

VLBI と原子時計

関戸 衛^{†a)}

VLBI and Atomic Frequency Standards

SEKIDO MAMORU^{†a)}

あらまし 超長基線電波干渉法 (VLBI) は, 独立なアンテナが受信した天体の信号を, コヒーレンスを保存したまま周波数変換・記録できる高い安定度を持つ水素メーザ原子時計が利用可能になったことで誕生した。本稿では, 結合型電波干渉計が VLBI となるために必要な原子周波数標準の安定度を解説し, VLBI の応用分野を概観する。また広帯域 VLBI システムを使った最近の光格子時計の大陸間周波数比較実験についても紹介する。

キーワード 超長基線電波干渉法, 周波数安定度, 原子周波数標準

1. 電波干渉計 + 水素メーザ ⇒ VLBI

光学望遠鏡も含めて, 望遠鏡の分解能は回折限界により制限され, 受光面の開口直径 D [m], 波長 λ [m] に対して λ/D [rad] で評価される。人の視力の測定も 1mm の隙間を 5m 離れた位置から 識別できる能力を視力 1 として, 分解能の逆数で定義されている。10cm 口径の光学望遠鏡が視力 25–50 に相当するのに対して, 電波望遠鏡の場合, 850GHz の受信機を持つ ALMA^(注1)でも, その素子である 12m 直径の単一の望遠鏡だけでは視力 7 に届かず, 8.4GHz で観測を行う日本最大の臼田 64m パラボラアンテナの場合, 視力 0.36 相当である。このような電波望遠鏡の分解能を改善すべく, 干渉計という方法が開発された。複数のパラボラアンテナで受信した信号を干渉 (相互相関) させることにより, アンテナ間の基線長 L [m] を直径とするパラボラアンテナ相当の高い分解能 (λ/L) を得ることができる。

ここで, 干渉計が成立するための周波数安定度について考える。アンテナ x, y で受信される信号をそれぞれ $r_x(t), r_y(t)$ として, 天体からの信号 S , 受信機等による雑音を N とする。アンテナ y には天体からの信号が τ_g だけ遅延して到達するものとする。

$$r_x(t) = S e^{j\omega t} + N_x \quad (1)$$

$$r_y(t) = S e^{j\omega(t-\tau_g)} + N_y \quad (2)$$

周波数標準源の基準信号に同期した角周波数 ω_0 の信号を局部発信機で発生し, 受信信号に掛け合わせて記録可能な低周波の信号に変換する。このとき, x, y それぞれのアンテナの局部発信機の角周波数を ω_x, ω_y と書くと

$$r'_x(t) = S e^{j\{(\omega-\omega_x)t-\phi_x\}} + N_x \quad (3)$$

$$r'_y(t) = S e^{j\{\omega(t-\tau_g)-\omega_y t-\phi_y\}} + N_y. \quad (4)$$

ここで ϕ_x, ϕ_y は, アンテナ x, y それぞれの局部発信機の付加位相を表す。相互相関

$$\text{Cor}(\tau) = \int r'_x(t) r'^*_y(t+\tau) dt \quad (5)$$

(*は複素共役) で得られる信号は

$$\text{Cor}(\tau) = \int \{S^2 e^{j\theta} + N_x N_y^* + \dots\} dt \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \theta = & (\omega_y - \omega_x)t + (\phi_y - \phi_x) \\ & - (\omega - \omega_y)(\tau_g - \tau) + \omega_y \tau_g. \end{aligned} \quad (7)$$

位相項(7)式の第3項は, 遅延を追尾した処理($\tau_g \approx \tau$)により補正され, フリンジ回転と呼ばれる第4項も実際の相関処理の中では逆回転の位相を掛け合わせて補正するので無視する。基準周波数源に同じ信号源を使用すれば ($\omega_x = \omega_y$) 第1, 2項も消えて干渉計はコヒーレンス損失なく観測できる。これが共通の基準信

[†] 国立研究開発法人情報通信研究機構電磁波研究所
National Institute of Information and Communications
Technology, Applied Electromagnetic Research Institute
Space-Time Standards Laboratory

a) E-mail: sekido@nict.go.jp

(注1): <https://www.eso.org/public/teles-instr/alma/receiver-bands/>

号をすべての干渉計素子のアンテナに供給する結合型干渉計である．結合型干渉計は，共通の信号源をすべてのアンテナに配布することが必要であるため，アンテナ間の最大距離 L は安定な信号を送ることができる距離に制限される．独立な標準信号を使って干渉計を構成した場合，(7) 式第 1-2 項の位相揺らぎを $\Delta\phi$ とし，サンプルごとに標準偏差 σ の正規分布に従って揺らぐものとする，コヒーレンスは

$$\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{-\infty}^{\infty} e^{j\Delta\phi} e^{-\frac{\Delta\phi^2}{2\sigma^2}} d\Delta\phi = e^{-\frac{\sigma^2}{2}} \quad (8)$$

で評価される．コヒーレンスを 90% 以上維持するためには $\sigma \leq \sqrt{-2\ln(0.9)} = 0.46[\text{radian}]$ が必要である．ところで，原子時計の周波数安定度を表すアラン分散 $\sigma_y^2(\tau)$ は，位相をインターバル τ での測定した位相差のデータ $\Delta\phi_{\tau,k}$, $\Delta\phi_{\tau,k+1}$ を使って

$$\sigma_y^2(\tau) = \frac{1}{2} \left\langle \left(\frac{\Delta\phi_{\tau,k} - \Delta\phi_{\tau,k+1}}{2\pi f_0 \tau} \right)^2 \right\rangle \quad (9)$$

とあらわされる．ここで $\langle \rangle$ はアンサンブル平均である．コヒーレンスを 90% 以上保った観測を行うための，必要なアラン標準偏差を見積もるため，(9) 式を変形して

$$2\pi f_0 \cdot \sigma_y \cdot \tau = \sqrt{\frac{\langle (\Delta\phi_k - \Delta\phi_{k+1})^2 \rangle}{2}} \leq 0.46 \quad (10)$$

という基準を，図 1 に水素メーザと Cs (セシウム) 周波数標準器の代表的なアラン標準偏差測定値と併せて示す．

ここで，干渉計の信号対雑音比 (SNR) について考える．通常 VLBI 観測で受信する天体の信号の電力は温度換算で $S^2 \sim 0.1\text{K}$ 程度であるのに対し，受信機雑音や大気放射等により雑音の電力 N^2 は 40 - 100K 程度で $S \ll N$ である． N_x, N_y が相関のない雑音であることから，(6) 式の相互相関の SNR は $S^2 / \langle N_x N_y \rangle$ で評価され， 10^{-3} 程度と非常に小さい．しかし，広い帯域幅 B で観測し τ 秒間の観測を平均化することで SNR を $\sqrt{2B\tau}$ 倍改善することができる．

図 1 から，水素メーザを使用することで，測地 VLBI で使用される 8.4 GHz の周波数では，原子周波数標準の安定度に関しては制限を受けることなく 1800 秒 (30 分) 以上コヒーレントにデータを平均化できることがわかる．信号の 1 チャンネル当たりの帯域幅は

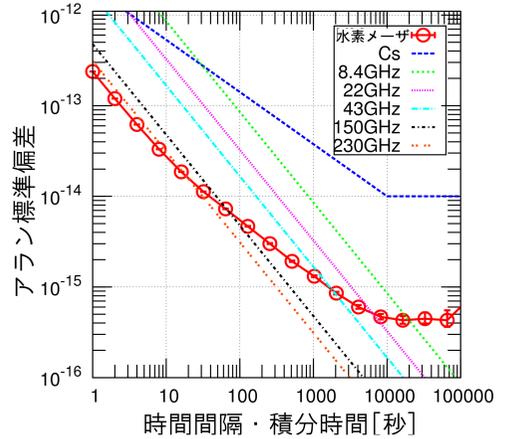


図 1 代表的な水素メーザのアラン標準偏差の測定値，高性能 Cs 周波数標準器の代表的な周波数安定度と，干渉計のコヒーレンスを 90% 維持するために必要な周波数安定度と積分時間の上限を観測周波数毎に示す．

$B \geq 2\text{MHz}$ 以上が一般的であり，4 分間の観測でも SNR は $(\sqrt{B\tau})$ 2 万倍以上改善される．ただし，干渉計の位相は，通過する大気の揺らぎによっても制限を受け，この図は原子周波数標準のみによるコヒーレンスの制限であることに注意する．また，野辺山 45m アンテナの最高受信周波数 150GHz の場合，コヒーレントな観測時間の上限が数十秒に制限されることや，ブラックホールの影を撮影した 230GHz の VLBI 観測では，ほぼ性能の限界に挑戦した極めて難しい観測であることがわかる．

こうして，周波数安定度の高い水素メーザ周波数標準器によって結合型電波干渉計の制限を取り払い，遠く離れた独立なアンテナで干渉計を構成する VLBI が可能となった．例えば，8.4GHz の周波数で行う 8000km 基線の VLBI 観測は視力約 4 万 5 千に相当する．VLBI は現在の人類が持つ最高の視力を実現する宇宙観測方法である．

2. VLBI の応用分野

2.1 電波天文学

2 局のアンテナで受信された信号の相互相関関数 (ビジビリティと呼ぶ) は，電波源強度分布の空間フーリエ周波数成分に対応し，基線が長いほど高い空間周波数成分が得られ，細かい分解能が得られる．地心から天体への方向に垂直な面に投影された基線ベクトル

(Projected Baseline) を波長単位で表した波数空間 (uv 平面) に観測で得られたビジビリティを配置し、逆フーリエ変換することで原理的に天体の電波強度分布が得られる。できるだけ uv 平面を埋めるように、数多くの基線で観測が行われるが、現実に波数空間を完全に埋める観測は不可能なため、Clean アルゴリズム、最大エントロピー法、スパースモデリング [1] などの方法で不足した波数空間を補充して天体画像を得る。観測は一つの天体当たり数分間の観測 (Scan) を単位として、校正用の天体と目標の天体を切り替えながら数時間から数日の観測データを位相合成して天体画像を得る。このような観測で原子時計に第一に要求される性能は、Scan 単位で十分な SNR を得るまでコヒーレントに合成できるための位相安定性である。

2.2 測地学・宇宙工学

測地や宇宙飛翔体の軌道決定では、数十秒～数分の Scan 単位で天体毎・基線毎の遅延量のデータを取得し、これを観測量としてアンテナ間の基線ベクトル、地球回転パラメータや飛翔体の軌道パラメータを推定する。遅延量には 2π の整数倍の不定性を伴う位相遅延量 ($\tau_{\text{phs}} = (\phi + 2\pi n)/f$) と群遅延量 ($\tau_{\text{grp}} = \partial\phi/\partial f$) があるが、VLBI の遅延解析では主に群遅延量が使用される。

VLBI 観測で得られる群遅延量は、要因ごとに分解して以下のように表現される。

$$\tau_{\text{obs}} = \tau_{\text{g}} + \Delta\tau_{\text{atm}} + \Delta\tau_{\text{clk}} + \Delta\tau_{\text{ion}} + \Delta\tau_{\text{inst}} + \tau_{\text{str}}. \quad (11)$$

それぞれ、 τ_{g} :幾何学的遅延量 (相対論効果や地球の潮汐、加重変形を含む)、 $\Delta\tau_{\text{atm}}$:大気遅延量の 2 局の差、 $\Delta\tau_{\text{ion}}$:電離層遅延量の 2 局の差、 $\Delta\tau_{\text{inst}}$:観測装置の遅延量の 2 局の差、 τ_{str} :天体電波源の構造の影響をあらわす。一つの遅延量を得るための数十秒～数分の VLBI 観測を Scan と呼び、多くの遅延データを集める連続した VLBI 観測をセッションと呼ぶ。1 セッションは数百～千点の Scan で構成され、測地 VLBI では数時間から 24 時間、後述の周波数比較実験では 30 時間程度である。VLBI の遅延解析は、観測遅延量 (o) から遅延予測値 (c :幾何学的遅延量と大気・電離層遅延量などの計算値) を差し引いた微小残差 ($o-c$) について線形の観測方程式を立て、1 つのセッション、または複数のセッションのデータを合わせて、観測局位置ベクトル、大気遅延量、原子時計のクロック差 (オフセット、変化率) などを最小二乗推定により推定する。次式は測地 VLBI の解析において基線ベクトル $\delta\vec{B}$ 、

クロックレート $\delta\dot{\tau}_{\text{clk}}$ 、クロックオフセット $\delta\tau_{\text{clk},0}$ 、2 局の天頂大気量 $\delta\tau_{\text{atm},i}$ ($i = x, y$) を推定する場合の観測方程式である。

$$\begin{aligned} \tau_{\text{rsd}} = & \frac{\partial\tau_{\text{g}}}{\partial\vec{B}} \cdot \delta\vec{B} + \delta\dot{\tau}_{\text{clk}}(t - t_0) + \delta\tau_{\text{clk},0} \\ & + \delta\tau_{\text{atm},y} \cdot m(El_y) - \delta\tau_{\text{atm},x} \cdot m(El_x). \quad (12) \end{aligned}$$

ここで $m(El)$ は天頂方向の光路長を天体方向の斜めの光路長に変換するための仰角 (El) の関数であり、マッピング関数と呼ばれる。この式から明らかなように、 $\delta\tau_{\text{atm}}$ や $\delta\dot{\tau}_{\text{clk}}$ は 複数の Scan にわたって一定であることを仮定しなければ解けない。測地や軌道決定の解析では、原子周波数標準に要求される性能は、Scan 毎に十分な SNR を得るための数分の安定度だけでなく、セッションの期間 (数十時間) の周波数安定度も必要とされる。

測地 VLBI は数千 km 離れた基線長を 1cm 以下の精度で計測することができる。1980 年代よりより実施された VLBI 観測の結果は、プレートテクトニクスを検証し、地球回転の様子を精密に計測することで地球の内部のコア、マントルに関する研究に寄与してきた。

宇宙工学の分野では、深宇宙探査機の軌道決定を目的として測地と同様に遅延量を観測量とする VLBI 観測 (DDOR:Delta Differential One-way Range) が使われている。古くから深宇宙探査機の軌道決定には、レンジ&レンジレート (R&RR) と呼ばれる観測量が用いられてきたが、この場合数日間にわたって探査機がエンジンの噴射を止めた弾道飛行を行う必要がある。VLBI は天球上の位置に高い感度を持つため R&RR と併用すると 3 次元的な位置が短時間で精度良く決定できる。2014 年に打ち上げられた小惑星探査機 ‘はやぶさ 2’ で使われているイオンエンジンは燃費が良い代わりに大きな推力が出せないため、長い期間噴射を続ける必要があり、軌道決定のたびにエンジンを止めることは大きな制約となる。そこで JAXA/ISAS は NASA と協力して VLBI 観測を R&RR 観測と併用する方法でイオンエンジンを噴射し続けたまま精密軌道決定を行い、小惑星 ‘りゅうぐう’ への誘導に成功している [2]。

3. 広帯域 VLBI と光原子時計の精密周波数比較

光周波数標準器の研究開発が進展し、現在時間の単位 ‘1 秒’ をより高い精度で定義する Cs に代わる、候

補となる原子遷移周波数の推奨値 (CIPM LoF: List of recommended frequency standard values) が提案されている [3]。これらの周波数を確認するため、様々な方法で異なる研究機関の間で原子遷移周波数の比較が行われている。光ファイバーリンクによる周波数伝送が最も精度が高いものの敷設距離の制限があり、大陸間距離での周波数比較を実現可能な方法には衛星双方向 (TWSTFT) や GNSS 衛星, VLBI 観測といった宇宙測地技術を利用する方法がある。TWSTFT は通信衛星を介して地上 2 地点から信号を送り合うことによって時刻・周波数を比較する。この方法は信号が通過する大気の影響を校正できるというメリットがある一方、衛星のトランスポンダ借用費や電波の送信免許などの手続き、使用可能な通信衛星の配置による制約などがある。GNSS 衛星の観測は比較的安価で自動観測が可能のため広く使用されているが、弱点としては遅延精度を上げるために使用している搬送波位相の波数の不定性や、天球を動く衛星軌道に依存するという点がある。

NICT では移設可能な小型アンテナを使って大陸間の周波数比較が可能な広帯域 VLBI システムを構築している。広帯域 VLBI システムでは、10GHz の広い帯域を使って群遅延量を高精度に不定性なく測定でき、基準としている電波源が不動の天球基準座標系の天体であることなどから、長期安定性に優れている。NICT の VLBI システム (GALA-V) は、新しい要素技術 (a) 3.2-14 GHz の受信帯域を持つ比帯域 120% 以上の超広帯域受信機 [4], (b) RF-Direct Sampling 方式によるアナログ周波数変換を伴わないデータ取得 [5], (c) 小型アンテナで大陸間基線の VLBI を可能にする Node-Hub 方式の VLBI 観測を特徴とする [6], 2018 年から、イタリアの国立計量研究所 (INRiM) と NICT (東京都小金井市) の間でそれぞれが運用する Yb (イッテルビウム) と Sr (ストロンチウム) 光格子時計の周波数を、8700km 基線の VLBI 観測により精密比較する実験を開始した。この実験では、図 2 に示すように複数の水素メーザを介して Sr と Yb の周波数比較を実現する。2018 年 10 月から 2019 年 2 月までの間に行った 10 回の VLBI 観測により Sr/Yb の周波数比を測定し、ノミナルな値 (CIPN LoF) に対して 10^{-16} 台前半の誤差で一致する結果が得られている [7]。

GALA-V と同様の広帯域 VLBI システムは、国際 VLBI 事業 (IVS) が次世代の測地 VLBI システ

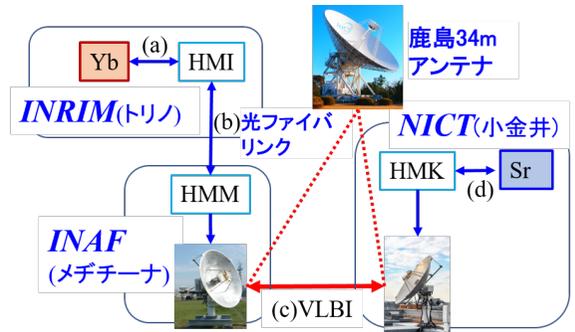


図 2 Sr (NICT) と Yb (INRiM) の光格子時計の周波数リンク経路のブロックダイアグラム。周波数リンクは複数の水素メーザ (HMI, HMM, HMK) と各原子時計間の周波数 (a, b, d) と、時間領域の比較 (c) を介して実現される。区間の長い INRiM (イタリア国立計量研究所, Torino) と INAF (イタリア国立天体物理研究所, Medicina) はファイバーリンクにより伝送, INAF (Medicina) と NICT (小金井) 間は、双方に設置された 2.4m 小型 VLBI アンテナによる VLBI 観測を通してリンクされる。VLBI 観測には大型 VLBI 局 (NICT 鹿島 34m) が観測に参加し、SNR を向上させている。

ム (VGOS: VLBI Global Observing System) [8] として推進し、各国で設置がすすめられている。世界の VGOS 局と協力した観測を行うことができれば、VLBI による多地点間の周波数比較も実現可能である。

一般相対論によれば重力ポテンシャルの差 ΔU は時間の進み方を $\Delta U/c^2$ の割合で変化させる。光周波数標準の周波数精度は 10^{-18} 台に達しており、周波数差を計測することで地上の高さに換算した重力ポテンシャルの変化を cm 精度で検出することができると期待されている。一方、太陽・月の潮汐や大気・海洋の荷重により地球の表面は数十 cm の上下変動があり、正確な周波数の測定には、正確な重力ポテンシャルの情報が必要となっている。今後、精密周波数計測と測地学はますます連携した研究が求められる。

謝辞 第 3 節に紹介した広帯域 VLBI を使ったプロジェクトは、国内では NICT, 産総研 / 計量標準総合センター, 国土地理院と超高速研究開発ネットワークテストベッド JGN, およびイタリアの INRiM, INAF の協力により実施されている。

文 献

- [1] Mareki HONMA, Kazunori AKIYAMA, Makoto UEMURA, and Shiro IKEDA, "Super-resolution imaging with radio interferometry using sparse modeling", Publ. Astron. Soc. Japan, Vol. 66 No.5, pp.1-14, 2014.

- [2] 竹内 央, “DDOR 技術によるはやぶさ 2 と Ryugu の同時軌道決定”, 第 17 回 IVS 技術開発センターシンポジウム, 2019 年 6 月 27 日, NICT 鹿島宇宙技術センター, 2019.
- [3] Fritz Riehle, Patrick Gill, Felicitas Arias and Lennart Robertsson, “The CIPM list of recommended frequency standard values: guidelines and procedures”, *Metrologia*, 55, 188-200, 2018.
- [4] H. Ujihara, K. Takefuji, M. Sekido, and R. Ichikawa, “Development of wideband Antennas”, International Symposium on Advancing Geodesy in a Changing World, APR 2019, doi: 1345_2018_41
- [5] K. Takefuji, T. Kondo, M. Sekido, T. Kumazawa, K. Harada, T. Nakayama, S. Kurihara, K. Kokado, R. Kawabata, and R. Ichikawa, “High-order Sampling Techniques of Aliased Signals for Very Long Baseline Interferometry”, *PASP*, Vol. 124., pp.1105-1112, 2012.
- [6] 関戸 衛, 岳藤 一宏, 氏原 秀樹, 近藤 哲朗, 堤 正則, 宮内 結花, 川合 栄治, 瀧口 博士, 長谷川 新吾, 市川 隆一, 小山 泰弘, 花土 ゆう子, 渡部 謙一, 鈴山 智也, 川畑 亮二, 福崎 順洋, 石本 正芳, 若杉 貴浩, 梅井 迪子, 豊田 友夫, 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, “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*, Vol.63, No.3, pp.157-169, 2018.
- [7] Pizzocaro, M., M. Sekido, N.Nemitz, H. Hachisu, D. Calonico, T. Ido, “Intercontinental comparison of optical atomic clocks via very-long-baseline interferometry”, *in preparation*.
- [8] Niell, A., J. Barrett, A. Burns, R. Cappallo, B. Corey, M. Derome, C. Eckert, P. Elosegui, R. McWhirter, M. Poirier, G. Rajagopalan, A. Rogers, C. Ruszczyk, J. SooHoo, M. Titus, A. Whitney, D. Behrend, S. Bolotin, J. Gipson, D. Gordon, E. Himwich, and B. Petrachenko, “Demonstration of a Broadband Very Long Baseline Interferometer System: A new Instrument for High-Precision Space Geodesy”, *Radio Science*, 53. <https://doi.org/10.1029/2018RS006617>, 2018.

(xxxx 年 xx 月 xx 日受付)



関戸 衛 (正員)

平元大阪大・工・電子卒. 平 3 同大学院博士前期課程了. 平同年郵政省通信総合研究所入所. 以来, VLBI の応用技術 (パルサー位置天文, 宇宙機の VLBI ナビゲーション, e-VLBI, 周波数比較) に関する研究に従事. 現在, 情報通信研究機構電磁波研究所時空標準研究室副室長. 博士 (学術).

Abstract Very long baseline interferometry (VLBI) has been established owing to development of Hydrogen maser frequency standard, which has high frequency stability enabling coherent frequency conversion and recording of observed electromagnetic signals between independent radio telescopes. This paper describes the stability of frequency standards required to make connected element interferometer to VLBI. Overview of VLBI applications are briefly explained. Especially, recent experiments of precise frequency transfer of optical lattice clock over 8700 km distance with broadband VLBI is mentioned as one of the applications.

Key words VLBI, Frequency-Stability, Atomic-frequency-standard.