

広帯域受信機による VLBI 観測の高度化に関する研究（第 1 年次）

実施期間 令和 4 年度～令和 5 年度
地理地殻活動研究センター 松本 紗歩
宇宙測地研究室

1. はじめに

国際 VLBI 事業 (IVS) では、地球の自転軸の傾き (歳差・章動) と回転の速度を表す地球回転パラメータ (Earth Orientation Parameter : EOP) や地球及び天体の基準座標系の決定のための VLBI 国際観測を実施している (Nothnagel et al., 2017). EOP は日々変動することから、高精度測位社会において求められる正確な「位置」のためにはリアルタイムで EOP を把握することが必要である. VLBI は、EOP の全てのパラメータを決めることができる唯一の宇宙測地技術である. IVS では、広帯域の観測をすること、小型かつ高速で駆動するアンテナを使用することで単位時間当たり、より多くの観測数を実現し、高精度の成果の算出を目指す新しい観測方式である「全球 VLBI 観測システム (VGOS)」を推進している. VGOS の最終的な目標は、絶え間ない観測を実施し、24 時間以内に EOP をはじめとする解を算出することである (Petrachenko et al., 2009). しかし、従来の S/X 観測と比べて単位時間当たりのデータ量が多く、現状では、転送や解の算出に多くの時間がかかる状況である (Behrend et al., 2023).

世界の各局で広帯域観測が可能な VGOS 仕様の観測局の整備が進む一方、従来の S/X 観測局も多い. IVS では、年間を通して従来の S/X 観測と広帯域観測の両方の観測を並行して実施しているが、S/X 観測の一部は VGOS 仕様と S/X 仕様の両方のアンテナが参加する Mixed-mode に切り替わりつつある. Mixed-mode 観測は、長い歴史を持つ S/X 観測と VGOS 観測の成果を結びつけるためにも重要である.

このような背景のもと、本研究では広帯域受信機による観測の高度化を目指す. 令和 4 年度は、少ない観測局と短時間観測により、効率よく EOP を算出することを目指し、国土地理院が運用する石岡測地観測局 (石岡局) とオーストラリア間で広帯域受信機による観測を実施した.

2. 研究内容

2.1 参加局概要

参加局の場所を図-1 に、概要を表-1 に示す. 石岡局では現在、1 年のうち期間を定めて受信機を入れ替えることで IVS の実施する VGOS 観測と S/X 観測の両方に参加している (2022 年時点) (Matsumoto et al., 2021). オーストラリアでは、政府のプロジェクトの一環として、タスマニア大学が国内の 3 か所 (タスマニア州ホバート、ノーザンテリトリー州キャサリン、西オーストラリア州ヤラガディー) でアンテナを運用している (Lovell et al., 2013, McCallum et al., 2021). ホバート局とキャサリン局は、IVS が推進する VGOS 観測に対応する広帯域の受信機を搭載している. ホバート局は 2022 年から IVS の実施する定常的な VGOS 観測に参加を開始し、南半球に位置する VGOS 局として重要な局である. ヤラガディー局では、S/X 受信機を搭載している.

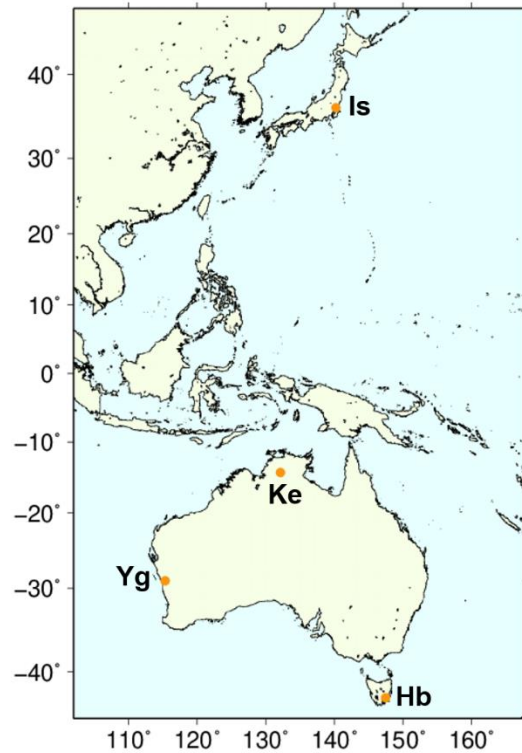


図-1 AUJ 観測参加局 (Is: 石岡局, Hb: ホバート局, Ke: キャサリン局, Yg: ヤラガディー局)

表-1 各局の概要

	石岡局	ホバート局	キャサリン局	ヤラガディー局
所在地	茨城県石岡市	オーストラリア タスマニア州 ホバート	オーストラリア ノーザンテリトリー州 キャサリン	オーストラリア 西オーストラリア州 ヤラガディー
口径	13.2 m	12.1 m	12.1 m	12.1 m
マウント方式	Az-El	Az-El	Az-El	Az-El
駆動速度	Az: 12 deg/s El: 6 deg/s	Az: 5 deg/s El: 1.25 deg/s	Az: 5 deg/s El: 1.25 deg/s	Az: 5 deg/s El: 1.25 deg/s
受信周波数帯域	広帯域受信機搭載時: 2-14 GHz S/X 受信機搭載時: S 帯 (2.2-2.4 GHz) X 帯 (8.2-9.1 GHz)	2.2-14 GHz	2.2-14 GHz	S 帯(2.2-2.4 GHz) X 帯(8.1-9.1 GHz)

2.2 観測概要

石岡局で広帯域受信機を搭載していた2022年9月末まで、石岡局、ホバート局およびキャサリン局でのVGOS観測を実施した。石岡局にてS/X受信機に入れ替えた後には、S/X観測局のヤラガディー局を含めてMixed-mode観測を実施した。

2.2.1 VGOS 観測

観測周波数は、IVSが定めるVGOSモード（3, 5, 6, 11 GHz）に従った。従来のS/X観測と比較するため、観測はIVSの定常観測であるR1観測の時間に合わせて実施した。観測の実施状況を表-2に示す。2週間に1度を基本とし、全8回、1回につき3時間の観測を実施した。観測名はAustralia-Japan (AUJ)観測とし、続く数字は同時刻のR1観測の命名規則に従いDOY（Day Of Year）を用いた。キャサリン局では、観測期間途中で新しいサンプラーの導入にIVSのVGOSモード観測が可能になり、3局での観測を開始した。

表-2 各局の概要

名称	観測日時（日本時間）	参加局
AUJ055	6月14日 8:00 - 11:00	ホバート, 石岡
AUJ057	6月28日 8:00 - 11:00	ホバート, 石岡
AUJ059	7月12日 8:00 - 11:00	ホバート, 石岡
AUJ061	7月26日 8:00 - 11:00	ホバート, 石岡
AUJ064	8月17日 9:00 - 12:00	ホバート, 石岡
AUJ066	8月30日 8:00 - 11:00	ホバート, 石岡, キャサリン
AUJ068	9月13日 8:00 - 11:00	ホバート, 石岡, キャサリン
AUJ070	9月27日 10:00 - 13:00	ホバート, 石岡, キャサリン

2.2.2 Mixed-mode 観測

観測の実施状況を表-3に示す。観測周波数は、南半球で実施されているMixed-modeの観測モードに従った(McCallum et al., 2022)。なお、ヤラガディー局は、機器のトラブルのためAUJ102には不参加、駆動系のトラブルによりAUJ103は途中までの参加となった。石岡局は、INT観測参加のため、日本時間16:00-18:00はあらかじめ観測から抜けるようスケジュールを作成した。

表-3 各局の概要

名称	観測日時（日本時間）	参加局	
		広帯域受信機で観測	S/X受信機で観測
AUJ101	1月21日 8:00 - 1月22日 8:00	ホバート, キャサリン	ヤラガディー, 石岡
AUJ102	2月4日 8:00 - 2月5日 8:00	ホバート, キャサリン	石岡
AUJ103	2月26日 8:00 - 2月27日 8:00	ホバート, キャサリン	ヤラガディー, 石岡

2.3 観測

測地のためのVLBI観測では、地球上の遠く離れた2つ以上のアンテナで、あらかじめ作成したスケジュールファイルに記載されたとおりに対象の天体を切り替えながら観測を繰り返す。1つの天体に対する1回の観測をスキャンと呼ぶ。スケジュールファイルの作成には、VieSched++ (Schartner and

Böhm, 2019) を使用した。VGOS観測では、1スキャン30秒で次の天体に切り替えるようスケジュールを作成した。Mixed-mode観測では、必要なSNRを満たすよう1スキャンの観測時間を設定した。

スケジュールの作成と平行して、解析ソフトウェアVieVS (Böhm et al., 2018) によるシミュレーションを実施した。VieVSでは、後述のように相関処理後の結果に対して解析を行うのに加えて、VieSched++でのスケジュール作成時の出力ファイルにより、期待されるEOPなどのパラメータをシミュレーションにより推定することができる。観測時間などの条件を変えてシミュレーションを実施し、検討した。作成したスケジュールファイルを各局の観測機器に読み込ませることで、アンテナを駆動する。同時に、データ処理・記録のための機器を稼働することで、一連の観測が実施される。

2.4 相関・解析処理

相関処理には、オーストラリアのスウィンバーン工科大学で開発されたソフトウェアDiFX (Deller et al., 2007) を使用した。さらに、相関強度が最大となることを示すピークであるフリンジの検出には、Fourfit (MIT/Haystack) を使用した。相関処理でフリンジを検出することで、アンテナ間の電波の到着の時間差を知ることができる。局の位置およびEOPを算出するための解析にはソフトウェア「VieVS」を用いた。

3. 成果

観測時のトラブル等を経験したものの、予定した計8回の観測を実施した。得られたデータを用いて相関処理およびフリンジフィットを行ったところ、フリンジの検出を確認することができた。VGOSモードで観測した8回の観測では、全ての観測においてフリンジの検出を確認した。図-2にAUJ068の観測で得られたフリンジを示す。図に示されるように、期待通りにフリンジの検出に成功したものがある一方で、同一の観測の中でも、フリンジが検出できないスキャンが存在するなど、ターゲットとなる天体によってフリンジの検出に差がみられることも確認された。1スキャンの観測時間を固定してスケジュールを作成したVGOSモード観測では、天体のフラックスや構造が大きく影響することを確認した。また、フリンジが検出できないスキャンの中には、観測時のトラブルや観測条件により生じたデータの品質の影響が考えられるものもある。今後、相関処理におけるパラメータの調整等を試みるが、スケジュール作成から観測に至る過程で、改善の余地があることが示唆された。

また、いくつかの観測については暫定的に局の位置およびEOPが算出できており、今後パラメータを調整しながら最終的な解を見積もる予定である。

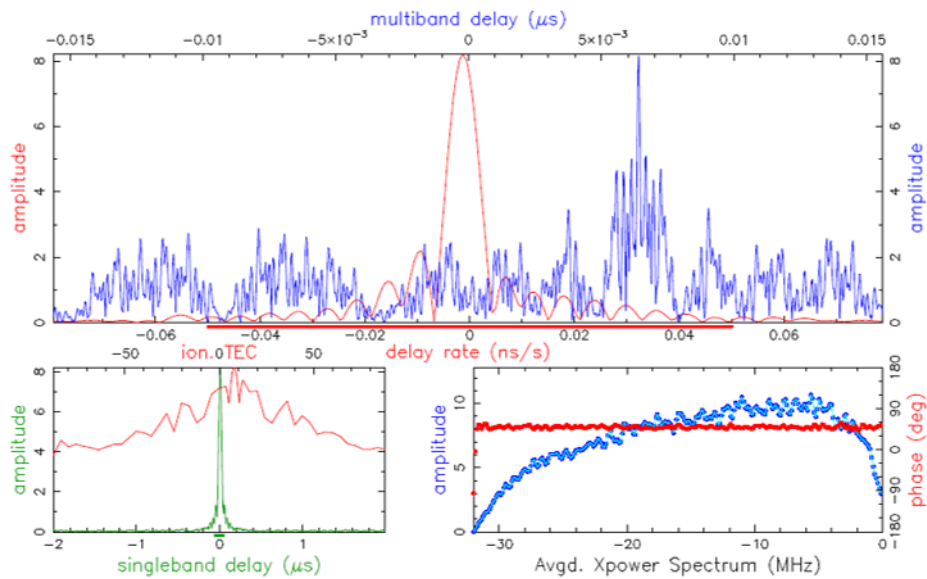


図-2 AUJ068 石岡 - キャサリン基線で得られたフリンジ

4. 結論

日本とオーストラリアの間で、EOPの算出のためのVGOS観測を開始した。2022年度には8回の観測を実施し、いくつかのデータについて相関・解析処理をしてEOPを算出した。今後、同時刻に実施されたEOP算出のためのS/X観測であるR1観測の結果と比較し、精度を確認する。短い観測時間かつ参加局の少ない条件の中十分な精度の成果を出すことができれば、広帯域受信機の利用の可能性を広げることができる。結果に応じてスケジュールの作成から解析に至る過程での改善点を見直しながら、今後も観測と研究を続ける予定である。

参考文献

- Behrend, D., Ruszczyk, C., Elosegui, P., and Weston, S. (2023): Status of the VGOS Infrastructure Rollout, in IVS 2022 General Meeting Proceedings, edited by Kyla L. Armstrong, Dirk Behrend, and Karen D. Baver, NASA/CP-20220018789.
- Böhm, J., Böhm, S., Boisits, J., Girdiuk, A., Gruber, J., Hellerschmied, A., Krásná, H., Landskron, D., Madzak, M., Mayer, D., McCallum, J., McCallum, L., Schartner, M., and Teke, K. (2018): Vienna VLBI and Satellite Software (VieVS) for Geodesy and Astrometry, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 130:044503.
- Deller, A. T., Tingay, S. J., Bailes, M., and West, C. (2007): DiFX: A Software Correlator for Very Long Baseline Interferometry Using Multiprocessor Computing Environments, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 119:318.
- Lovell, J. E. J., McCallum, J., N., Raid, P. B., McCulloch, P. M., Baynes, B. E., Dickey, J. M., Shabala, S. S., Watson, C. S., Titov, O., Ruddick, R., Twilley, R., Reynolds, C., Tingay, S. J., Shied, P., Adada, R., Ellingsen, S. P., Morgan, J. S., Bignall, H. E. (2013): The AuScope Geodetic Array, *Journal of Geodesy*, 87, 527-538, DOI: 10.1007/s00190-013-0626-3.

- Matsumoto, S., Ueshiba, H., Nakakuki, T., Takagi, Y., Hayashi, K., Yutsudo, T., Mori, K., and Nozawa, K. (2021): Ishioka Geodetic Observing Station – 13.2-m Radio Telescope, in International VLBI Service for Geodesy and Astrometry 2019+2020 Biennial Report, edited by D. Behrend, K. L. Armstrong, and K. D. Baver, NASA/TP-20210021389.
- McCallum, L., Chuan, L. C., Krásná, H., McCallum, J., Böhm, J., McCarthy, T., Gruber, J., Schartner, M., Quick, J., and Rogers, A. (2022): The Australian mixed-mode observation program, *Journal of Geodesy* 96, 67, DOI: 10.1007/s00190-022-01657-2.
- McCallum, L., McCallum, J., Chuan, L. C., Hankey, W., Jaradat, A., McCarthy, T., Calvés, G. M., Reid, B., and Salarpour, S. (2021): AuScope VLBI Array and Hobart 26-m Antenna, in International VLBI Service for Geodesy and Astrometry 2019+2020 Biennial Report, edited by D. Behrend, K. L. Armstrong, and K. D. Baver, NASA/TP-20210021389.
- MIT/Haystack: Haystack Observatory Postprocessing System (HOPS), <https://www.haystack.mit.edu/haystack-observatory-postprocessing-system-hops/> (accessed 2 Mar. 2023).
- Nothnagel, A., Artz, T., Behrend, D., and Malkin, Z. (2017): International VLBI Service for Geodesy and Astrometry: Delivering high-quality products and embarking on observations of the next generation, *Journal of Geodesy*, 91:711–721, DOI 10.1007/s00190-016-0950-5.
- Petrachenko, B., Niell, A., Behrend, D., Corey, B., Böhm, J., Charlot, P., Collioud, A., Gipson, J., Haas, R., Hobiger, T., Koyama, Y., MacMillan, D., Malkin, Z., Nilsson, T., Pany, A., Tuccari, G., Whitney, A., and Wresnik, J. (2009): Design Aspects of the VLBI2010 System: Progress Report of the IVS VLBI2010 Committee.
- Schartner, M. and Böhm, J. (2019): VieSched++: A New VLBI Scheduling Software for Geodesy and Astrometry, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 131:084501.
- Wessel, P., Luis, J. F., Uieda, L., Scharroo, R., Wobbe, F., Smith, W. H. F., and Tian, D. (2019): The Generic Mapping Tools version 6. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 20, 5556-5564, <https://doi.org/10.1029/2019GC008515>.