

光結合 VLBI を用いた Fermi ガンマ線源の未同定天体の観測

藤永 義隆 藤澤 健太 新沼 浩太郎 木村 篤志 (山口大学)
小山 友明 水野 翔太 河野 祐介 (国立天文台)

Abstract

2012年12月1日、2日、3日、8日の計4エポックで山口一つくば基線で光結合 VLBI (Very Long Baseline Interferometry) 観測を行った。従来の大学 VLBI 連携観測よりも高感度な光結合 VLBI 観測の性能評価を行い、理論値だけでなく実質の感度を見積もることで大学連携の観測モードとして確立することを本観測の目的とした。性能評価は電波で暗いことが予想される Fermi 未同定ガンマ線源の位置誤差内にある FIRST 及び NVSS の電波源を観測することで行った。また、本観測は光結合 VLBI の特徴の一つでもある実時間相関処理をしながら行った。

上記4エポックの観測で553天体の観測を行い、22天体を検出できた。観測結果から見積もられる光結合 VLBI の最小検出感度は積分時間 180 [s] に対して $1\sigma = 1.64$ [mJy] であった。これは理論値よりも約2倍大きな値であり、天候や有効帯域幅などに起因している可能性があると考えられる。

1 Introduction

VLBI 観測は基線長をアンテナの口径に見立てることで高い角分解能が実現できるため、銀河系外にある様な遠い天体の構造を知るための良い手段となる。しかし、系外の天体からの信号は弱く、それを観測するためには最小検出感度が重要である。VLBI 観測における最小検出感度 ΔS_{ij} は (1) により求めることができる。

$$\Delta S_{ij} = \frac{1}{\eta_S} \sqrt{\frac{SEFD_i SEFD_j}{2\delta B\tau}} \quad (1)$$

光結合 VLBI^[1] は記録方法を従来の磁気テープではなく光結合及びディスク記録にすることでより広い帯域幅でデータを取得できるようにし、最小検出感度を小さくしている。これにより従来の VLBI よりも弱い天体まで観測できるようになるため、観測できる天体数の増加が期待できる。Table 1 では従来の

Table 1 光結合 VLBI と従来の VLBI の理論値の比較

	VSOP ターミナル	OCTAVE
記録方法	磁気テープ	OCTADISK / 光結合
記録速度 [Mbps]	128	2048
帯域幅 [MHz]	32	512
最小検出感度 [mJy]	3.2	0.8

※ 2bit/sample を仮定

VLBI と光結合 VLBI の最小検出感度の理論値の比較を行なっている^[2]。計算に用いた SEFD はそれぞれ $SEFD_{\text{山口}} = 285$ [Jy]、 $SEFD_{\text{つくば}} = 325$ [Jy] で、積分時間は $\tau = 180$ [s] である。

上記のように、今回使用した光結合 VLBI は従来の VLBI に比べ帯域が16倍となるため感度においては4倍の向上が見込め、遠方の天体の構造を知る上で有効な手段と成り得る。本観測は、この光結合 VLBI 観測の性能評価を行い、理論値だけでなく実際の感度を見積もることで大学連携の観測モードとしての確立を目指すことを目的として行った。

2 Observation

現在、つくば・山口・苫小牧・岐阜の4観測局が SINET4 を通してつながっている。本観測では山口一つくば基線における性能評価を行った。また、光結合 VLBI は観測局と相関局を光回線で繋ぐため、観測したデータをリアルタイムで相関処理しながら観測することができる。そこで今回は実時間相関処理を行いながら光結合 VLBI 観測を行った。観測コード、観測日時、観測周波

Table 2 観測情報

観測コード	観測日時 (DOY UT)	観測周波数 [GHz]	観測天体数
S12335A	336 00:43:45~336 06:56:30	8.192~8.704	85
S12336A	336 09:30:00~337 06:56:50	8.192~8.704	248
S12337B	337 18:15:00~337 23:23:20	8.192~8.704	66
S12342A	342 18:30:00~343 06:59:25	8.192~8.704	154

数、観測天体数の情報を Table 2 にまとめる。観測はターゲット 1 天体あたり 3 分ずつ行い、約 30 分に一回の頻度で較正天体を観測した。また、各観測エポックでシステムチェックのために明るい天体を約 1 時間観測した。

本観測では、まず未同定の Fermi γ 線源^[3]の中から赤緯 $> -30^\circ$ かつ |銀緯| $> 5^\circ$ を満たす天体を選び、これらの γ 線源の位置誤差内にある NVSS カタログ^[4] 及び FIRST^[5] カタログに載っている全ての電波源を観測対象とした。選定された γ 線源は 234 天体、電波源は 1211 天体だった。

3 Result

2012 年 12 月 1 日、2 日、3 日、8 日の 4 エポックの観測で観測した天体は対象とした 1211 天体のうち 553 天体である。553 天体全て積分時間は 3 分であり、得られた SNR (signal to noise ratio) の値によって検出 ($\text{SNR} \geq 10$)、準検出 ($10 > \text{SNR} \geq 8$)、未検出 ($8 > \text{SNR}$) を分類すると、検出天体が 9 天体、準検出天体が 13 天体、未検出天体が 531 天体だった。Table 3 にそれぞれの天体数をまとめる。

SNR	<8	8 ~ 10	10 <
天体数	531	13	9

実際の観測における積分時間と感度の関係を知るため、長時間観測を行った天体を用いて SNR と積分時間の関係をプロットした図を作成した。その結果を Fig 1 に示す。確認にはシステムチェックのために約 1 時間観測した 3C454.3 と 4C39.25 を用いており、図の縦軸は SNR、横軸は時間 [s] の 1/2 乗を表している。Fig 1 を見る限り、積分時間 3 分 (グラフでは $13.4 \text{ [s}^{1/2}]$) では SNR はまだ上昇を続けているため、コヒーレンスが保たれており、今回行った 3 分積分での観測は妥当だったと思われる。

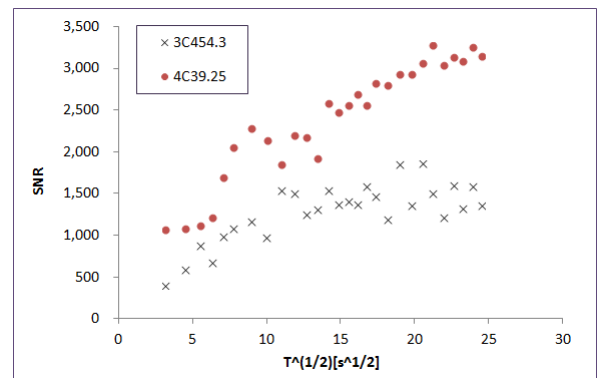


Fig. 1 SNR と積分時間の関係

本観測では、ターゲット天体のフラックス密度を (較正天体のフラックス密度/較正天体の SNR) × (ターゲットの SNR) で算出している。Fig 2 に今回観測した天体の 1.4 GHz でのフラックス密度のヒストグラムと光結合 VLBI で検出できた天体の 8.4 GHz でのフラックス密度のヒストグラムを示す。1.4 GHz は天体数の上限を 100 で切っている (0-10 [mJy] の天体数は 385)。また、ここで用いたフラックス密度は 1.4 GHz はカタログ値、8.4 GHz は較正天体のフラックス密度を用いて算出した計算値である。Fig 2 より、縦軸のスケール

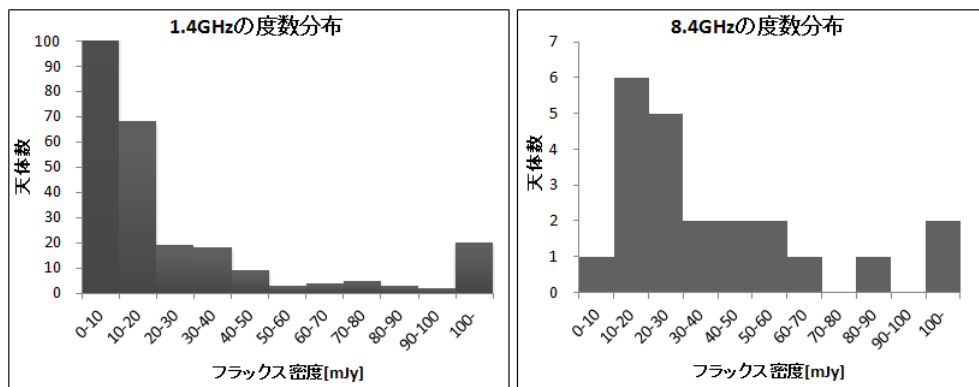


Fig. 2 観測した天体の 1.4 GHz(左)、8.4 GHz(右) のフラックス密度と天体数のヒストグラム。

ルが大きく異なるが 2 つの周波数のヒストグラムの概形が 0-10 [mJy] の部分を除き類似していることが読み取れる。縦軸のスケールの大きな違いや 0-10 [mJy] の天体数が大きく減少している原因として、0-10 [mJy] の範囲が $\text{SNR} < 8$ に相当することや本観測で用いた光結合 VLBI は検出できる輝度温度が VLA よりも高いため、低い輝度温度の天体が検出できなかったことが考えられる。

4 Discussion

本観測の目的である性能評価を行うため、結果から山口一つくばの 1 基線の場合の光結合 VLBI の最小検出フラックス密度を推定する。推定は、4 エポックの観測内で用いた較正天体のフラックス (VCS (VLBA Calibrator Search) カタロ

Table 4 校正天体の SNR とフラックス密度

観測コード	天体名	SNR	フラックス密度 [Jy]	1σ [mJy]	観測エポックごとの平均 [mJy]
S12335A	1324+224	393.3	0.99	2.5	2.85
	1502+106	321.4	1.2	3.7	
	1656+053	268.8	0.62	2.3	
S12336A	1144+402	497	0.64	1.3	1.13
	1739+522	564	0.54	0.96	
S12337B	2010+723	313.3	0.36	1.2	1.12
	1739+522	494.7	0.54	1.1	
S12342A	1952+138	160	0.28	1.8	1.63
	0802-010	179.9	0.27	1.5	

グ値)と SNR を比較し、 1σ を計算して行った。Table 5 にその結果を示す。4 エポックの 1σ の平均が本観測の 1σ と考えると、山口一つば基線の光結合 VLBI 観測の 1σ は 1.68 [mJy] である。

この結果は理論値である 0.83 [mJy] の 2.0 倍である。これはエポックごとにばらつきが大きいことから天候に起因していることや、その他にも SNR 決定の際に用いるノイズレベルを求めるデータ点数が少ないこと、有効帯域幅が観測帯域幅よりも狭まっていたことなどが可能性として考えられる。SNR 決定の際、明らかにフリンジが検出できている(積分時間を変化させてもフリンジの位置が動かず、目視で SNR が 10 程度のピーク値)天体でも計算上の SNR が 8 以下であったり、1 スキャン 3 分間のスキャンにも関わらず積分時間を長くすることで SNR が減少したりする天体もあった。観測帯域幅 512MHz 全てが有効ではないと考えたのは、Fig 3 の様にクロスパワーの形が左右非対称で片方に広がった概形を示したためである。この左右非対称のクロスパワースペクトルから、本来矩形であるべき帯域通過特性が左右非対称、又は崩れていることが予想される。しかし、SNR 決定や有効帯域幅はそれぞれで見ると影響は小さいため、おそらく上記の 3 つの要因が合わさることで実質の最小検出感度が大きくなったのだと考えられる。

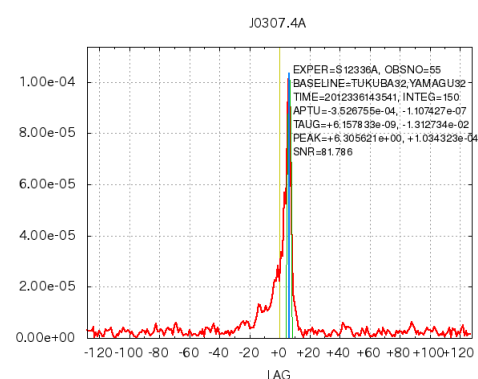


Fig. 3 本観測で観測した天体のクロスパワースペクトル。

5 Future prospects

今後やるべきこととして、次の 3 つが挙げられる。1 つ目は残りの Fermi ガンマ線源の位置誤差内にある電波源の観測である。12 月 24-25 日にも光結合 VLBI の試験観測を行っており、検出・準検出を合わせると 9 天体(検出 6、準検出 3)だった。本試験観測を開始して以降観測した天体は計 845 天体になり、うち 31 天体が検出できたことになる。Discussion と同様の計算方法で算出した 1σ は 3.4 [mJy] だった。この観測では山口局において降雪が見られたため、天候の影響が大きかったと思われる。2 つ目は SNR を決定しているアルゴリズムの確認を行なうことである。これにより考察で述べた問題の一部も解決できると考えている。3 つ目は観測された電波源のフラックス密度と、山口一つば基線で期待される分解能から求めた天体の大きさから天体の輝度温度を推定することである。輝度温度から大まかな天体の種類を推定することができると考えている。

Reference

- [1] 光結合 VLBI ホームページ <http://veraserver.mtk.nao.ac.jp/evlbi/network/>
- [2] 木村篤志 2011 年卒業論文
- [3] Nolan, P. L., Abdo, A. A., Ackermann, M., et al. 2012, ApJS, 199, 31
- [4] Condon, J. J., Cotton, W. D., Greisen, E. W., et al. 1998, AJ, 115, 1693
- [5] Becker, R. H., White, R. L., & Helfand, D. J. 1995, ApJ, 450, 559