 10 度以内でつながっている。

図5は、2次までのサーチにより信号帯雑音比が改善されることを示している。



2003/01/23 OBS#5 SNR=6.6445 PP=4sec

2003/01/23 OBS#5 SNR=13.1423 PP=4sec
(2次サーチ)

図5 2003年1月23日の「のぞみ」観測で得られたフリッジ(粗決定サーチ関数)。左(従来のサーチ)に比べて右(2次までのサーチ)では、SNRの顕著な改善が見られる。

5. 終わりに

今回開発したフリッジ位相変動の2次サーチ法は、実際の「のぞみ」観測において有効であることが示された。この手法は弱い電波源のフリッジ検出のみを目的とした電波天文目的の観測や安定度の劣る周波数標準で観測した場合のフリッジ検出にも威力を発揮するものと期待される。ただし、こうした観測を測地目的で使用するには、観測間のクロック情報をいかに精度良くつなげるかという問題は別途考慮する必要がある。