

広帯域・小型 VLBI による光格子時計の長距離周波数比較・測地 -誤差要因の検討と展望-

関戸衛¹, 岳藤一宏², 氏原秀樹¹, 近藤哲朗^{1,3}, Nils Nemitz¹, Monia Negusini⁴, 堤正則¹, 川合栄治¹, 蜂須英和¹, Marco Pizzocaro⁵, Cecilia Clivati⁵, Federico Perini⁴, Giuseppe Maccaferri⁴, Roberto Ricci⁴, Mauro Roma⁴, Claudio Bortolotti⁴, Giampaolo Zacchiroli⁴, Juri Roda¹, 難波邦考¹, 高橋留美¹, 岡本慶大¹, 小室純一¹, 市川隆一¹, 鈴山智也⁶, 渡部謙一⁶, Julia Leute⁷, Gerard Petit⁷, Davide Calonico⁵, 井戸哲也¹

1: 情報通信研究機構 (NICT), 2: 宇宙航空研究開発機構 (JAXA), 3: 上海天文台,
4: Istituto Nazionale di Astrofisica (INAF)/ Istituto di Radioastronomia (IRA),
5: Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica (INRIM), 6: AIST/計量標準総合センター (NMIJ),
7: Bureau International des Poids et Mesures (BIPM)

1 はじめに

光周波数標準技術の急速に進展により、周波数精度は 10^{-18} の桁に達しようとしている [1]。これに伴って、現在の 1 秒を定義している Cs 原子時計 (10^{-16} 台) に代わって光周波数標準を使って SI 単位系の 1 秒を再定義することが議論されている [2]。この実現のためには、光周波数標準器間の精密周波数が必要であり、大陸間程度の長距離の周波数比較技術の一つとして、NICT は広帯域 VLBI システムと小型可搬アンテナを組み合わせ、大陸間の周波数比較技術の開発プロジェクトを進めてきた。本稿では、イタリアの天体物理学研究所 (INAF)、及びイタリア国立計量研究所 (INRIM) と共同で 2018-2019 年に実施した周波数比較 VLBI 実験と測地 VLBI の性能評価を示し、我々の広帯域 VLBI の遅延誤差について報告する。

2 新しい技術要素

NICT は、IVS の進める次世代測地 VLBI システム VGOS [3] に準拠した広帯域 (3-15GHz) の周波数を同時に受信できる受信機を開発し [4]、この広帯域データの相関処理・バンド幅合成技術 [5] を開発してきた。広帯域の観測により精度の高い群遅延を測定するには、システムの安定した線形位相特性が必要である。これを実現するための、我々の観測システムでは VGOS を含む従来の測地 VLBI 観測と異なる以下の方法を採用している。

RF ダイレクトサンプリング 10GHz 以上の広い受信帯域から、4 つのバンド (1 GHz バンド幅) の信号をデジタル信号として記録する。その際に、従来のようなアナログ周波数変換を使わず、RF 信号を 16.384 GHz の周波数で直接 AD 変換する。帯域内の任意の

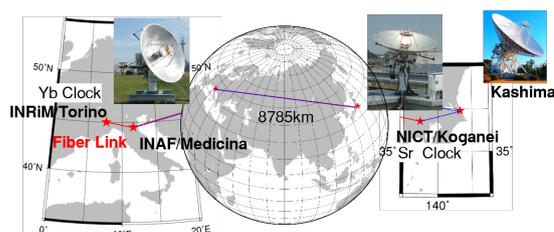


図 1: イタリア国立計量研究所 (INRIM, Torino) の Yb 光格子時計と NICT (小金井) の Sr 光格子時計の周波数比を計測するため、2018-2019 年に周波数比較 VLBI 実験を実施した。その結果、この 2 つの光格子時計の周波数比を 16 桁の精度で比較することに成功した。

周波数の 1024 Hz 幅の信号を、デジタル信号処理により周波数フィルタと周波数変換機能を実現して、1 偏波当たり 2048MHz-1bit-4ch (=8192 Mbps) でデータを取得する。アナログ周波数変換の場合には局部発振器の位相が各チャンネルごとに付加されることが避けられないが、デジタル信号処理の場合には位相を制御できるので、チャンネル間の位相関係を一定に保ち、広帯域の群遅延量を得ることができる。

天体を使った位相校正 群遅延量は、周波数に対する直位相傾斜として得られる。しかし実際には、観測システムの信号経路全体 (受信フィードから A/D 変換器まで) にわたって 2 オクターブ以上の周波数帯域を持つシステムの直線位相特性をハードウェアとして実現することは難しい。そのため、従来の VLBI 観測では、位相校正 (Pcal) 信号を受信機初段の低雑音増幅器 (LNA) から受信信号に混ぜて注入し、その位相を記録データから抽出して信号の位相から差し引くことで受信経路の位相特性、特に周波数変換に伴うチャンネル間の位相差を補正して、広帯域の群遅延計測を実現してきた。我々の広帯域システ

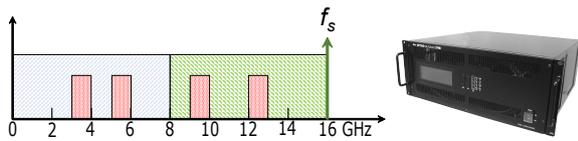


図 2: RF ダイレクトサンプリングの模式図(左)とサンプラ K6/GALAS(右)。予め Anti-alias フィルタによりナイキスト周波数の下側 (0–8,192MHz) または上側 (8,192–16,384 MHz) に帯域制限した信号を、K6/GALAS にそれぞれ 2 系統入力し、デジタル信号処理により、指定した 1024 MHz 幅の 4 チャンネル (UDP パケットストリーム) を 10GBASE-SR のインタフェースから出力する。

ムでは、Pcal 信号の代わりに天体の信号そのものを使って位相校正を行う。大きな電波強度のできるだけ構造のない天体を選び、十分な SNR が得られるだけ長時間 (10 分程度) 観測を行う (参照 Scan)。この参照 Scan の相関処理データ (位相・振幅) を使って、VLBI セッションのほかのすべての Scan の位相校正を行う。観測系が時間的に安定であれば、この方式によりセッション全体の観測データにおいて、観測システムの線形位相特性が回復され、正確な群遅延計測が可能となる。前述の RF ダイレクトサンプリング方式はシステムの安定性が高く、この位相校正法が有効に機能する。但し、こうして得られる観測遅延量及び同時に推定される電子密度 (ΔTEC) は、参照 Scan に対する相対量であるが、測地 VLBI の解析では固定遅延オフセットは推定パラメータのクロックオフセットに吸収されるため、測地解やクロックレートの推定値には影響を与えない。

併合遅延を使った仮想遅延観測量 2.4 m 直径の小型アンテナ (Node 局:A,B) 間の感度不足を補うため、大型アンテナ (Hub 局:R) を含めて観測を行い、併合遅延量を使って RA, RB の基線の遅延量の線形結合から AB 基線の仮想遅延量を算出する (Node-Hub Style(NHS) VLBI)。この仮想遅延量と実際の観測遅延量との差は、観測基線に依存した天体構造の影響を除いて一致することが理論的に示される [6, 7]。NHS VLBI の Node 間の天体構造の影響は、それを構成する 2 つの Node-Hub 間の天体構造の影響の和となる。この方法の利点は (1) 移設可能な小型アンテナで大陸間の測地 VLBI 観測が可能となる。(2) 大型 HUB 局の影響 (重力変形、ケーブル遅延など) がキャンセ

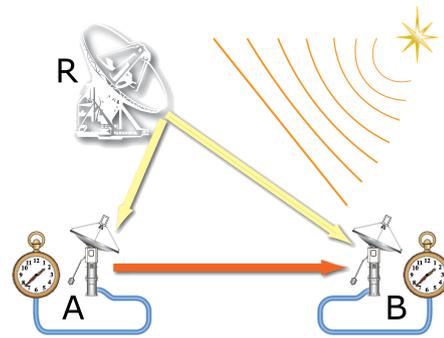


図 3: 閉合遅延を使って、小型アンテナ間 AB の仮想遅延量を RA, RB 基線の線形結合から算出して使用する。実際の観測結果と仮想遅延量は天体構造の影響を除いて一致することを示すことができる。

ルされる。(3) 電波源構造の影響は基線長に対して非線形に増加するため、HUB 局が A, B 局が間にある場合、電波源構造影響は AB 基線で実際に観測した場合より、RA+RB の方が小さくなると期待できる。

3 周波数比較/測地成果

この広帯域 VLBI システムを使って、2018.10 – 2019.02 の期間でイタリア Torino の INRIM で運用される Yb 光格子時計と NICT 小金井本部の Sr 光格子時計の周波数比較実験を実施した。Torino の INRIM の精密周波数は安定度の高いファイバリンクにより Medicina の INAF に伝送され、Medicina に設置した 2.4 m アンテナと小金井 2 号館屋上に設置した 2.4 m アンテナの間の VLBI 実験を通じて比較した (図 1)。その結果中性原子 Yb-171 と Sr-87 の光格子時計の周波数比を、 2.8×10^{-16} の不確かさで測定することに成功した [8]。また、この実験データを使った基線長の再現性 (Baseline Repeatability: BLR) を評価すると、IVS が 10m 以上の電波望遠鏡のネットワークで実施している R1, R4 セッションの平均的な値と一致し、 δL の基線長 (L) 依存性は、以下の曲線で表される [7]。

$$\delta L / \text{mm} = 4 + 0.15 \times (L / 1000 \text{km})^2 \quad (1)$$

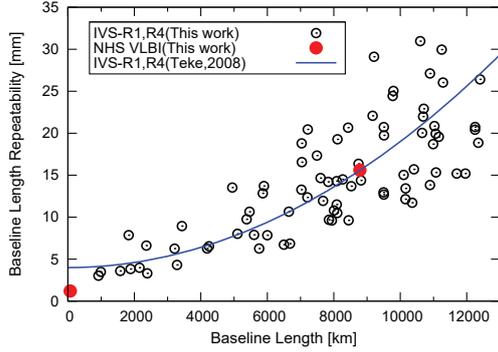


図 4: 小型広帯域アンテナの基線長再現性 (●) と IVS の R1,R4 セッションの基線長再現性 (○)。

表 1: Medicina – Koganei の間で実施した周波数比較実験 (2018.10 – 2019.02) の遅延誤差要因の評価

誤差要因	誤差 [ps]
感度	6.4
装置	12.7
電離層	1.7 – 17
大気	8.2
天体構造	33.0 – 22.0

4 誤差要素

VLBI 観測遅延量の不確かさはそれぞれ、感度に依存する誤差 $\sigma_{\tau,obs}$ 、装置 $\sigma_{\tau,inst}$ 、大気 $\sigma_{\tau,atm}$ 、電離層 $\sigma_{\tau,ion}$ 、天体構造 $\sigma_{\tau,str}$ の寄与の二乗和により

$$\sigma_{\tau,obs}^2 = \sigma_{\tau,SNR}^2 + \sigma_{\tau,inst}^2 + \sigma_{\tau,atm}^2 + \sigma_{\tau,ion}^2 + \sigma_{\tau,str}^2$$

で評価する。それぞれの誤差要因毎の寄与 (表 1) を以下のように評価した。

感度 信号対雑音比に依存する遅延精度の誤差は、有効帯域幅 EBW を使って $\sigma_{\tau} = (2\pi \cdot SNR \cdot EBW)^{-1}$ で評価される。広帯域 VLBI の場合、広い帯域のおかげでフリッジが検出されるだけで、高い遅延精度が得られる。イタリアとの実験の観測周波数 (5.5–14 GHz) の場合、有効帯域幅は $EBW=2.68$ GHz となり、仮に $SNR=10$ の場合でも 6 ps の誤差が達成される。実施した 10 セッションのすべての観測の平均誤差は 6.4 ps であった。

装置 装置に起因する遅延としては Medicina に設置した 2.4 m アンテナと観測棟の間の 600m のファイバ (温度計数 5.2×10^{-7} /K)、小金井 2.4 m アンテナの信号伝送ファイバ (50 m)、サンブラの温度特性、サンブラのジッタ、アンテナの駆動に伴う捻回ストレスはそれぞれ 7.6 ps, 1.9 ps, 10 ps, 0.2 ps, 0.5 ps と評価され、Root-Sum-Square (RSS) より、寄与は 12.7 ps と見積もられる。

大気 長距離の 1 基線観測では、共通可視域が制限されることから、アンテナの観測方位角の範囲が狭い範囲に限定され、大気の遅延を VLBI 観測データそのものから精度よく推定することが困難である。この問題に対処するため、我々はウィーン工科大学が開発した VMF3 の大気遅延モデルを使って遅延補正を行った。VMF3 は、ヨーロッパ中期予報センター (ECMWF) の数値大気データを使って電波の伝搬遅延量を波線追跡法により計算し、6 時間ごとの平均値として乾燥 (Dry)、水蒸気 (Wet) と大気勾配のそれぞれの仰角依存遅延データが公開されている [9]。広く使われてきた大気のマッピング関数 NMF と、VMF1、VMF3 を比較した結果 [10]、VMF3 が最も精度が高いと評価された。VMF3 を使った VLBI 解析の後残っている大気遅延の大きさは、遅延残差の仰角依存性より約 8 ps と評価される [7]。

電離層 従来 S/X の 2 バンドの観測の電離層遅延量は、S/X それぞれのバンドの遅延量を独立に求め、その線形結合から算出されている。広帯域 VLBI 観測では、バンド幅合成処理の中で帯域全体の相関位相の周波数依存性を使って、群遅延量 τ_g と電離層電子の柱密度差 ΔTEC を同時に推定しなければならない [5]。相関位相の周波数依存性のモデルは次式で表される。

$$\phi = 2\pi \cdot \tau_g \cdot f + A \cdot \Delta TEC / f + \phi_0 \quad (2)$$

広帯域 VLBI は S/X 観測に比べて多くの情報を持つことから、従来の方法よりも高い精度で電離層 TEC を推定できる。但し、我々の観測の場合には 2.4 m アンテナの感度の制限のため、式 (2) をフィットする位相データの精度が落ちることから、2018–2019 年の観測結果では TEC の推定誤差は 0.1–1 TECU と推定される。その結果、電離層遅延量の誤差は 1.7–17 ps 程度と見積もられる。

天体構造 VLBIの群遅延量は、電波源が構造を持たない点状であると仮定して解析されている。天体の構造の非対称により、群遅延計測が影響を受けることは従来から報告されている [11]。広帯域の群遅延計測では、これに加えて天体構造の周波数依存性により相関位相の周波数特性 (式 (2)) が乱され、群遅延 τ_g と ΔTEC の推定値に誤差をもたらす。この影響は、複数の周波数で精度の高い天体輝度分布マップを元に群遅延への影響を評価する必要がある。VGOSの広帯域 VLBI による定常的なネットワーク観測 [3] が昨年からはまったばかりであり、現在データが蓄積されつつあり、天体構造の影響の精密な評価や軽減・補正方法は将来の課題である。我々の観測においては、この影響の大きさを 22–33 ps と評価している。

謝辞

国内で唯一の VGOS に準拠した広帯域アンテナである国土地理院の方々(福崎順洋氏、若杉貴浩氏、梅井迪子氏、松本紗歩氏、上芝晴香氏、栗原忍氏、他)と石岡 13m アンテナには、システム開発のための試験観測開や、イタリアに設置したアンテナとのフリンジテストなど多大な協力をいただいた。高速研究ネットワーク JGN とその NOC(池田貴俊さんほか)の支援により、イタリアの観測データを数 Gbps の速度で鹿島に集約し、また小金井 鹿島のデータ共有・相関処理を短観で実施できた。データ伝送には JIVE の Harro Verkouter 博士の JIVE5ab を使うことでイタリアからの数 Gbps の速度でデータ伝送を行うことができた。アンテナの運用ソフトウェア (FS9)、観測スケジュールの生成 (Sked)、VLBI 解析ソフトウェア (Calc/Solve) は NASA/GSFC の開発したものを使用した。本プロジェクトに協力・貢献頂いた多くの方々に感謝する。

参考文献

- [1] W. F. McGrew et al. Atomic clock performance enabling geodesy below the centimetre level. *Nat.*, 564(7734):87–90, November 2018.
- [2] F. Riehle et al. The CIPM list of recommended frequency standard values: guidelines and procedures. *Metrologia*, 55(2):188, April 2018.

- [3] A. Niell et al. Demonstration of a broadband very long baseline interferometer system: A new instrument for high-precision space geodesy. *Radio Sci.*, 53(10):1269–1291, October 2018.
- [4] H. Ujihara et al. Development of wideband antennas. In Freymueller J. and Sanchez L., editors, *International Association of Geodesy Symposia*, volume 149, pages 25–28. Springer, Cham, September 2018.
- [5] T. Kondo and K. Takefuji. An algorithm of wideband bandwidth synthesis for geodetic VLBI. *Radio Sci.*, 51(10):1686–1702, October 2016.
- [6] M. Sekido. ‘Node-HUB’ Style VLBI with broadband system. In *IVS NICT-TDC News*, volume 37, pages 22–25, 2017. https://www2.nict.go.jp/sts/stmg/ivstdc/news_37/pctdc_news37.pdf.
- [7] M. Sekido et al. A broadband VLBI system using transportable stations for geodesy and metrology –An alternative approach to the VGOS concept–. *J. Geod.*, in printing 2021.
- [8] M. Pizzocaro et al. Intercontinental comparison of optical atomic clocks via very long baseline interferometry. *Nat. Phys.*, oct 2020.
- [9] re3data.org. *VMF Data Server; re3data.org - Registry of Research Data Repositories*, editing status 2019-01-15 edition, January 2019.
- [10] M. Sekido and N. Monia. Comparison of atmospheric delay models (NMF, VMF1, and VMF3) in VLBI analysis. In *IVS NICT-TDC News*, volume 39, page in printing, 2021. https://www2.nict.go.jp/sts/stmg/ivstdc/news_37/pctdc_news37.pdf.
- [11] P. Charlot. Radio-source structure in astrometric and geodetic very long baseline interferometry. *Astron. J.*, 99:1309–1326, April 1990.