

山口日立基線による スイッチング位相補償観測の実証試験

VLBI懇談会シンポジウム2020

兵藤克樹(山口大学M1), 藤沢健太

山口日立基線による 系内ブラックホールの探査



~2019 高輝度なコンパクト電波源探査

- ・高輝度な系内ブラックホールや背景AGNを選択的に検出するため銀河中心方向に対し山口日立基線による非撮像のVLBI観測を実施した。

⇒16天体の系内ブラックホール候補天体を検出

2020~ 固有運動観測

- ・検出した16天体に対し、背景AGNには無い固有運動を検出できれば、系内ブラックホールである決定的証拠となる。
- ・銀河中心の天体の場合、5.5 mas/yr 程度の固有運動が推定される。数masの位置決定精度が必要であり、VLBIによる位置観測が有効である。

VLBIによる天体位置観測

幾何学的遅延 τ_g を正確に決定すれば
 既知の基線ベクトル D から
 天体の方向ベクトル s を求められる

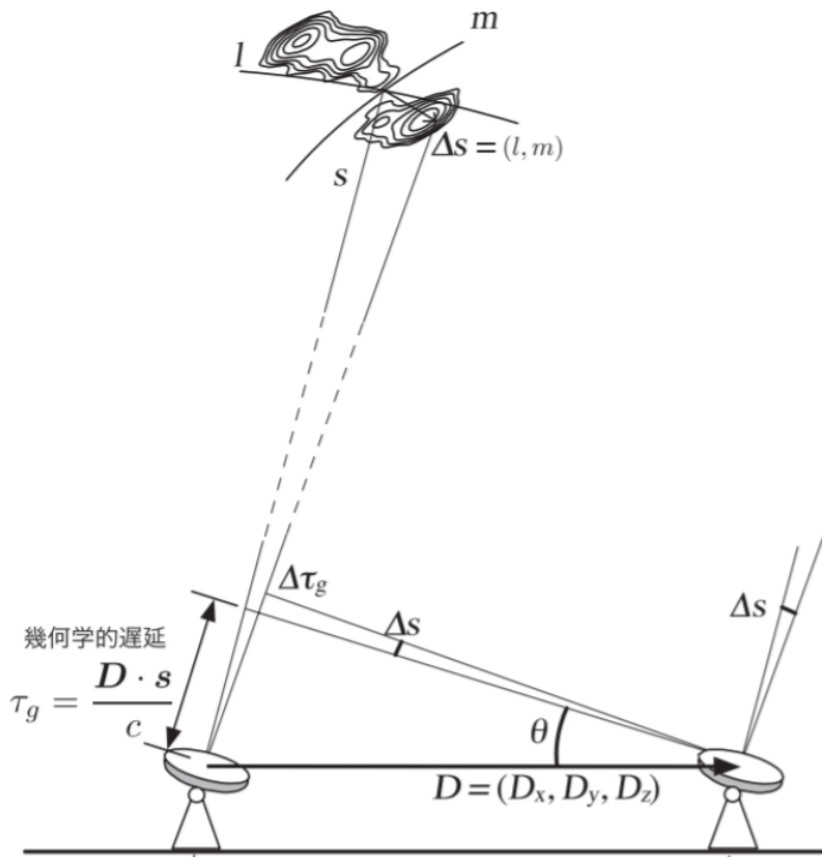


図1: 干渉計の原理
 干渉計サマースクール2005

大気などにより遅延誤差 $\Delta\tau$ が存在するとき
 見かけの天体位置ベクトルを s' とする

$$\tau_g + \Delta\tau = \frac{D \cdot s'}{c}$$

$$\Delta\tau = \frac{D \cdot (s' - s)}{c} = \frac{D \cdot \Delta s}{c}$$

天体位置の測定精度 Δs は

$$\Delta s = \frac{c \Delta \tau}{D}$$

目標精度2 mas、基線長873 km (山口-日立)
 必要な遅延時間の決定精度は

$$\Delta\tau = 2.82 \times 10^{-11} \text{ s}$$

大気の水蒸気成分の揺らぎによる
 遅延時間の誤差が $\sim 10^{-9}$ s程度で影響する。



スイッチング位相補償観測によって取り除く

スイッチング位相補償観測

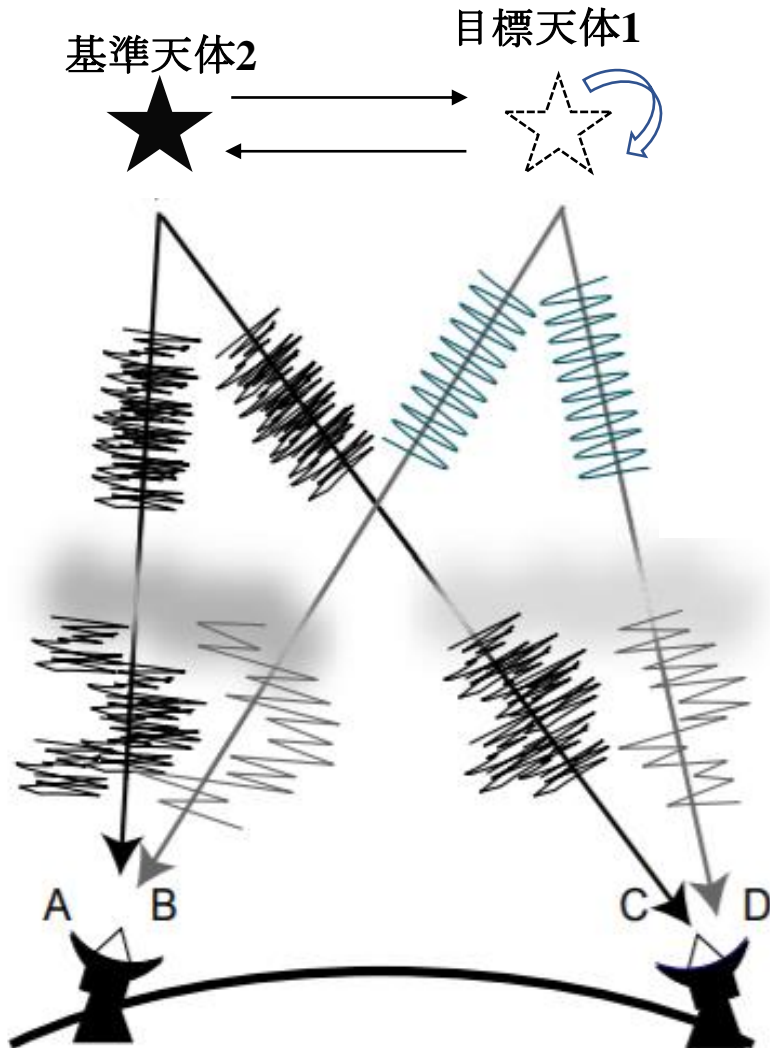


図2: スwitchング位相補償観測の原理

目標天体と位置が既知の基準天体を
高速で交互に観測し、大気の揺らぎを共通化

$$\tau_1' = \frac{D \cdot s_1}{c} + \tau_{\text{atm}} \quad \tau_2' = \frac{D \cdot s_2}{c} + \tau_{\text{atm}}$$

差を取ると遅延残差から天体の相対位置を得る

$$\Delta\tau_{21} = \frac{D \cdot (s_2 - s_1)}{c}$$

山口・日立での観測例が無い
課題

- 大気が安定しているか?
- 風速、水蒸気成分の変化
- 揺らぎを共通化できる観測間隔を実現する
アンテナの駆動速度はあるか?
- ソフトウェア相関器GICO3にて処理が可能か?

⇒実証試験を行う必要がある

実証試験の概要

スイッチング位相補償観測に関する次の2つの実証試験を行った

① データ実験

山口日立にて観測したNRAO530のデータに対し天体位置の変動を仮定した相関処理を行い位相差を求めた。これを理論的に算出した位相差と一致するか比較した。位相差は天体の座標、変位、アンテナの局位置、観測時刻から計算される。

② 試験観測

位置精度の高い電波カタログICRF3より以下のペアを選出し、スイッチング観測で実際に既知の相対位置を得ることができるか実証する。

表: 試験観測に選出した天体ペア

	備考	離角 degree	天体名	赤経			赤緯			フラックス密度(band) Jy
				h	m	s	d	m	s	
ペア1	条件良し	0.309157	NRAO512	16	40	29.6327718	39	46	46.02850331	5.082 (U-band)
			3C345	16	42	58.81003402	39	48	36.99954058	0.756 (X-band)
ペア2	暗め	0.975970	J023838.9+163659	2	38	38.93010450	16	36	59.2745528	0.242 (Q-band)
			J024224.2+174258	2	42	24.26826371	17	42	58.8491818	0.204 (X-band)
ペア3	低赤緯	0.607256	J170053.1-261051	17	0	53.15406418	-26	10	51.7253944	1.704 (X-band)
			J172155.9-255840	17	21	55.97914608	-25	58	40.6931367	0.218 (X-band)

実証試験 ①データ実験

天体の変動を仮定した相関処理

天体の固有運動により観測点と実際の天体位置にわずかにずれがあった場合、相関処理に影響する。そこで、天体位置の変動による相関処理への影響を検証するため、相関処理に使用する天体座標にオフセットを与えることで変動を仮定しデータ実験を行った。

正しい位置の相関処理スケジュール

```
<!-- ##### Station clock ##### -->
<clock key= 'K' >epoch> 2020/143 14:54:00</epoch><delay>+0.0e+00</delay><rate>+0.0e+00</rate></clock>
<clock key= 'H' >epoch> 2020/143 14:54:00</epoch><delay>-9.193445965216e-06</delay><rate>-2.61363884e-12</rate></clock>
<!-- ##### -->

<!-- ##### Source coordinate ##### -->
<source name= 'NRA0530' >ra>17h33m 2.706113</ra><dec>-13d04' 49.5482</dec></source>
<!-- ##### -->
```

赤経方向に10sのずれを仮定した相関処理スケジュール

```
<!-- ##### Station clock ##### -->
<clock key= 'K' >epoch> 2020/143 14:54:00</epoch><delay>+0.0e+00</delay><rate>+0.0e+00</rate></clock>
<clock key= 'H' >epoch> 2020/143 14:54:00</epoch><delay>-9.193445965216e-06</delay><rate>-2.61363884e-12</rate></clock>
<!-- ##### -->

<!-- ##### Source coordinate ##### -->
<source name= 'NRA0530' >ra>17h33m 3.37245</ra><dec>-13d04' 49.5482</dec></source>
<!-- ##### -->
```

赤経方向に5masのずれ(固有運動の大きさを仮定)を仮定し相関処理スケジュール

```
<!-- ##### Station clock ##### -->
<clock key= 'K' >epoch> 2020/143 14:54:00</epoch><delay>+0.0e+00</delay><rate>+0.0e+00</rate></clock>
<clock key= 'H' >epoch> 2020/143 14:54:00</epoch><delay>-9.193445965216e-06</delay><rate>-2.61363884e-12</rate></clock>
<!-- ##### -->

<!-- ##### Source coordinate ##### -->
<source name= 'NRA0530' >ra>17h33m 2.70578</ra><dec>-13d04' 49.5482</dec></source>
<!-- ##### -->
```

図4: データ実験に用いた相関処理スケジュールファイル。DelayとRateは同じ値で相関処理。

天体の変動を仮定した場合の相関処理結果

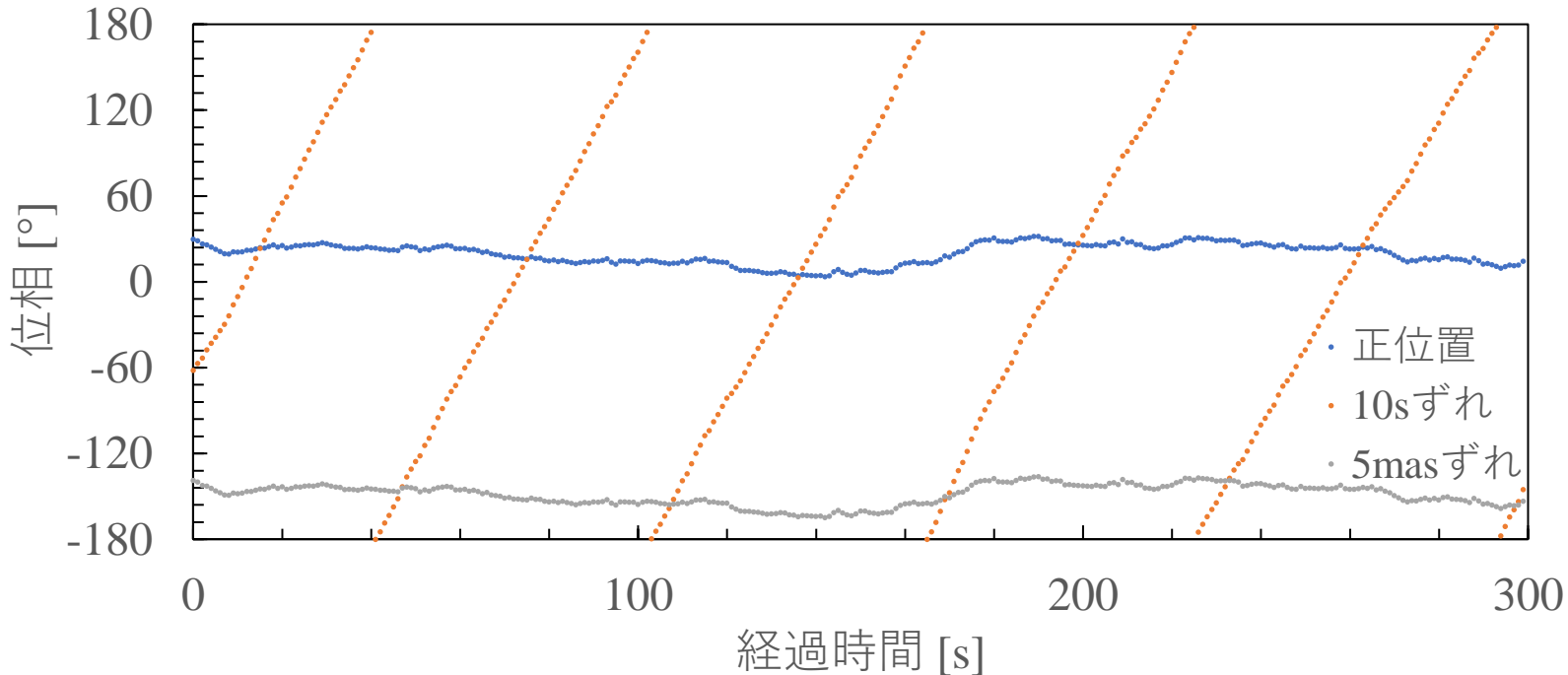


図5: 図4の相関処理スケジュールで相関処理を行ったときの位相の時間変化。正しい位置の位相(青)、赤経方向に10sの変動を仮定した場合の位相(赤)、赤経方向に5masの変動を仮定した場合の位相(灰)

- 赤経方向に10sのずれを仮定した場合、delayの増加によって高速で位相が回転する結果が得られた。
- 次に、正しい位置の位相と差をとり、理論計算される位相差と比較した。

実証試験 ①データ実験

位相の理論計算方法

赤経 α 、赤緯 δ の天体を観測するとき、天体方向を n 、東西に l 、南北に m をとる座標系を考える。
天体の方向ベクトル \mathbf{s} は

$$\begin{pmatrix} l \\ m \\ n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

基線ベクトル \mathbf{D} を地球固定座標系(X, Y, Z)から天体の方向の座標系に回転する。
 θ は観測時刻のGSTより $\theta = \text{GST} - \alpha$

$$\begin{pmatrix} u \\ v \\ w \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ -\cos \theta \sin \delta & \sin \theta \sin \delta & \cos \delta \\ \cos \theta \cos \delta & -\sin \theta \cos \delta & \sin \delta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} D_X \\ D_Y \\ D_Z \end{pmatrix}$$

幾何学的遅延 τ_g は

$$\tau_g = \frac{1}{c} \mathbf{D} \cdot \mathbf{s} = \frac{w}{c}$$

位相 ϕ は観測周波数 ν 、観測波長 λ を用いて

$$\phi = 2\pi\nu\tau_g = \frac{2\pi w}{\lambda}$$

実証試験 ①データ実験

位相差の理論計算方法

赤経 $\Delta\alpha$ 、赤緯 $\Delta\delta$ の天体位置の変位があるとき、天体の方向ベクトル \mathbf{s}' は

$$\mathbf{s}' = \begin{pmatrix} \Delta\alpha \cos \delta \\ \Delta\delta \\ \sqrt{1 - (\Delta\alpha \cos \delta)^2 - (\Delta\delta)^2} \end{pmatrix} \approx \begin{pmatrix} \Delta\alpha \cos \alpha \\ \Delta\delta \\ 1 \end{pmatrix}$$

このときの遅延時間 τ_g' と遅延時間のずれ $\Delta\tau_g$ は

$$\tau_g' = \frac{1}{c} \mathbf{D} \cdot \mathbf{s}' = \frac{1}{c} (u\Delta\alpha \cos \delta + v\Delta\delta + w)$$

$$\Delta\tau_g = \tau_g' - \tau_g = \frac{1}{c} (u\Delta\alpha \cos \delta + v\Delta\delta)$$

位相差 $\Delta\phi$ は

$$\Delta\phi = 2\pi\nu\Delta\tau_g = \frac{2\pi}{\lambda} (u\Delta\alpha \cos \delta + v\Delta\delta)$$

実証試験 ① データ実験

相関処理結果と理論計算結果の比較

図6: 赤経方向に10sのずれの位相差

※10sずれの結果について位相の回転は補正した

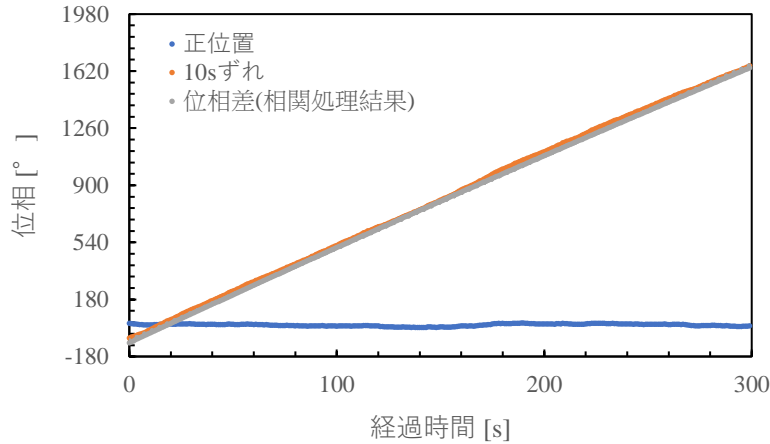


図7: 赤経方向に5masのずれの位相差

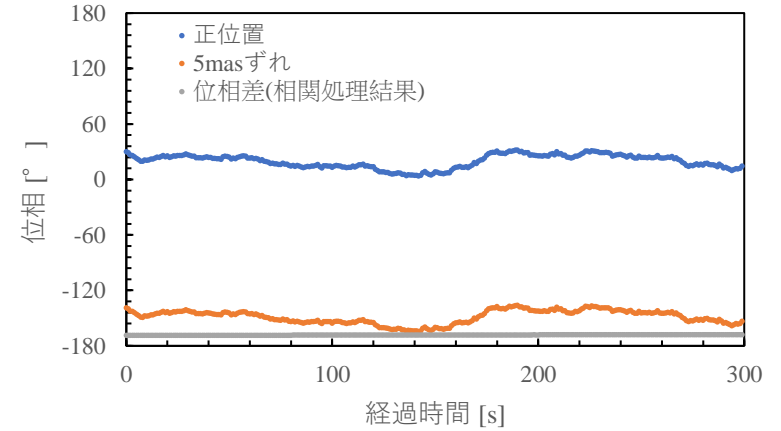
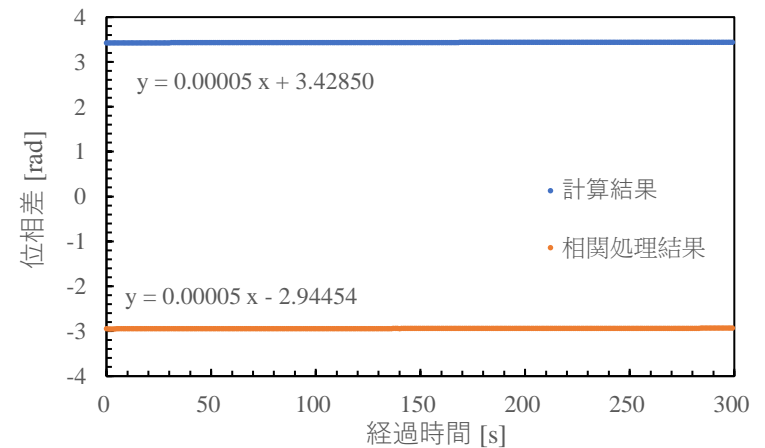
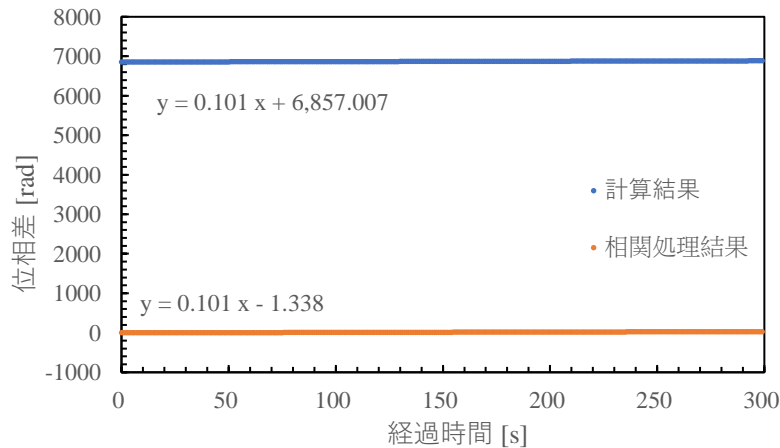


図8: 相関処理結果の位相差と計算結果の位相差の比較(左: 10sのずれ, 右: 5masのずれ)



相関処理結果と計算結果で位相差の時間に対する変化率が一致することが確認された。

実証試験 ①データ実験

相関処理結果から変位の導出

相関処理結果から天体の変位を推定するために位相差の理論式を相関処理結果と比較できる時間の関数に変形した。

観測時間内のGSTを時間に対して線形近似する。

$$GST = 7.29 \times 10^{-5}t + 1.82 \text{ [rad]}$$

$$\theta = GST - \alpha = 7.29 \times 10^{-5}t - 2.78 = at + b \text{ [rad]}$$

基線ベクトルに $\theta = at + b$ を用いて時間の関数に展開

$$u = D_x \sin \theta + D_y \cos \theta$$

$$= D_x \sin(at + b) + D_y \cos(at + b)$$

$$= D_x(\sin at \cos b + \cos at \sin b) + D_y(\cos at \cos b - \sin at \sin b)$$

$$v = -D_x \cos \theta \sin \delta + D_y \sin \theta \sin \delta + D_z \cos \theta$$

$$= -D_x \sin \delta (\cos at \cos b - \sin at \sin b) + D_y \sin \delta (\sin at \cos b + \cos at \sin b) + D_z (\cos at \cos b - \sin at \sin b)$$

$at \ll 1$ より $\sin at \sim at$, $\cos at \sim 1$ を用いて整理する

$$u = (D_x \cos b - D_y \sin b)at + (D_x \sin b + D_y \cos b)$$

$$= u_1 at + u_2$$

$$v = (-D_x \sin b \sin \delta + D_y \cos b \sin \delta - D_z \sin b)at + (-D_x \cos b \sin \delta + D_y \sin b \sin \delta + D_z \cos b)$$

$$= v_1 at + v_2$$

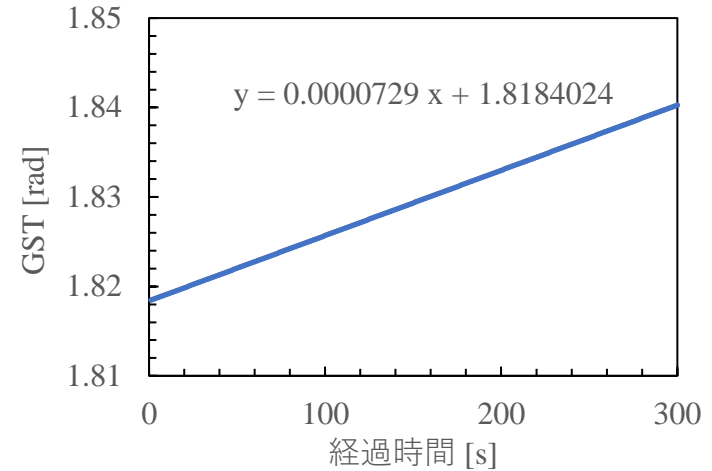


図9: GSTの変化率。国立天文台暦計算室で観測時間内のGSTを毎秒出力し線形近似

実証試験 ①データ実験

相関処理結果から変位の導出

時間の関数として表した基線ベクトルで遅延時間のずれ、位相差を求める

$$\begin{aligned}\Delta\tau_g &= \frac{1}{c} (u\Delta\alpha \cos \delta + v\Delta\delta) \\ &= \frac{1}{c} \{(u_1\Delta\alpha \cos \delta + v_1\Delta\delta)at + (u_2\Delta\alpha \cos \delta + v_2\Delta\delta)\}\end{aligned}$$

$$\Delta\phi = \frac{2\pi\nu}{c} \{(u_1\Delta\alpha \cos \delta + v_1\Delta\delta)at + (u_2\Delta\alpha \cos \delta + v_2\Delta\delta)\}$$

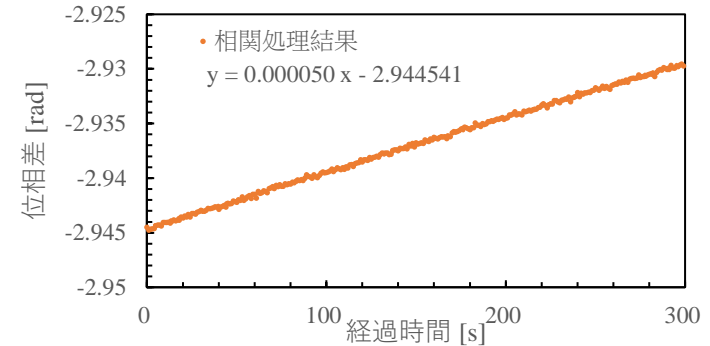


図10: 正しい位置と5masの変動を仮定し相関処理したときの位相差

位相差が相関処理結果と一致する時間に対する1次関数として表せた

相関処理結果の係数と比較し、観測時のパラメーターで数値計算を行うと

$$0.000050 = \frac{2 \times 3.1415 \times 8.4 \times 10^9}{299792458} \times 177359.7 \times \Delta\alpha \times 0.974 \times 7.29 \times 10^{-5}$$

$$\begin{aligned}\Delta\alpha &= 2.255 \times 10^{-8} \text{ [rad]} \\ &= 4.651 \text{ [mas]}\end{aligned}$$

仮定した変位は5masであり、近似の過程で差が生じたと考えられる。
2方向の変位を決定する方法、近似の精度など改善は必要である。

実証試験 ②試験観測 観測概要

試験観測としてNRAO512と3C345をスイッチング観測した。

両天体は

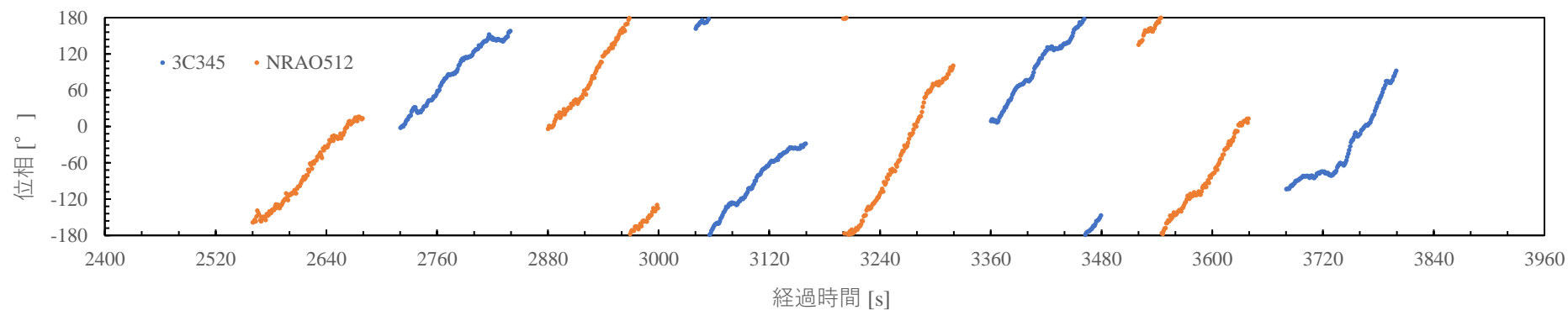
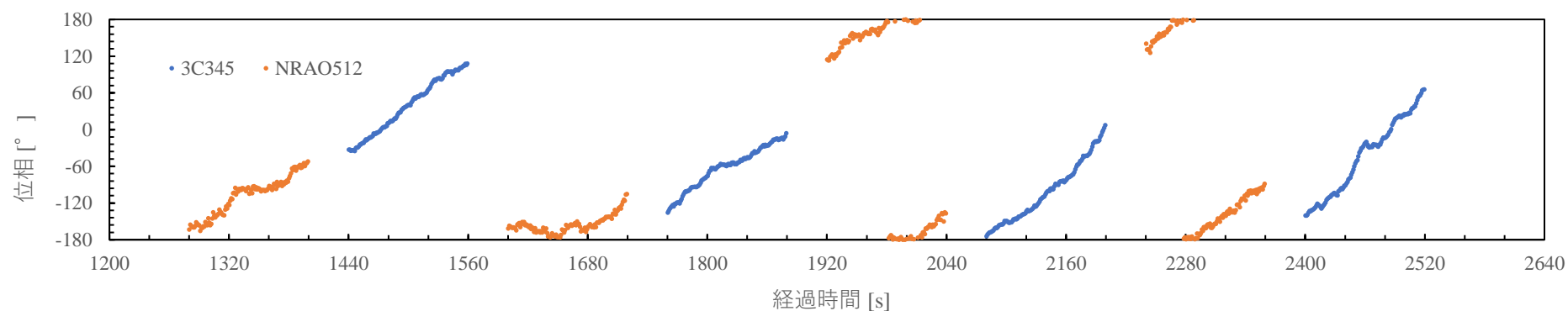
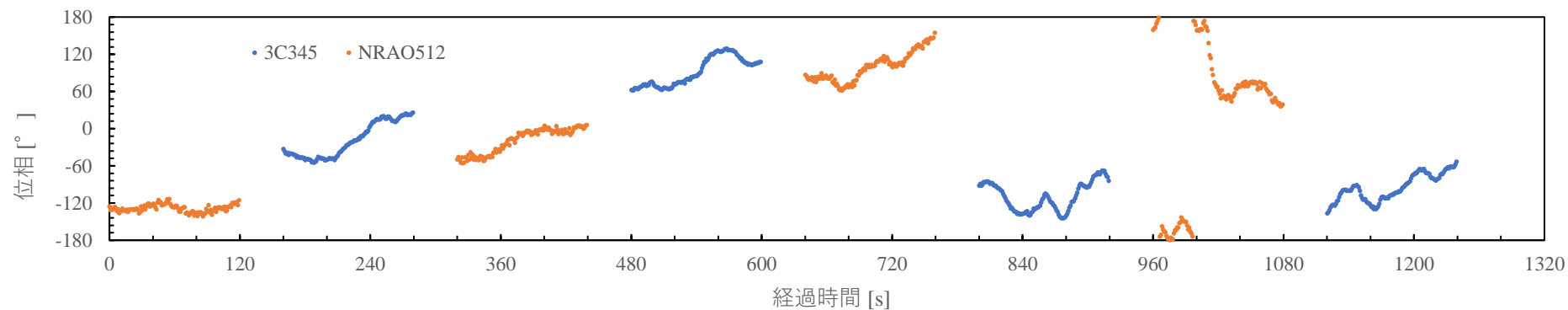
- (1) 離角が小さい(高速でスイッチング可能)
- (2) 非常に明るい
- (3) VERAの2ビーム位相補償の例あり

⇒位相補償観測の実証試験に好条件な天体ペアである。

スイッチング位相補償実証観測 U20277A

観測日時 (UT)	2020/10/3 1:00-4:54
天体ペア	NRAO512 (16h 40m 29.632s +39d 46m 46.028s) 3C345 (16h 42m 58.810s +39d 48m 36.999s)
離角	0.31 °
積分時間	120 s
スイッチング間隔	40 s
回数	12周期×3セット
天気 (山口, 日立)	曇り, 曇り
T _{sys} [K] (山口, 日立)	49→48, 28→24

実証試験 ②試験観測 観測結果: 位相の時間変化



実証試験 ②試験観測 相関処理結果の考察

- DelayとRateの較正は初めのスキャンで行い、全てに同じオフセットを与えた。
- 後半、位相の回転が大きくなったのはDelayの増加によるものと考えられる。
- DelayとRateの較正を修正し、オフセットの与え方を改善する必要がある。

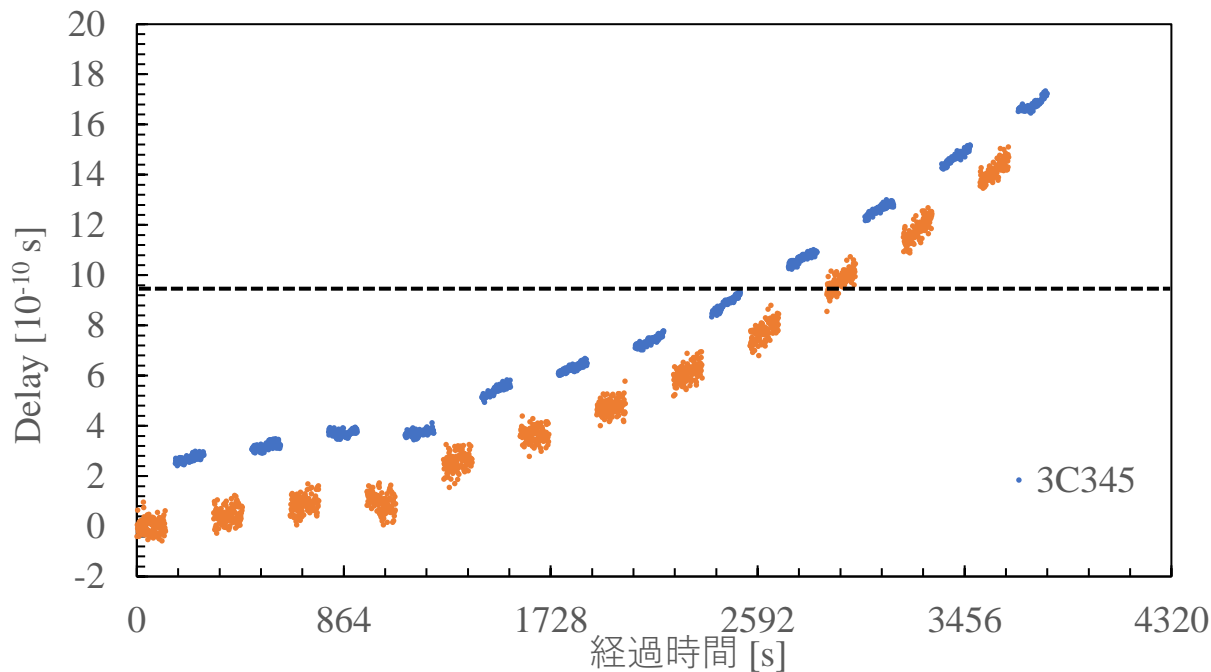


図11: Delayの時間変化。グラフ中の波線は1 sample の値

まとめと今後

- 山口日立基線でのスイッチング位相補償の例は無く、有効な観測であるかの実証試験を行った。
- NRAO512と3C345の天体ペアについて既知の位置が得られるかスイッチング観測の実証試験を行い、現在解析中である。
- スwitching観測の相関処理方法についてdelayとrateの較正方法、スイッチング間の位相を補正し、位相差を求める方法について議論中である。
- NRAO512と3C345の天体ペアについて既知の位置が得られた場合、暗い天体ペア、低赤緯の天体ペアについてスイッチング観測の実証試験を行う。それらの実証試験に成功した後、系内ブラックホールと背景AGNを切り分けるための固有運動観測を行う予定である。