

小型広帯域 VLBI は、従来の測地 VLBI より精度が高い

関戸衛、岳藤一宏、氏原秀樹、近藤哲朗、宮内結花、堤正則、川合栄治、長谷川新吾、
小室純一、寺田健次郎、難波邦孝、高橋留美、岡本慶大、青木哲郎、池田貴俊

情報通信研究機構

渡部謙一、鈴山智也

産業技術総合研究所 計量標準総合センター

1 はじめに

NICT では、移設が容易な可搬型小型アンテナを使って VLBI 観測を応用した精密周波数比較技術の開発を進めている。

小型アンテナを使った VLBI 観測は、測地 VLBI 観測の可能性を広げるため 1980 年代から試験研究が行われてきた [2, 3]。VLBI の遅延計測精度は信号対雑音比 (SNR) と有効帯域幅 (EBW) に反比例するが、従来の S/X-band を使った観測の場合、観測帯域幅の制限 (X-band で最大約 1GHz) と受信感度の制約から、小型アンテナを使った測地 VLBI では十分な VLBI 観測精度 (解析残差 30ps 程度) を実現することは困難であった。国際 VLBI 事業 (IVS) は次世代の測地 VLBI システムとして 2-14GHz の広い周波数帯域を観測に使用する新しい VLBI 観測方法 VLBI Global Observing System (VGOS)[4] を推進している。我々は VGOS の観測方式に準拠しつつ、携帯電話等による 2GHz 帯の強い混信を避けて、3-14GHz を観測周波数とする広帯域 VLBI 観測システムを開発した [5, 6]。この方式を使えば、従来に比べて一桁以上の大きな有効帯域幅が得られ、最小限の SNR(≥ 7) でフリッジを検出しバンド幅合成が成立するだけで、大型の VLBI アンテナを使った観測と同等以上の遅延計測精度が実現できる。この報告では、11m アンテナによる従来の S/X 型の観測と、小型広帯域 VLBI アンテナを使った場合の遅延計測精度を比較し、小型アンテナのネットワークで十分な精度の測地観測が可能であることを示す。少数の大型アンテナと複数の小型アンテナを使った新しい Node-Hubs Style (NHS) 方式の測地・周波数比較 VLBI 観測を提案する。

2 小型広帯域 Node-Hub Style VLBI

小型アンテナの受信感度は開口面積がにより制限され、冷却受信機にして開口効率を 60% とする最善の設計を行っても、天体の最小検出感度の指標となる等価システムフラックス密度 (SEFD) が 5 万 Jy を下回することは難しい。このため小型アンテナ単体では受信できる天体は太陽や月などに限られてしまうが、VLBI 観測の場合、その感度は、干渉計のアンテナペアの口径の積に比例するため、小型アンテナと大型アンテナと組み合わせると、数億光年の彼方から到来するクエーサの信号を受信し、フリッジを検出することができる。更に、VGOS や我々の観測システム GALA-V の受信する 3-14GHz の広帯域 VLBI 観測を行うと、有効帯域幅は従来の方式より一桁以上拡大して 4 GHz 程度となり、最低限の SNR で VLBI 観測が成立すれば十分な精度で群遅延の計測が実現できる。我々の GALA-V プロジェクトでは、大型アンテナ R と小型アンテナ A,B の間で観測される RA, RB 基線のデータから、フリッジが検出困難な AB 間の基線の遅延量を求め、これを観測量とする方式を採用している。閉合遅延関係を用いたこの方法は、大型アンテナの影響を完全にキャンセルすることができ [7]、RA, RB の観測量をそのまま用いる方法に比べて、大型アンテナに起因する重力変形の影響 [8, 9] を除くという利点がある。小型アンテナを使った VLBI 観測の利点を以下に列挙する。

1. 駆動速度が大型アンテナより速く、観測天体を高速・頻りに切り替える観測を行ってもアンテナに対する負荷が小さい。
2. 大型アンテナに比べて大幅に安価であるため、維持費の低減や、観測点の複数展開が容易にできる。実際我々がプロジェクトで使用している MARBLE 小型アンテナは人力のみで組み立

て・分解ができ、4 トントラックで簡単に移設ができる。

3. 測地 VLBI において大型アンテナの問題として指摘されている重力変形の影響が小さい。閉合遅延量を使った方法により、大型アンテナの影響をほとんど除くことも可能である。

現在の測地 VLBI の観測精度は、大気の影響の不定さによって制限されており、VGOS の設計指針では大気の影響の推定精度を上げるために、頻繁な天体の切り替えを可能にする高速駆動アンテナが標準仕様として求められている。上記 1 の点は、この観点からも重要である。しかし、先述したように、このような小型アンテナを活用した測地 VLBI には、観測感度を補うための大型アンテナの共同観測が不可欠である。大型アンテナが 1 台の場合には、その駆動速度ですべてのアンテナの観測 (Scan) 切り替えが制限されるが、大型アンテナが複数台使用できる場合、大型アンテナは交互に Scan に参加し、Scan に参加しない間に次の Scan の天体にアンテナをゆっくり駆動する余裕ができる。このように大型アンテナを仲介として、小型アンテナ間の遅延量を閉合遅延の関係を使って求め、小型アンテナのネットワークで測地観測を行う方式を Node-Hub Style (NHS) 方式と呼ぶことにする (図 1)。NHS 方式は、小型アンテナの高速駆動の利点を生かし、大型アンテナの消耗を防いで長期に安定した観測を継続するために有効で、安価な小型アンテナを使って観測点を増やすことも可能であり、測地や周波数比較 VLBI に貢献できると考えられる。

3 NHS 方式 小型アンテナ v.s. 従来方式 11m アンテナの精度比較

広帯域観測のできる小型アンテナを使った NHS 方式の VLBI 観測と、従来方式の VLBI の精度を比較してみる。従来方式のアンテナには、KSP プロジェクト [1] で設置された 11m 直径のパラボラアンテナペア (鹿島 11m, 小金井 11m) を使用し、IVS の T2 セッションに使用されている観測モードで強い電波フラックスを持つ 3C273B を連続追尾観測して遅延データを取得した。従来方式では、測地解析に使用される群遅延量は X-band だけであり、今回の

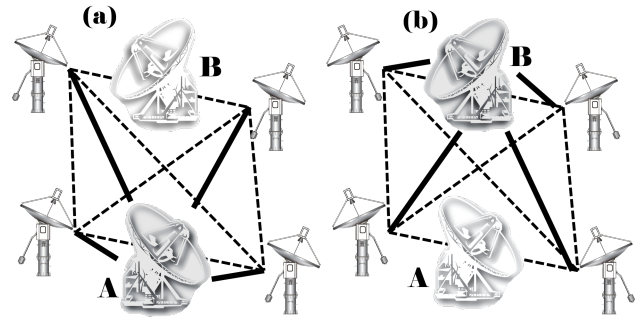


図 1: Node-Hub Style (NHS) 方式の VLBI 観測スキーム。複数の大型アンテナが交互に多数の小型アンテナと VLBI 観測を行う。小型アンテナの高速駆動能力を活用した高密度の VLBI 観測を行いつつ、大型アンテナの負担と重力変形などの誤差要因を減らすなど、多くの利点が期待できる。

表 1: 従来の S/X 方式と NHS 方式の遅延精度の比較実験の観測パラメータ。

VLBI scheme	NHS Broadband	Legacy S/X
Antenna Diameter	1.6m, 2.4m, 34m	11m, 11m
Bandwidth per channel	1024 MHz	8MHz
Number of Channels	4	16
Observation Freq.	3-14GHz	8.1-8.6GHz
Effective Bandwidth	1.8 ~ 3.8 GHz	133MHz
Integration time	1 sec.	9 sec.
SNR	約 t 10	約 100
RMS of delay residual	4 ~ 7 psec	35 psec

比較対象は遅延精度であることから X-band のみのバンド幅合成結果を使用した。チャンネル当たりの周波数帯域幅 8MHz で十分な精度の遅延が得られるように 4 秒または 9 秒間の積分を行い、それぞれバンド幅合成処理を行って精密群遅延量を計測した。一方、広帯域観測可能な小型アンテナは産業技術総合研究所/計量標準総合センター (NMIJ, つくば市) と NICT 小金井本部 (小金井市) に設置しており、NICT 鹿島宇宙技術センターの鹿島 34m アンテナとあわせた 3 局を使って 3C84、3C279、4C39.25 といった 3C273B と同程度の大きなフラックスを持つ天体を 1000 秒以上連続観測した。観測は 1 チャンネル当たり 1GHz 幅のデータを取得するため小型アンテナが相手であっても 1 秒積分でバンド幅合成に十分な SNR のフリッジが検出された。表 1 にそれぞれの観測方式の観測パラメータを示す。それぞれの計測結果から 1000 秒スケール以上のゆっくりとした遅延変動を除き、修正ア

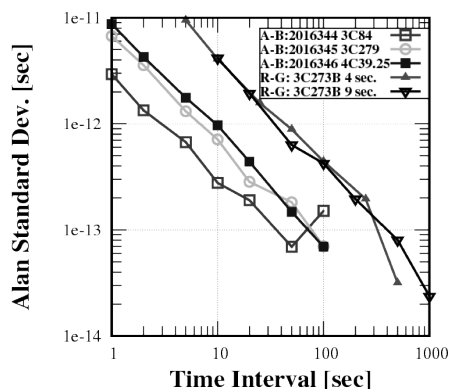


図 2: 従来方式 (11m アンテナペア) と NHS 方式 (2.4m アンテナと) それぞれの方式で得られた群遅延の時系列から計算した修正アラン分散。いずれの場合も 1.6m-2.4m の小型アンテナを使った NHS 方式のほうが精度の高い計測結果となっている。

ラン分散を計算した結果を図 2 に示す。天体 3C273B の相関フラックスは 3C279 と同程度であり、3C84 より小さく 4C39.25 より大きな値であったことが、この時の相関振幅の比から確認されている。天体のフラックスによらずどの場合も NHS 方式の広帯域小型アンテナによる遅延量のほうが短期安定度がよい、つまり精度の高い観測を行っていることがわかる。

4 まとめ

広帯域 VLBI 観測 (VGOS や我々の GALA-V システム) では、従来の VLBI 観測に比べて有効帯幅が 1 桁以上大きく、フリッジが検出されてバンド幅合成処理が正常に適用されると、数十秒の観測で得られる観測遅延量の精度はサブピコ秒に達し、従来の S/X 方式の VLBI より高い遅延計測が可能となる。小型アンテナだけでは VLBI 観測ができないものの、大型アンテナと組み合わせた観測により十分な精度の遅延計測が可能である。我々は、11m アンテナを使った従来方式と小型アンテナの NHS 方式を比較し、NHS 方式が高い精度を実現できることを確認した。そこで、大型アンテナを感度改善のための Hub 局小型アンテナを Node 局とし、Node 局ネットワークの観測を行う Node-Hub Style (NHS) 方式の VLBI 観測を提案する。Node 間の観測遅延量は閉合遅延関係を用いて算出し、大型アンテナの影響をキャンセルすることにより精度改善も期待できる。

参考文献

- [1] 今江理人, ほか (1996): 3 KSP 計画における VLBI システム 3.1KSP 計画での VLBI システムの概念, 通信総合研究所季報, 42(1), pp.15-20.
- [2] Niell, A. E., et al. (1980): Geodetic Measurements with a Mobile VLBI System, Radio Interferometry Techniques for Geodesy, Proceedings of a conference held June 19-21, 1979 at the M. I. T., NASA CP-2115, 3.
- [3] 金子明弘, ほか (1990): II.5 南大東島局用 11m アンテナシステム及び超小型 VLBI 局, 通信総合研究所季報, 36(特 8), pp. 65-74.
- [4] Petrachenko, B., et al. (2009): Design Aspects of the VLBI2010 System, NASA Technical Memorandum NASA/TM-2009-214180, ftp://ivsc.gsfc.nasa.gov/pub/misc/V2C/PR-V2C_090417.pdf
http://ivsc.gsfc.nasa.gov/pub/misc/V2C/PR-V2C_090417.pdf.
- [5] 関戸 衛, ほか (2017): 広帯域 VLBI システムによる測地・周波数比較実験の報告, 2016 年度 VLBI 懇談会シンポジウム集録, pp.32-35, <http://astro.sci.yamaguchi-u.ac.jp/vcon/vcon2016proc.pdf>.
- [6] 関戸 衛, ほか (2018): 広帯域 VLBI システムの開発と測地・周波数比較実験の報告, 測地学会誌 GGOS 特集号 in printing.
- [7] Sekido, M. (2018): 'Node - HUB' Style VLBI with Broadband System, IVS NICT-TDC News. 37, pp.22-25.
- [8] Pierguido, S., et al. (2011): "Height bias and scale effect induced by antenna gravitational deformations in geodetic VLBI data analysis", J. Geod., 85, pp-18, doi:10.1007/s00190-010-0410-6.
- [9] Artz, T., Springer, A., and Norhnagel, A. (2014): "A complete VLBI delay model for deforming radio telescopes: the Effelsberg case", J. Geod., 88, pp.1145-1161, doi:10.1007/s00190-014-0749-1.