

平成 25 年度（2013 年度）

卒業論文

K5/VSSP32 サンプラーを用いた 日立局・高萩局干渉計観測

茨城大学理学部理学科物理学コース

10S2036N

加古琳一

概要

天文学は、1931年にカール・ジャンスキーが初めて天体からの電波の受信に成功したことをきっかけとして、現在では電波からガンマ線まで、ありとあらゆる波長帯での観測が行われている。電波による観測では、他の波長域では観測されないシンクロトロン放射や極低温の分子雲などが観測可能である。また、波長が長いと、固体微粒子やダストなどの影響を受けにくい。さらに、波の干渉性を用いた干渉技術が容易である。この干渉性を用いた観測法が干渉計である。

干渉計には主に二つの種類がある。まず、アンテナ同士がケーブルで接続されている結合素子型干渉計である。VLAやALMAなどがこれにあたる。この干渉計は、アンテナで受信した信号を直接相関器へ送るため、すぐに相関処理ができるが、基線長（アンテナ間の距離）に限度がある。ただし、ネットワーク網の進歩により、超高速ネットワークを利用した干渉計観測も行われている。次に、アンテナ同士が直接接続されていない超長基線干渉計（VLBI）である。VLBAやVERAなどがこれにあたる。この方法では、遠く離れたアンテナで同時に観測をする。受信信号を磁気テープなどの媒体に記録し、相関局で再生、相関処理を行う。オフラインで相関処理をするため、高精度な原子標準が必要となる。また、データを記録した媒体を相関局まで輸送しなければならないので、結果を得るまでに時間がかかってしまう。

現在、茨城大学では、日立市と高萩市にある口径32mの電波望遠鏡を運用している。それぞれ日立局、高萩局と呼ばれている。そこで、この2台の電波望遠鏡を用いて、活動銀河核など強度変動する連続波源の高感度モニター観測を目的とした結合型二素子干渉計の立ち上げと相関器の導入が進められている。口径32mの大型望遠鏡を用いた干渉計での連続波源のモニター観測はほとんど行われておらず、今後の研究に大きな影響をもたらすと考えられている。

目 次

1	序論	4
1.1	干渉計について	4
1.1.1	角度分解能の向上	4
1.1.2	感度の向上	4
1.1.3	地球大気の影響の除去	5
1.1.4	天体とアンテナの位置関係の高精度測定	6
1.2	研究の目的	7
2	観測、解析	8
2.1	観測諸元	8
2.2	解析方法	8
2.2.1	利用プログラム	8
2.2.2	手順	9
2.3	解析結果	10
2.3.1	2013 年 8 月 6 日の結果	10
2.3.2	2013 年 8 月 14 日の結果	14
3	考察、課題	18
3.1	考察	18
3.2	今後の課題	18
4	まとめ	19

1 序論

1.1 干渉計について

干渉計を用いた観測の特徴として、

- 高い角度分解能の実現
- 感度の向上
- 地球大気の影響の除去
- 天体とアンテナの位置関係の高精度測定

などがあげられる。

以下に簡単に説明する。

1.1.1 角度分解能の向上

望遠鏡が天体の微細構造を明らかにする能力を角度分解能といい、観測波長に比例し、アンテナの口径に反比例する。たとえば、口径 32m の望遠鏡で 6.7GHz の電波を観測するときの角度分解能は約 5 分角となる。そこで、電磁波が波の性質を持っていることを利用して、2 台のアンテナの受信信号を干渉させると、単一鏡でのビームパターンに相当する干渉縞が現れる。この干渉縞をフリンジという。フリンジの半値幅は観測波長に比例し、基線長 D に反比例するため、単一鏡では実現出来ないような高精度な角度分解能での観測が可能になる (図 1)。人工衛星を利用した干渉計も行われ、地球の直径の 3 倍の基線長が実現された。

干渉計は空間的に広がった天体の観測は苦手としているが、非常に短い基線長での干渉計や、単一鏡を基線長が 0 の干渉計として追加するなどして補われている。

1.1.2 感度の向上

電波望遠鏡の感度は、検出可能な最小フラックス密度であらわすことができる。信号の検出には、観測時の雑音揺らぎが信号に対して十分小さい必要がある。単一鏡観測の雑音揺らぎ量は、

$$\sigma_{\nu} = \frac{2kT_{\text{sys}}}{\eta A \sqrt{\Delta B \tau}} \quad (1)$$

となる。ここで、 k はボルツマン定数、 T_{sys} はアンテナ雑音温度、 η は開口能率、 A は開口面積、 ΔB は観測帯域幅、 τ は観測時間とする。

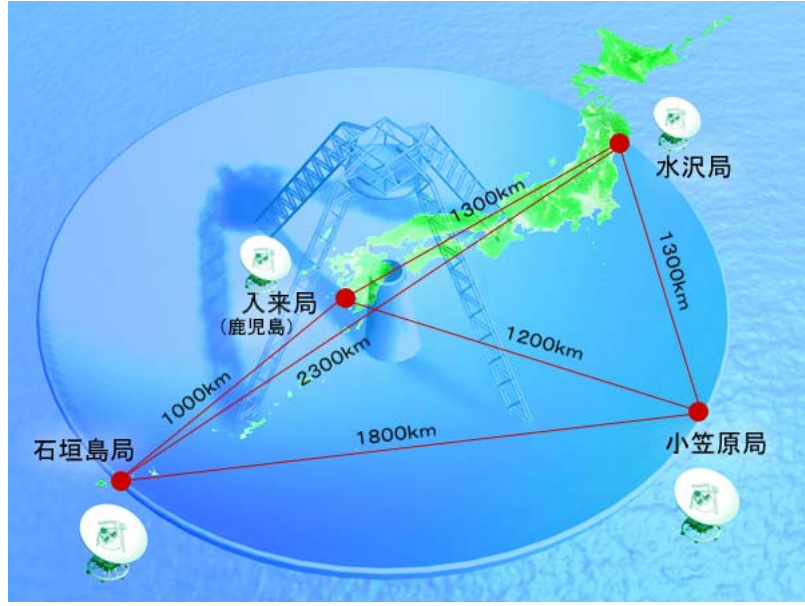


図 1: 単一鏡の口径と干渉計の基線の関係。VERA では、口径 2300km の単一鏡と同じ角度分解能が実現されている。[6]

n 素子の干渉計で観測を行うと、独立なデータ数は $\frac{n(n-1)}{2}$ 個になる。このとき、干渉計観測の雑音揺らぎ量は、

$$\sigma_\nu = \frac{2kT_{\text{sys}}}{\eta A \sqrt{\frac{n(n-1)}{2}} \Delta B \tau} \quad (2)$$

となる。ただし、それぞれ素子アンテナの開口能率と開口面積は一定とする。

素子数を増やせば、同じ観測時間でも得られるデータの量が増えるため、感度が向上する。また、像合成する際も、素子数が多ければ、像を正確に表すことが出来る。

1.1.3 地球大気の影響の除去

干渉計では、各アンテナでの受信信号を相関させ、そこから天体の強度分布を得る。2 台のアンテナの受信電圧をそれぞれ $V_1(t), V_2(t)$ とすると、

$$C(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} V_1(t) V_2(t + \tau) dt \quad (3)$$

を求める。ここで、 τ は遅延時間とする。この $C(\tau)$ を相互相関関数という。これをフーリエ変換した $\hat{C}(\nu)$ をクロススペクトルといい、空間周波数で書き表した $\mathcal{V}_\nu(u, v, w)$ をビジビリティという。ビジビリティは強度分布とフーリエ変換の関係にある。

式 (3) では、受信電圧の時間平均を取っている。天体などの放射が定常確率過程ならば、時間平均は期待値と等しくなるため、 $C(\tau) = \langle V_1(t)V_2(t+\tau) \rangle$ と表すことが出来る。

ここで、受信電圧を天体信号 V_S と雑音 V_N の和として $V_i(t) = V_{S,i}(t) + V_{N,i}(t)$ として式 (3) に当てはめると、

$$\begin{aligned} C(\tau) &= \langle [V_{S,1}(t) + V_{N,1}(t)] [V_{S,2}(t+\tau) + V_{N,2}(t+\tau)] \rangle \\ &= \langle V_{S,1}(t)V_{S,2}(t+\tau) \rangle \langle V_{S,1}(t)V_{N,2}(t+\tau) \rangle \langle V_{N,1}(t)V_{S,2}(t+\tau) \rangle \langle V_{N,1}(t)V_{N,2}(t+\tau) \rangle \\ &= \langle V_{S,1}(t)V_{S,2}(t+\tau) \rangle \end{aligned} \quad (4)$$

となる。この式で用いているように、大気放射などの雑音は天体信号や他アンテナの雑音とは相関しないため、雑音を除去することが出来る。ただし、雑音は相関関数の分散には影響し、感度を低下させる。

1.1.4 天体とアンテナの位置関係の高精度測定

上で述べたように、干渉計は各素子で相関を取り、強度分布を得ている。このとき、帯域幅内で強度が大きく変化しないような天体の相関関数は、ある遅延時間で鋭いピークを示す。この遅延時間は光路差を示しており、幾何学的遅延 τ_g といわれる。

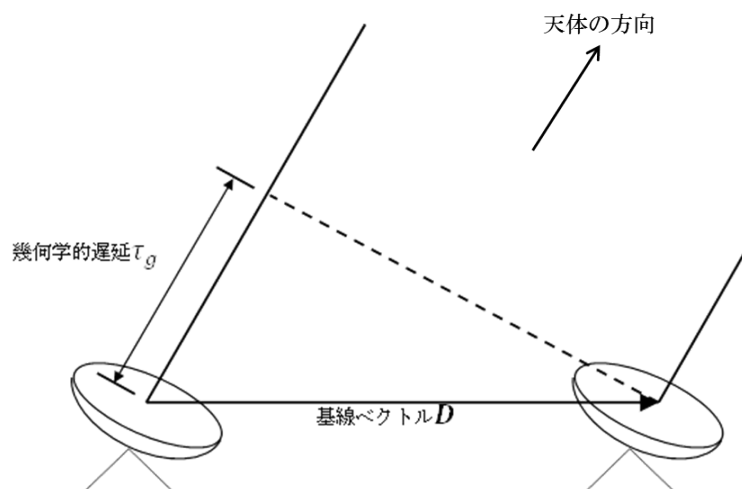


図 2: 天体、アンテナと幾何学的遅延の関係

幾何学的遅延をさまざまな基線で計測することで、天体の位置を測定することができる。また、天体の位置が既知ならばアンテナの位置を測定することができる。このような技術は測地 VLBI に応用されている。

ちなみに単色波に近いような線スペクトルの天体の相関関数は τ について振動し、 τ_g を最大として減衰していく。

1.2 研究の目的

本研究では、干渉計の仕組みを理解するとともに、相関器導入に際した参照データ取得を目的として、現時点で導入されている K5/VSSP32 サンプラーと付属の相関処理ソフトを用いて干渉計観測を行った。その結果、フリンジ強度の周期変動が観測されたため、追解析を行った。

2 観測、解析

2.1 観測諸元

観測天体と観測周波数、帯域幅、日時を表 1 に示す。また、観測を行ったアンテナについて表 2 に示す。

天体名	赤経	赤緯	観測周波数	帯域幅
3C273B	12h29m06.7s	+02°03'08''598	8448-8480MHz	32MHz
観測日	通日	時刻 JST	UT	備考
2013/08/06	218	12:15-12:16	03:15-03:16	
2013/08/14	226	09:00-18:00	00:00-08:50	一日追跡観測

表 1: 観測天体と観測周波数、帯域幅、観測日時

	口径	北緯	東経	標高	X 座標	Y 座標	Z 座標
日立局	32m	36°41'40''	140°41'44''	60m	-3961788.796	3243597.525	3790597.709
高萩局		36°41'43''	140°41'54''	77m	-3961881.647	3243372.513	3790687.466

表 2: アンテナ諸元。X,Y,Z 軸は地球重心を原点として、自転軸方向を Z 軸、グリニッジ子午線方向を X 軸、それらと直交し右手系になる方向を Y 軸とする。この座標系を地球固定基準座標系という。単位は m である。

8 月 14 日の観測は 10 分あけて 10 分間観測を繰り返した。日立局と高萩局の位置関係を図 3 に示す。2 局の距離は約 260m で、日立局からみた高萩局の方位角は約 70 度である。

2.2 解析方法

解析には K5/VSSP サンプラー用相関処理プログラム群を利用した。

2.2.1 利用プログラム

- apri.calc
天体の座標とアンテナの位置情報から遅延時間 τ とその変化率 $\dot{\tau}$ の予測値を求めるプログラム。
- fx_cor
apri.calc で出力された予測値ファイルとサンプリングファイルを基に、遅延時間の予測値付近での相関関数を求める。ⁱ

ⁱプログラム実行時に指定した総積分時間と、実際に計算され出力される総積分時間に差がある。出力ファイル内を less コマンドで見たところ、不自然な点 (数値の途中など) で出力が終わっているため、バグだと

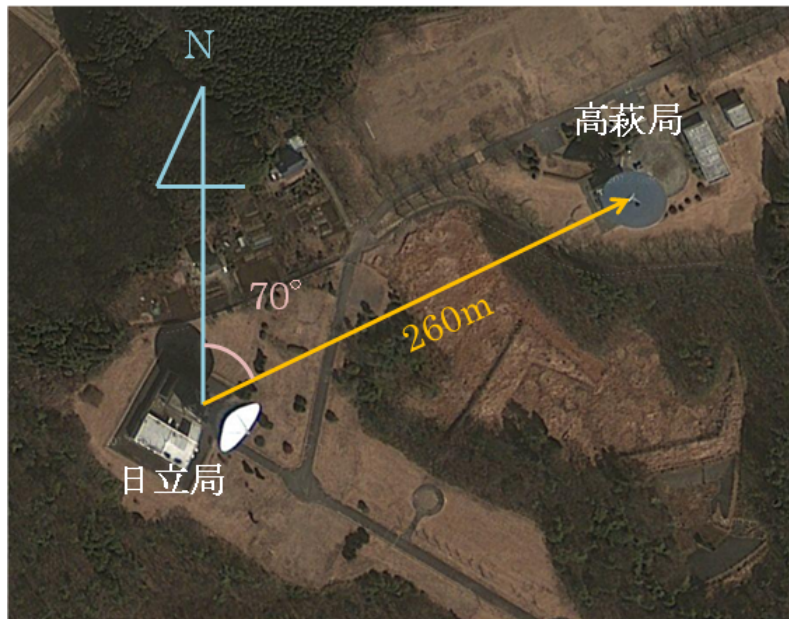


図 3: 日立局と高萩局の位置関係。Google map の画像を編集した。

- sdelay

fx_cor で得られたデータを用いて、相関関数が最大となる遅延時間残差 $\Delta\tau$ とその時間変化率 $\Delta\dot{\tau}$ を求める。この作業をフリンジサーチという。また、単位積分ごとのフリンジ位相と強度やビデオクロススペクトルのプロットを行う。

2.2.2 手順

まず、観測指示書 (skd ファイル) を引数として apri_calc を実行する。ファイルの命名側によっては、出力された予測値ファイル (ape ファイル) の中の、使用するサンプリングファイル名を変更しなければならないことがある。次に ape ファイルを引数として fx_cor を、総積分時間 integ=10 秒、単位積分時間 $t_{1pp}=0.2$ 秒程度で実行する。表示された相関関数のグラフの中心にピークがない場合、出力された相関処理ファイル (cout ファイル) を引数として sdelay を実行し、表示された遅延残差をクロックオフセットとして fx_cor を再実行する。相関関数のグラフの中にピークが見られない場合、ラグウィンドウサイズ lag の値を大きくして再実行する。ただし、lag の値は 2 の冪にする必要がある。

思われる。integ や t_{1pp} 、coffset (クロックオフセット) などの数値を変化させると出力の終了する点も変化するが、それらの値を変えずに実行すると、必ず同じ点で出力が終了する。なお、2014 年版では修正がされている。

2.3 解析結果

2.3.1 2013 年 8 月 6 日の結果

8 月 6 日のデータは、integ=60 秒で t_{1pp} の値を変化させつつ相関処理をした。 t_{1pp} とフリンジ強度、信号雑音比 SNR の関係を表 3 に示す。

t_{1pp}	Amp	SNR	integ#
0.01	強制的に $t_{1pp}=1.0$ とされた。		
0.02			
0.05	0.048367	2969.6	58.9
0.1	0.048348	2963.4	58.7
0.2	0.048345	2960.7	58.6
0.5	0.048377	2947.4	58.0
1.0	0.048385	2896.7	56.0
2.0	0.048576	2802.3	52.0
5.0	0.048861	2312.5	35.0

表 3: t_{1pp} とフリンジ強度、信号雑音比の関係。integ# は実際に出力が行われた総積分時間を表す。

ここで、SNR は

$$\text{SNR} = \text{Amp} \times \sqrt{2 \times \text{BAND} \times \text{integ\#}} \quad (5)$$

で計算されている。BAND は帯域幅を指す。

Amp は、最大の値と最小の値の差が 1% 程度なので、 t_{1pp} による有意な変化は無いと言ってよい。SNR の差は式 5 で示したように、実際に出力された総積分時間の違いによるものが大きい。

以下に $t_{1pp} = 0.05, 0.2, 1.0$ 秒としたときのフリンジサーチ、PP（単位積分）ごとのフリンジ強度と位相、ビデオクロススペクトルを示す。

CH#:1 8448.00MHz U 2bit 64MHz sampling
Source : 3C273B, Integ(sec)=58.9, PRT:2013/218 03:15:30
Amp = 0.048367, SNR = 2969.6 (no amp correction)
Delay Res (sec) : 1.974e-11 Rate Res(s/s) : -3.126e-13

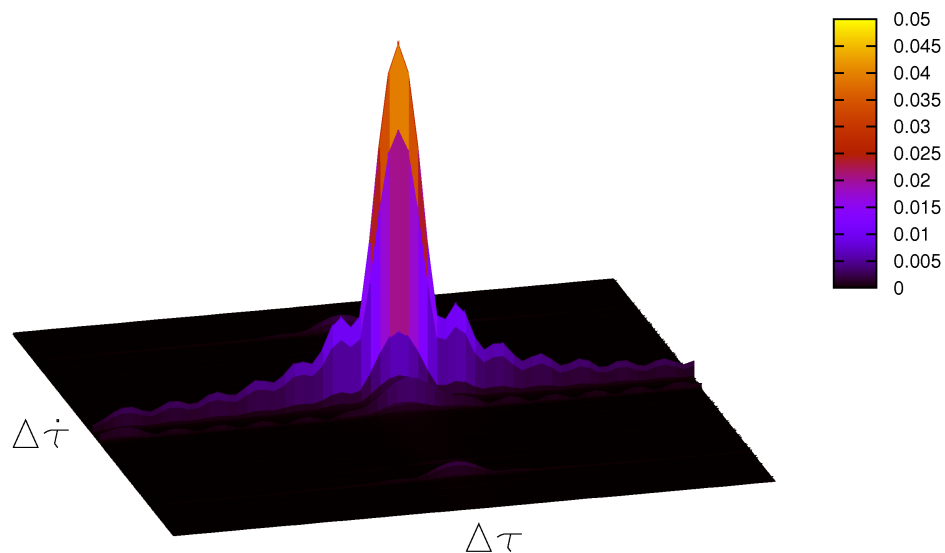


図 4: $t_{1pp} = 0.05$ 秒のフリンジサーチ

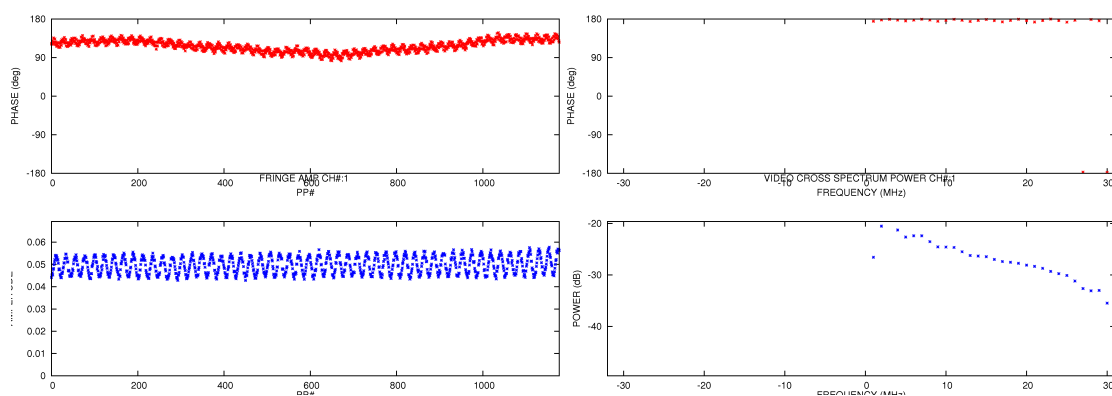


図 5: $t_{1pp} = 0.05$ 秒の PP ごとのフリンジ強度と位相

図 6: $t_{1pp} = 0.05$ 秒のビデオクロススペクトル

CH#:1 8448.00MHz U 2bit 64MHz sampling
Source : 3C273B, Integ(sec)=58.6, PRT:2013/218 03:15:30
Amp = 0.048345, SNR = 2960.7 (no amp correction)
Delay Res (sec) : 1.457e-11 Rate Res(s/s) : -3.165e-13

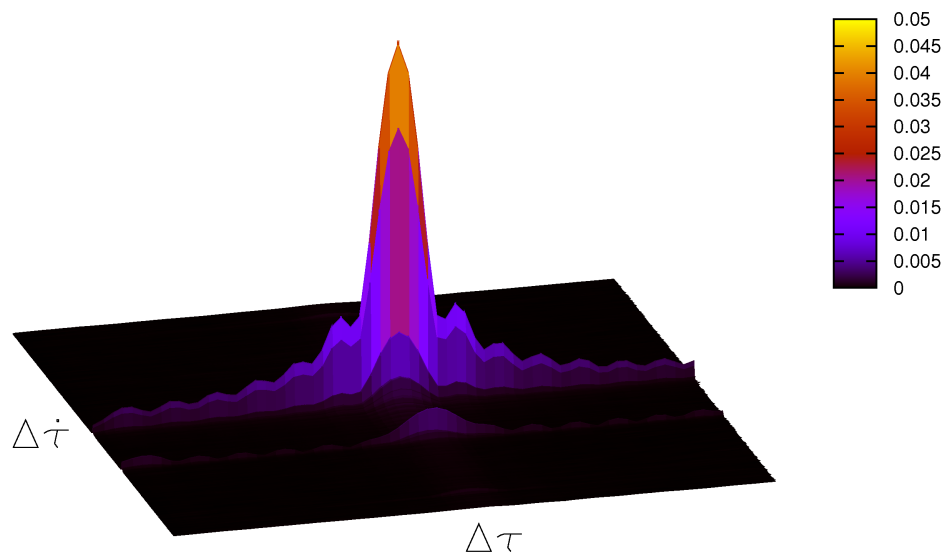


図 7: $t_{1pp} = 0.2$ 秒のフリンジサーチ

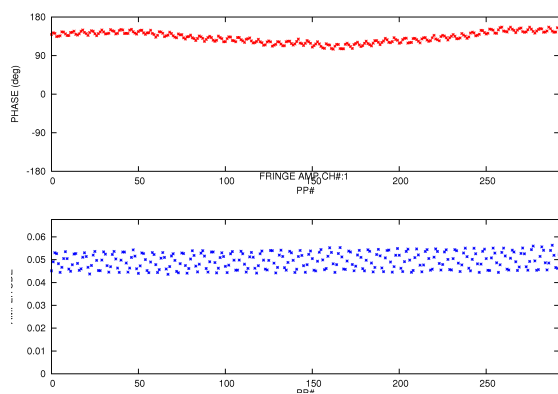


図 8: $t_{1pp} = 0.2$ 秒の PP ごとのフリンジ強度と位相

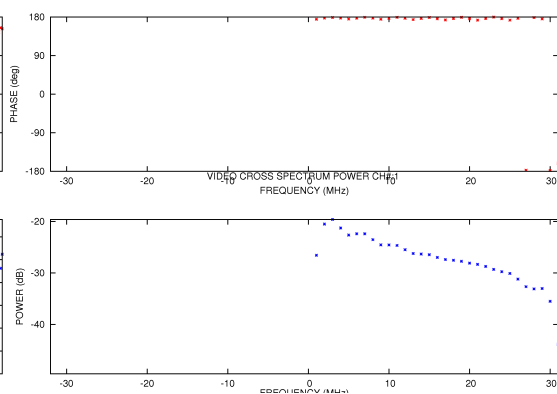


図 9: $t_{1pp} = 0.2$ 秒のビデオクロススペクトル

CH#:1 8448.00MHz U 2bit 64MHz sampling
Source : 3C273B, Integ(sec)=56.0, PRT:2013/218 03:15:30
Amp = 0.048385, SNR = 2896.7 (no amp correction)
Delay Res (sec) : 2.321e-12 Rate Res(s/s) : -3.480e-13

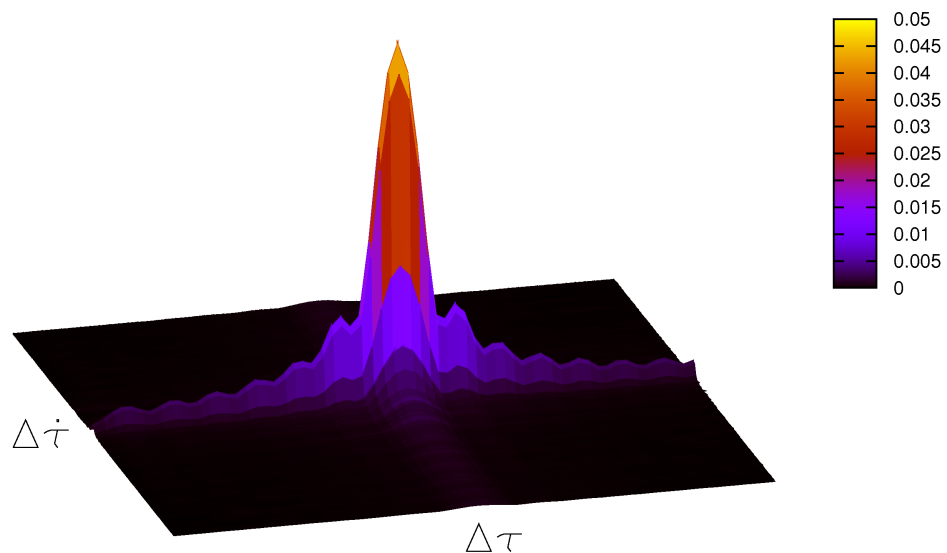


図 10: $t_{1pp} = 1.0$ 秒のフリンジサーチ

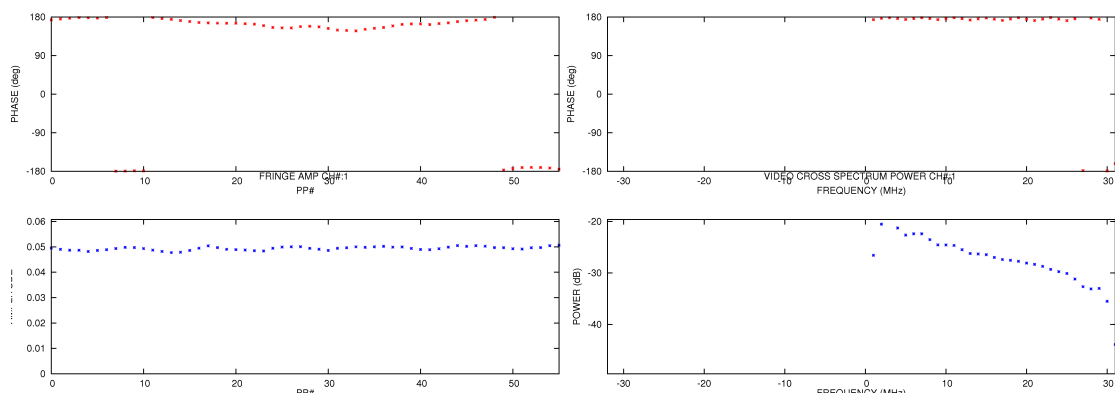


図 11: $t_{1pp} = 1.0$ 秒の PP ごとのフリンジ強度と位相

図 12: $t_{1pp} = 1.0$ 秒のビデオクロススペクトル

2.3.2 2013 年 8 月 14 日の結果

8 月 6 日のデータでは、PP ごとの強度が周期変動していた。そこで、8 月 14 日の一日追跡観測したデータを解析して、原因を探ることにした。

UT00:00 から 08:50 まで、10 分おきに 10 分間観測を繰り返し行われた。全データの相関処理には時間がかかるため、10 分観測の最初と最後の 1 分を相関処理した。ただし、仰角 $El < 15^\circ$ では障害物が映り込む可能性があるため、 $El < 15^\circ$ となる時間帯のデータは除外してある。

フリンジ強度の変動周期は、 t_{1pp} ごとの強度のグラフから、総積分時間内に何周期したかを数えて計算しているⁱⁱ (図 13)。fx_cor の実行は、すべて $integ=60$ 秒、 $t_{1pp}=0.05$ 秒で行った。

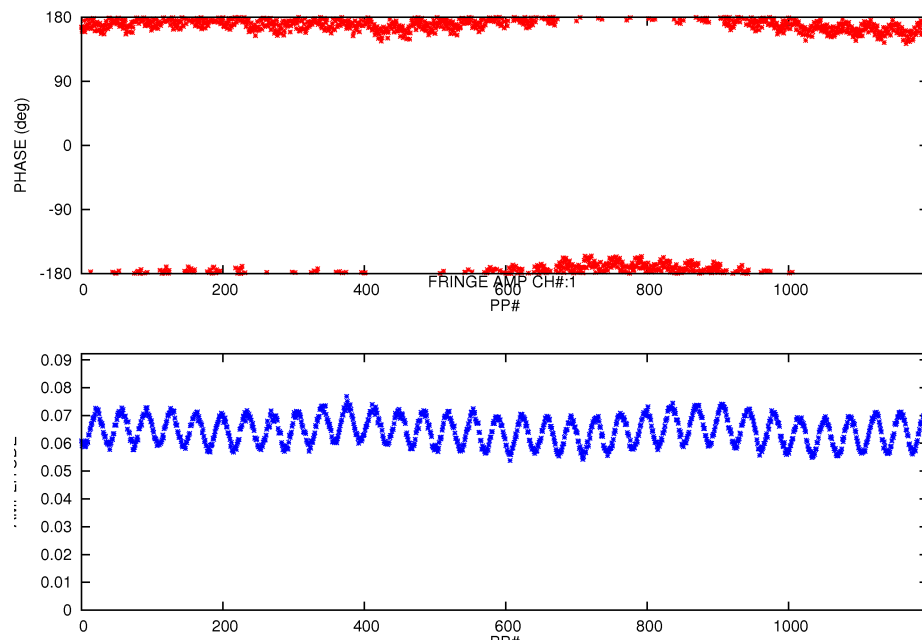


図 13: 00:45:23 - 00:46:23 までの、PP ごとのフリンジ位相と強度。総積分時間内の強度変動はおおよそ 33.5 周期である。

各時間での強度や信号雑音比、周期などを表 4 にまとめる。

表 4 を、縦軸を変動周期、横軸を方位角、仰角、通算秒としてプロットしたものが、それぞれ図 14、図 15、図 16 である。

ⁱⁱ この時の総積分時間は、実際に出力が行われた積分時間を用いている。範囲は 59.80-59.95 秒。

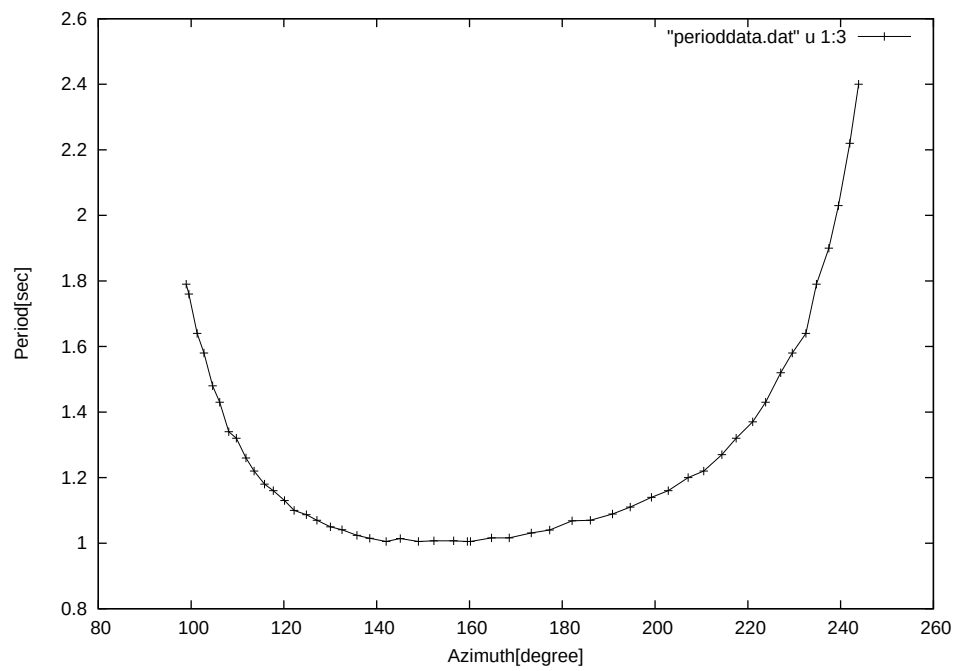


図 14: 方位角と変動周期の関係

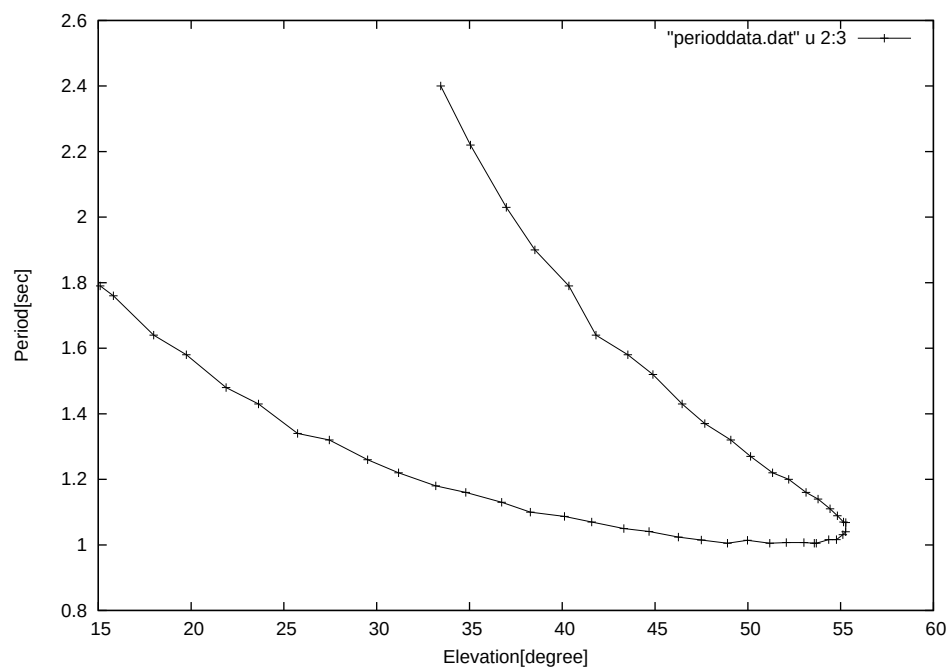


図 15: 仰角と変動周期の関係

Time	Start sec of day	Az	El	Amp	SNR	Period	Comments
00:45:23-00:46:23	2753	98.957	15.099	0.063373	3923.8	1.79	
00:49:00-00:50:00	2970	99.532	15.813	0.064100	3970.5	1.76	
01:00:00-01:01:00	3630	101.300	17.981	0.068073	4216.6	1.64	
01:09:00-01:10:00	4170	102.777	19.746	0.075251	4657.3	1.58	
01:20:00-01:21:00	4830	104.624	21.888	0.074764	4629.1	1.48	
01:29:00-01:30:00	5370	106.174	23.629	0.078141	4838.2	1.43	
01:40:00-01:41:00	6030	108.120	25.738	0.079466	4918.1	1.34	
01:49:00-01:50:00	6570	109.762	27.448	0.078515	4861.3	1.32	
02:00:00-02:01:00	7230	111.836	29.512	0.081266	5027.5	1.26	
02:09:00-02:10:00	7770	113.592	31.179	0.084399	5221.3	1.22	
02:20:00-02:21:00	8430	115.821	33.185	0.086991	5386.2	1.18	
02:29:00-02:30:00	8970	117.719	34.799	0.089577	5543.9	1.16	
02:40:00-02:41:00	9630	120.137	36.733	0.090002	5570.2	1.13	
02:49:00-02:50:00	10170	122.204	38.280	0.089504	5544.0	1.100	
03:00:00-03:01:00	10830	124.847	40.122	0.090419	5593.7	1.087	
03:09:00-03:10:00	11370	127.114	41.586	0.090478	5602.0	1.070	
03:20:00-03:21:00	12030	130.023	43.315	0.092265	5710.3	1.050	
03:29:00-03:30:00	12570	132.523	44.674	0.090560	5604.8	1.041	
03:40:00-03:41:00	13230	135.736	46.261	0.093467	5787.1	1.024	
03:49:00-03:50:00	13770	138.499	47.492	0.096935	6001.8	1.015	
04:00:00-04:01:00	14430	142.048	48.905	0.096555	5973.3	1.005	
04:09:00-04:10:00	14970	145.098	49.979	0.095877	5933.9	1.014	
04:20:00-04:21:00	15630	149.003	51.183	0.095117	5886.8	1.005	
04:29:00-04:30:00	16170	152.342	52.069	0.097947	6067.0	1.007	
04:40:00-04:41:00	16830	156.594	53.023	0.096193	5958.4	1.007	
04:47:25-04:48:25	17275	159.560	53.580	0.095344	5900.9	1.005	$\mathbf{D} \perp \mathbf{s}$
04:49:00-04:50:00	17370	160.203	53.690	0.093592	5790.0	1.005	
05:00:00-05:01:00	18030	164.755	54.355	0.099395	6156.7	1.016	
05:09:00-05:10:00	18570	168.575	54.733	0.097934	6066.2	1.016	
05:20:00-05:21:00	19230	173.334	55.121	0.094003	5815.4	1.031	
05:29:00-05:30:00	19770	177.276	55.270	0.094639	5854.8	1.040	
05:40:00-05:41:00	20430	182.112	55.281	0.091654	5670.1	1.068	南中 05:35:42
05:49:00-05:50:00	20970	186.057	55.153	0.089886	5565.4	1.070	
06:00:00-06:01:00	21630	190.826	54.828	0.088972	5508.8	1.089	
06:09:00-06:10:00	22170	194.657	54.430	0.091014	5632.8	1.11	
06:20:00-06:21:00	22830	199.227	53.785	0.091455	5657.8	1.14	
06:29:00-06:30:00	23370	202.852	53.136	0.094434	5849.4	1.16	
06:40:00-06:41:00	24030	207.126	52.202	0.091206	5647.1	1.20	
06:49:00-06:50:00	24570	210.484	51.330	0.091455	5664.9	1.22	
07:00:00-07:01:00	25230	214.412	50.144	0.090277	5587.3	1.27	
07:09:00-07:10:00	25770	217.481	49.083	0.089638	5550.0	1.32	
07:20:00-07:21:00	26430	221.055	47.683	0.089322	5525.8	1.37	
07:29:00-07:30:00	26970	223.837	46.462	0.092111	5700.8	1.43	
07:40:00-07:41:00	27630	227.072	44.887	0.090493	5605.3	1.52	
07:49:00-07:50:00	28170	229.589	43.536	0.092408	5723.9	1.58	
08:00:00-08:01:00	28830	232.517	41.818	0.091538	5665.3	1.64	
08:09:00-08:10:00	29370	234.801	40.360	0.090582	5603.8	1.79	
08:20:00-08:21:00	30030	237.461	38.526	0.093022	5762.0	1.90	
08:29:00-08:30:00	30570	239.541	36.984	0.092134	5699.8	2.03	
08:40:00-08:41:00	31230	241.973	35.056	0.090918	5629.3	2.22	
08:49:00-08:50:00	31770	243.882	33.447	0.090491	5605.2	2.40	

表 4: 各時間での解析結果。通算秒と AzEl はその時間の中心の値を記している。 $\mathbf{D}$ は基線ベクトルを、 $\mathbf{s}$ は天体の方向ベクトルを表す。

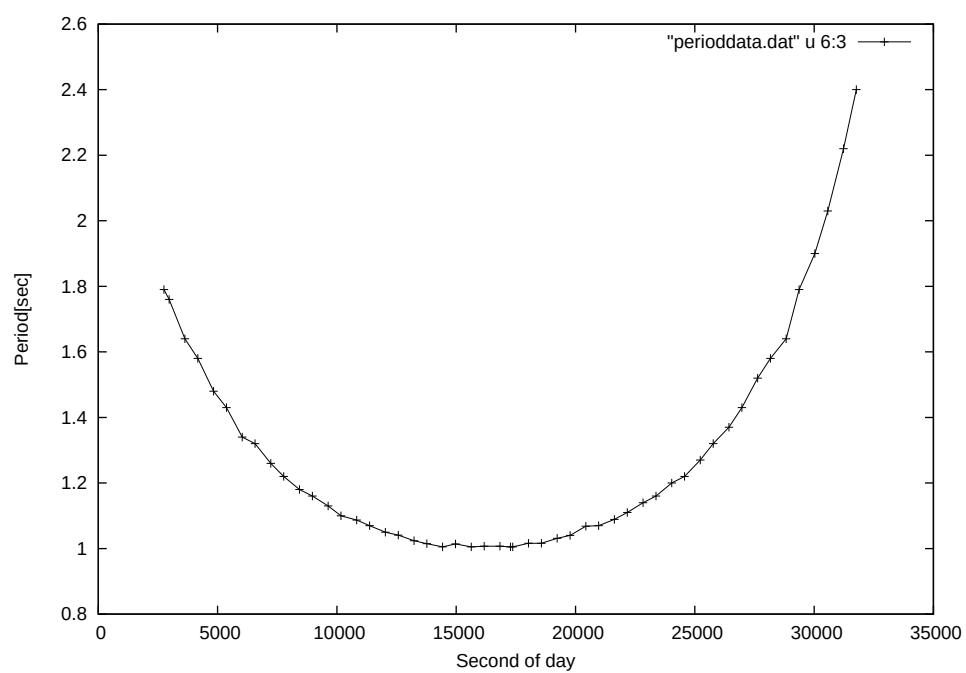


図 16: 通算秒と変動周期の関係

3 考察、課題

3.1 考察

今回の解析で、基線ベクトルと天体の方向ベクトルが直交する時間帯が、変動周期が最も短くなっていることがわかる。このとき、遅延時間の変化率が最大になる。そのため、この周期変動はフリンジ周波数に関係していることが予想される。

ここで、フリンジ周波数 f_r は

$$f_r = \nu_{LO} \dot{\tau}_g \quad (6)$$

と表される。ただし、 ν_{LO} は LO 周波数、 $\dot{\tau}_g$ は幾何学的遅延時間の変化率である。 $\dot{\tau}_g$ の最大値は、基線長 D と地球の自転角速度 ω_e を用いて

$$\dot{\tau}_{g\max} = \frac{D}{c} \omega_e \quad (7)$$

とあらわされる。これを日立-高萩干渉計で 8GHz での観測に当てはめると、 $f_{r\max} \sim 0.4\text{Hz}$ となり、周期にすると約 2.4 秒となる。そのため、変動周期が 1 秒から 2 秒となる今回のケースは、フリンジ周波数のみで説明することが出来ない。

幾何学的遅延時間は、基線ベクトルと天体の方向ベクトルが平行になった時に最大となり、

$$\tau_{g\max} = \frac{D}{c} \quad (8)$$

と表せる。日立-高萩干渉計での幾何学的遅延とその変化率の最大値はそれぞれ約 $8.83 \times 10^{-7}\text{sec}$ 、 $6.42 \times 10^{-11}\text{sec/sec}$ である。どちらも非常に小さい値のため、機械的なエラーが出ている可能性も考えられる。

他の要因として、天体自体の強度変動、観測パラメータの不備、解析時の設定の不備などが予想される。

3.2 今後の課題

今回の解析では、相関関数の周期変動の原因を特定することは出来なかった。

今後は他の周波数帯や他の天体の観測、可能ならば他の望遠鏡との干渉計観測を行って原因の特定をする。また、相関関数の周期変動が、観測結果にどのような影響を与えているのかを考察する。

4 まとめ

日立局-高萩局二素子干渉計の相関器導入に際して、現時点で導入されている相関システムである K5/VSSP32 型サンプラーを用いて干渉計観測を行った。2013 年 8 月 6 日に 3C273B を 1 分間観測し、K5/VSSP32 型サンプラー用相関処理プログラムを用いて解析を行ったところ、単位積分ごとに相関強度が変化し、周期変動していることがわかった。そこで、2013 年 8 月 14 日に同天体を一日追跡観測をし、同様に相関処理を行った。相関強度の変動周期が仰角及び方位角に依存していることがわかったが、周期変動の原因の特定には至らなかった。

謝辞

本論文を作成するにあたり、ご指導いただきました百瀬教授、米倉准教授に感謝いたします。また、議論を通じでご指摘いただきました研究員の古川さん、宮本さん、電波天文学研究室の皆様に感謝いたします。

解析をするにあたり、NICT の K5/VSSP 用相関処理ソフトウェアを使用させていただきました。感謝いたします。

参考文献

- [1] 中井直正ほか編『宇宙の観測Ⅰ—電波天文学 シリーズ現代の天文学 16 巻』日本評論社、2009
- [2] 高橋富士信ほか『VLBI 技術』1997
- [3] George B. Rybicki, Alan P. Lightman "Radiative Processes in Astrophysics" Wiley-VCH 1985
- [4] A.R.Thompson et al. "Interferometry and Synthesis in Radio Astronomy, Second Edition" Wiley-VCH 2001
- [5] NICT K5/VSSP VLBI SYSTEM
<http://www2.nict.go.jp/aeri/sts/stmg/K5/VSSP/index.html>
- [6] 国立天文台 VERA <http://veraserver.mtk.nao.ac.jp/index-J.html>
- [7] JAXA 宇宙科学研究所 電波天文グループ
<http://wwwj.vsop.isas.jaxa.jp/>
- [8] 国立天文台編『干渉計サマースクール 2005 教科書』
http://milkyway.sci.kagoshima-u.ac.jp/~kamenno/SS2005_TextPDF/SS2005text_050730.pdf
- [9] 藤沢健太 『宇宙電波の観測』
<http://www.astro.sci.yamaguchi-u.ac.jp/~kenta/radioastro/radioastro-2.pdf>