

# 広帯域VLBIシステムによる大陸間周波数比較実験 ~光格子時計の周波数リンク~

## Intercontinental Frequency Transfer by Broadband VLBI -Frequency Link of Optical Lattice Clock-

関戸 衛<sup>(1)</sup>, 岳藤一宏<sup>(2)</sup>, 氏原秀樹<sup>(1)</sup>, 近藤哲朗<sup>(1)</sup>, 蜂須英和<sup>(1)</sup>, Nemitz Nils<sup>(1)</sup>, 井戸哲也<sup>(1)</sup>, Pizzocaro Marco<sup>(3)</sup>, Calonico Davide<sup>(3)</sup>, Negshini Monia<sup>(4)</sup>, Perini Federico<sup>(4)</sup>, 堤正則<sup>(1)</sup>, 宮内結花<sup>(1)</sup>, 川合栄治<sup>(1)</sup>, 長谷川新吾<sup>(1)</sup>, 小室純一<sup>(5)</sup>, 難波邦考<sup>(5)</sup>, 高橋留美<sup>(5)</sup>, 岡本慶大<sup>(5)</sup>, 寺田健次郎<sup>(5)</sup>, 池田貴俊<sup>(6)</sup>

NICT 時空標準研究室

1: 時空標準研究室, 2: JAXA, 3: INRiM (Italy), 4: INAF (Italy), 5: 情報通信システム室, 6: KDDI研究所

関戸 衛

### 1. 概要

光格子時計の精度は目覚ましく向上しており、18桁の精度を達成しつつある。世界各国で開発されている光周波数標準器の間で精密な周波数比較できる技術が求められており、我々は広帯域VLBIによる新しい周波数比較技術を開発している。2018年から2019年にかけてイタリア国立計量研究所 (INRiM)、及びイタリア国立天体物理研究所 (INAF) と共同で行ったVLBIによる周波数比較実験の結果について報告する。

**【結果】**約9000 km離れたINRiMの運用するYb(イッテルビウム)光格子時計とNICTの運用するSr(ストロンチウム)光格子時計の周波数比を、VLBI観測により比較した結果、ノミナルな値との差は $1.2(3.3) \times 10^{-16}$ の結果が得られ、誤差の範囲内でノミナルな値と一致することが確認された。他の長距離周波数比較方法と比べても、このような大陸間の光格子時計の比較としては最も良い結果が得られている。

#### 【実験の詳細】

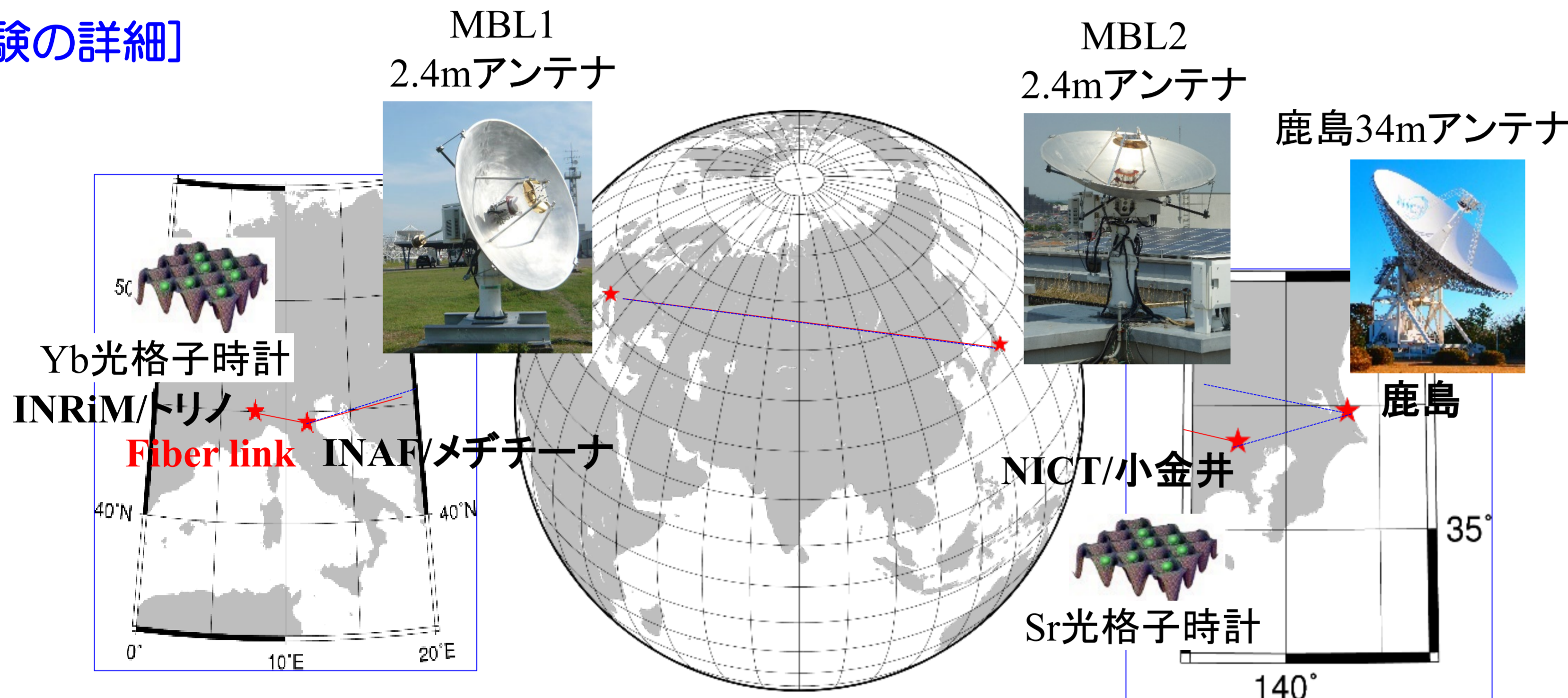


図1. トリノ (イタリア) - 小金井 (日本) のYbとSrの光格子時計の比較を、VLBI観測よりリンクする実験の概容。INRiM(トリノ)から光ファイバリンクにより安定な周波数がINAF(メチチーナ)に伝送されており、メチチーナと小金井それぞれに設置した2.4m直径の小型広帯域アンテナペアによる8700kmのVLBI観測で、小金井のSr光格子時計との周波数比較ができる。鹿島34mアンテナはVLBI観測に参加して小型アンテナ間のVLBI観測の感度をブーストする役割を果たす。

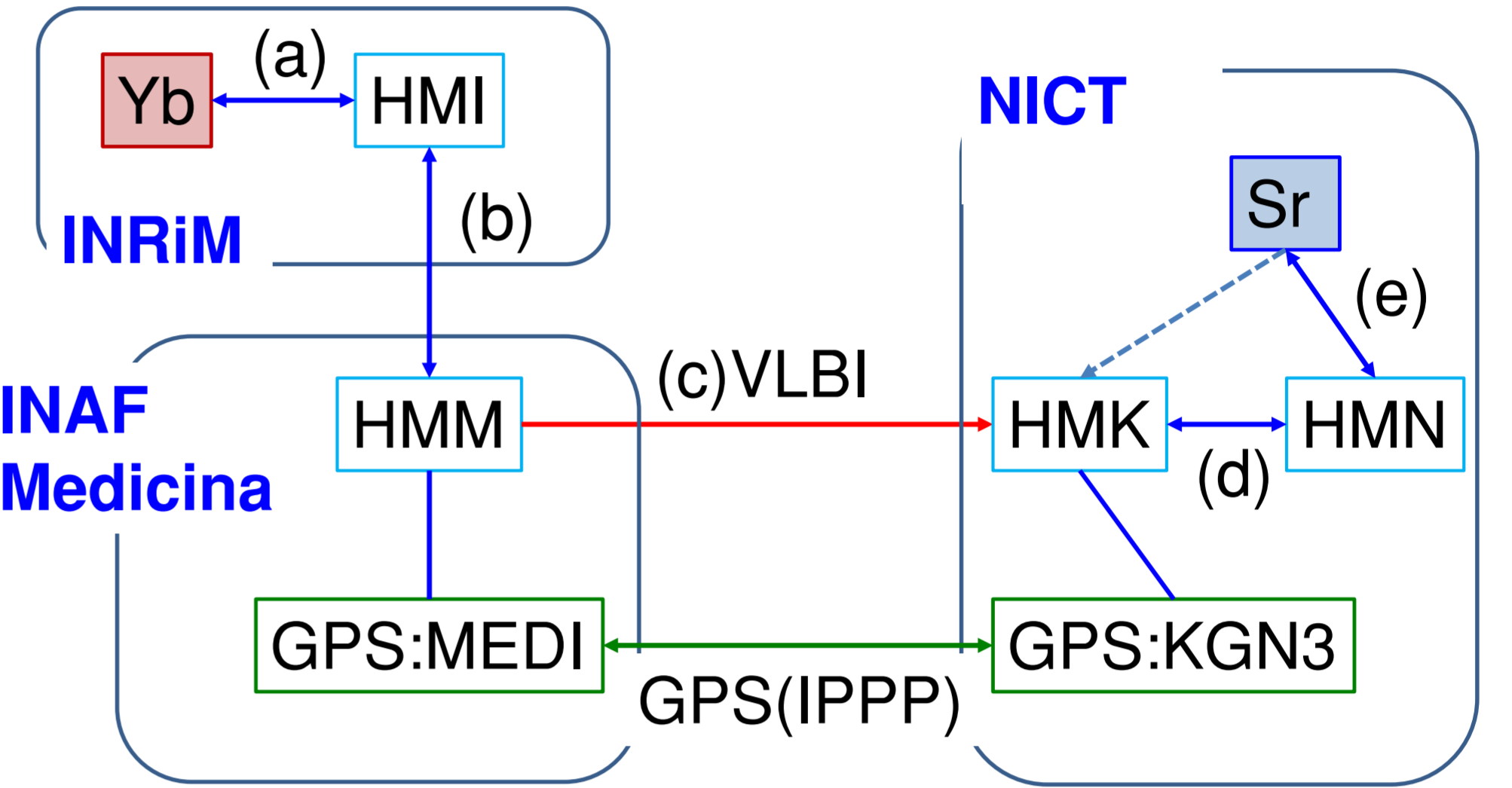


図2. 光格子時計は数時間の運転を間欠的におこなうため、周波数を維持するFlywheelとして水素メーザを使用する。(b)は550kmのファイバリンク(c)は8700kmのVLBIリンク。VLBIの周波数比較精度を検証するためGPS (IPPP)によるリンクも同時に取得した。

表1. 図3の10回のVLBI周波数リンク実験の結果を平均した結果のまとめ。同時に測定したGPS (IPPP) (G.Petit氏@BIPMによる)を使ったリンク結果も比較のため示している。

	Sr/Yb 周波数比の差	不確かさ	1回の測定誤差	測定回数
VLBI	$1.8 \times 10^{-16}$	$3.3 \times 10^{-16}$	$9.8 \times 10^{-16}$	10
IPPP	$3.5 \times 10^{-16}$	$4.0 \times 10^{-16}$	$1.1 \times 10^{-15}$	9

### Sr/Yb fractional frequency difference

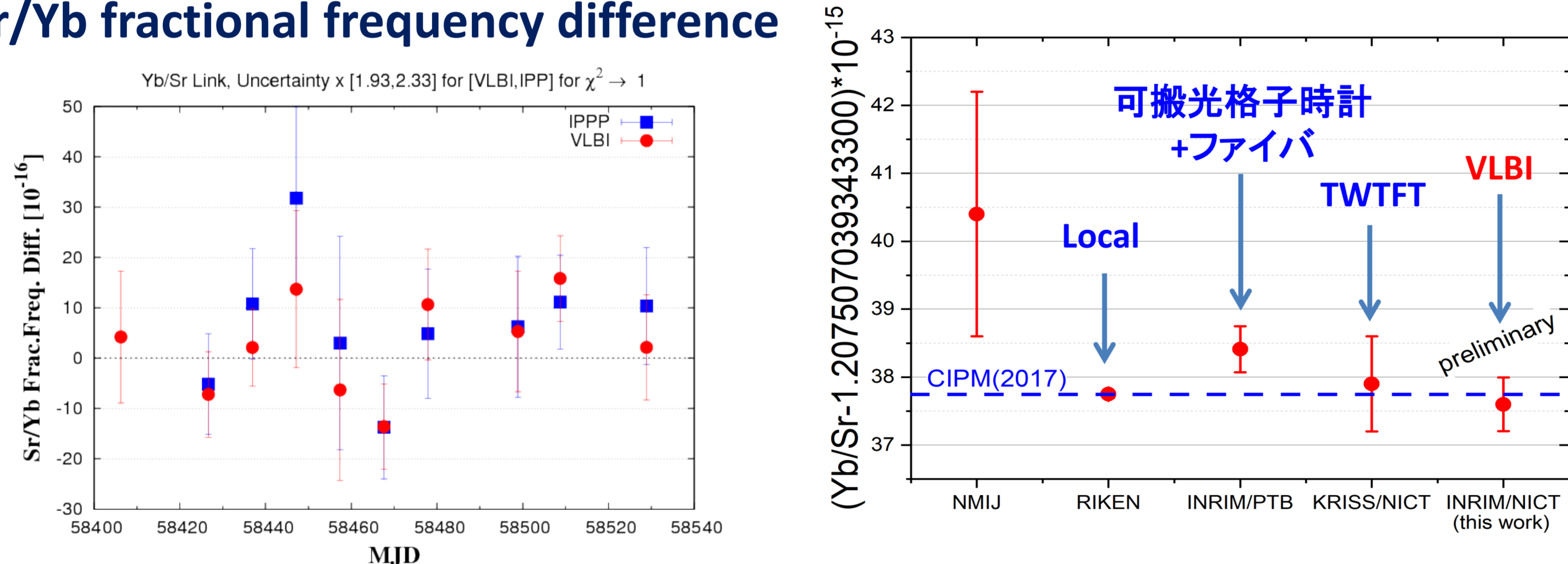


図3. 2018年10月より2019年2月まで10回のVLBI周波数リンク実験を行い、Yb-Srの周波数比をノミナルの周波数比からのずれを核実験ごとにプロットした(左)。これらの10回の実験結果を平均した結果(表1)を過去のSr-Yb周波数比の測定結果と比較した図(右)

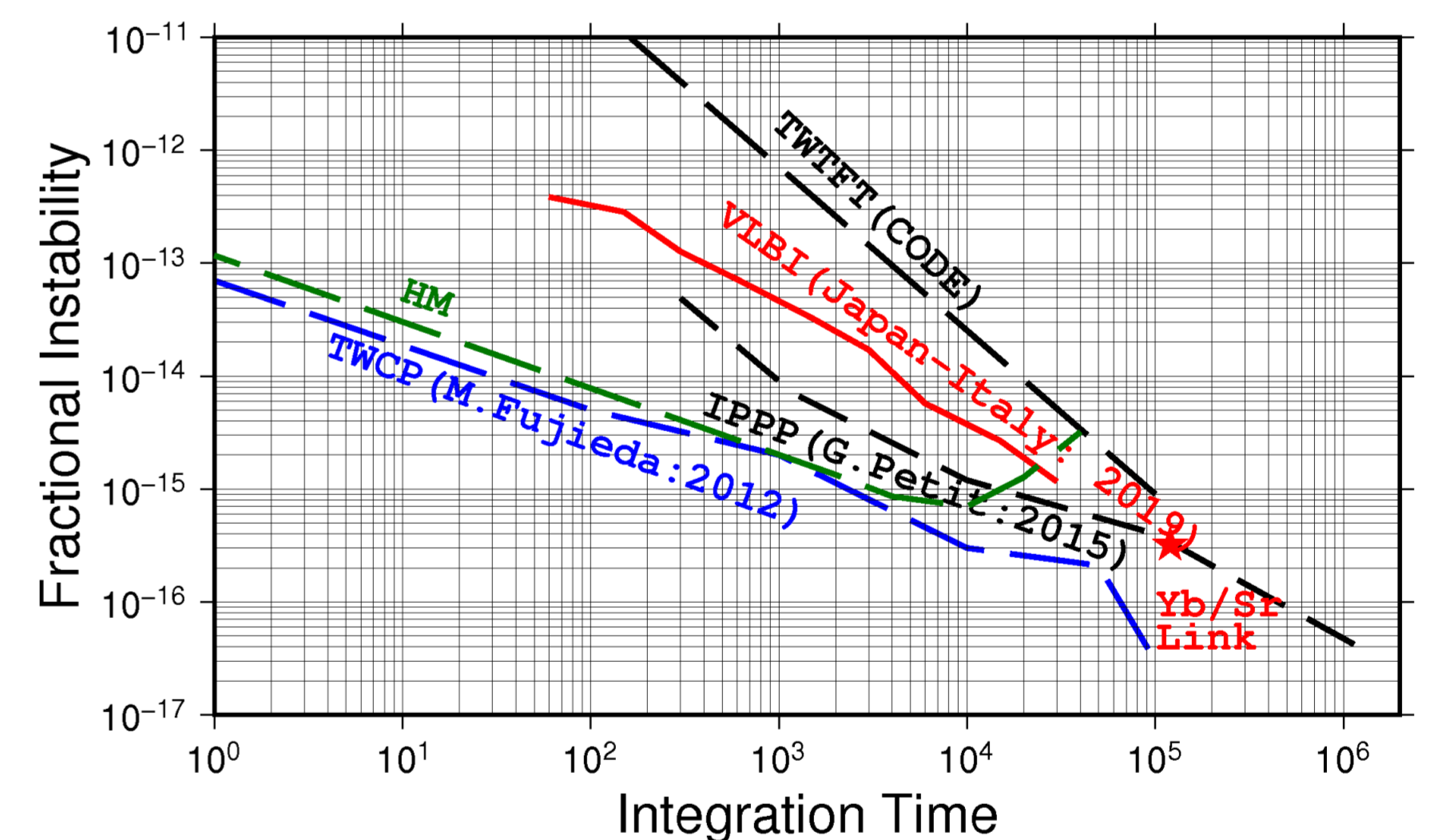


図4. 長距離周波数比較方法 (GPS (IPPP), TWFTなど) のなかで今回のVLBIによる周波数リンクの性能をプロットした。

## 2. 手法・特徴

- 1) **広帯域(3-14 GHz) VLBIシステム**による超広帯域観測により、遅延計測精度は従来の10倍改善し、可搬小型アンテナ間で大陸間VLBI観測が可能となった。
- 2) **RFダイレクトサンプリング**手法により、早い段階でデジタルデータに変換し、デジタル周波数変換・フィルタリング、により広帯域の位相安定性がある。
- 3) **閉合遅延を活用した大型アンテナとの共同観測**：小型アンテナ間の遅延量を、大型-小型の基線データから算出する。小型アンテナの感度不足分を大型アンテナとの共同観測により補う。

### 超広帯域観測システム

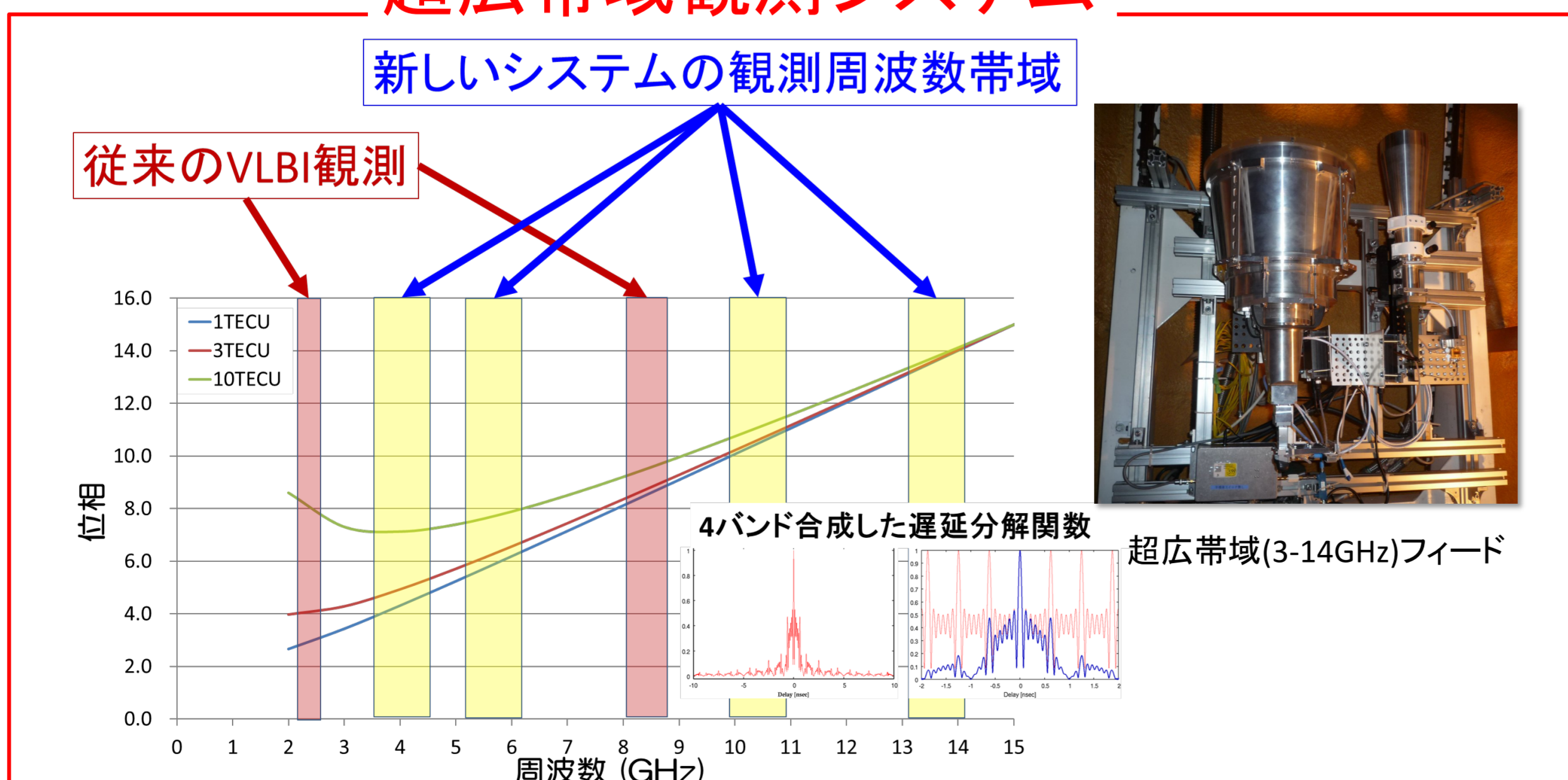


図5. 従来に比べ周波数幅が10倍の超広帯域観測を実現。カセグレンフォーカスに設置可能な超広帯域フィードは世界初。

### ダイレクトサンプリング

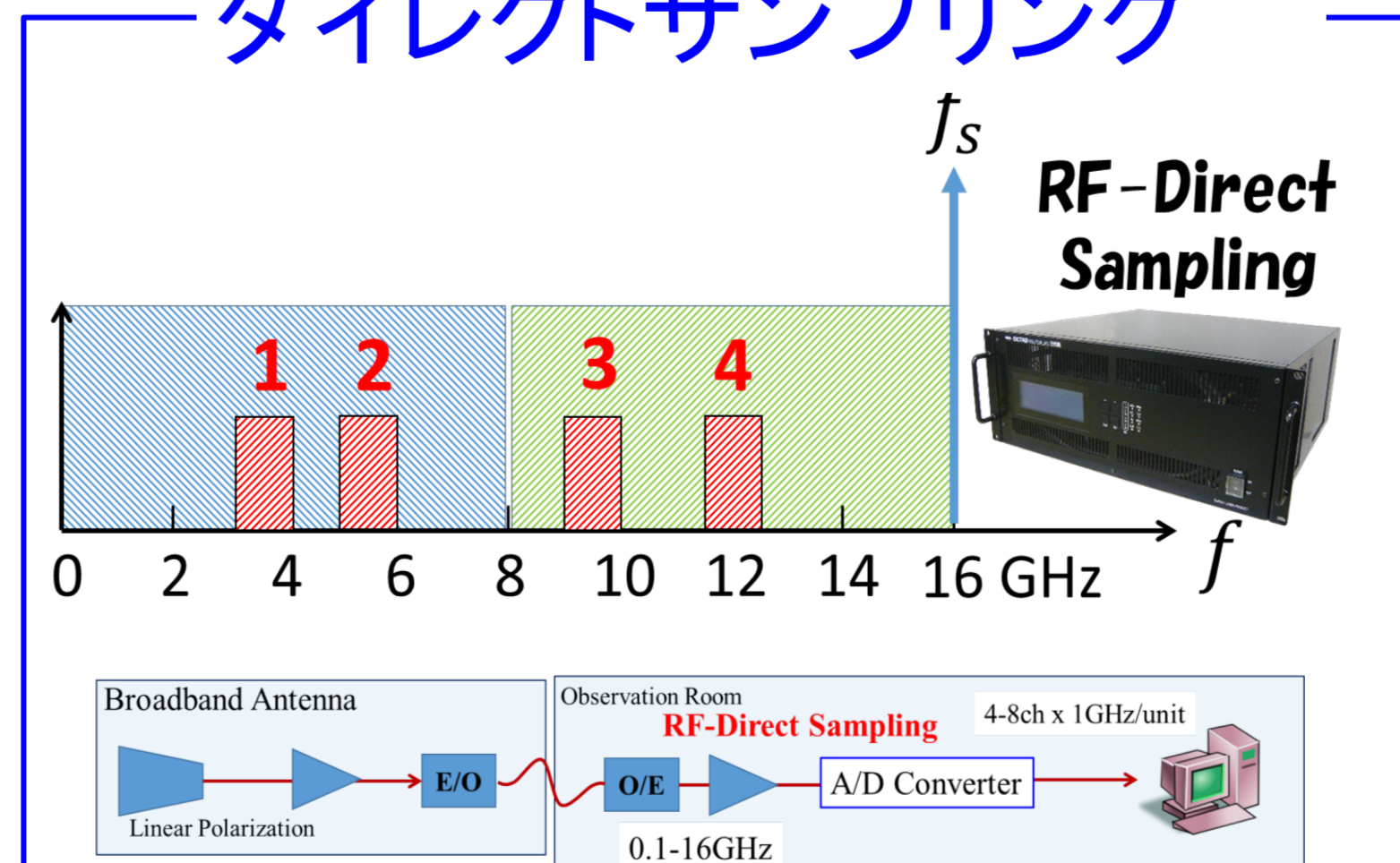


図6. アナログ周波数変換なし。RF信号を増幅し、直接サンプリング(AD変換)することにより、帯域間の位相差、位相特性が安定し、超広帯域の遅延精密計測が可能。システムが簡略される利点もある。

### Node-Hub閉合遅延方式

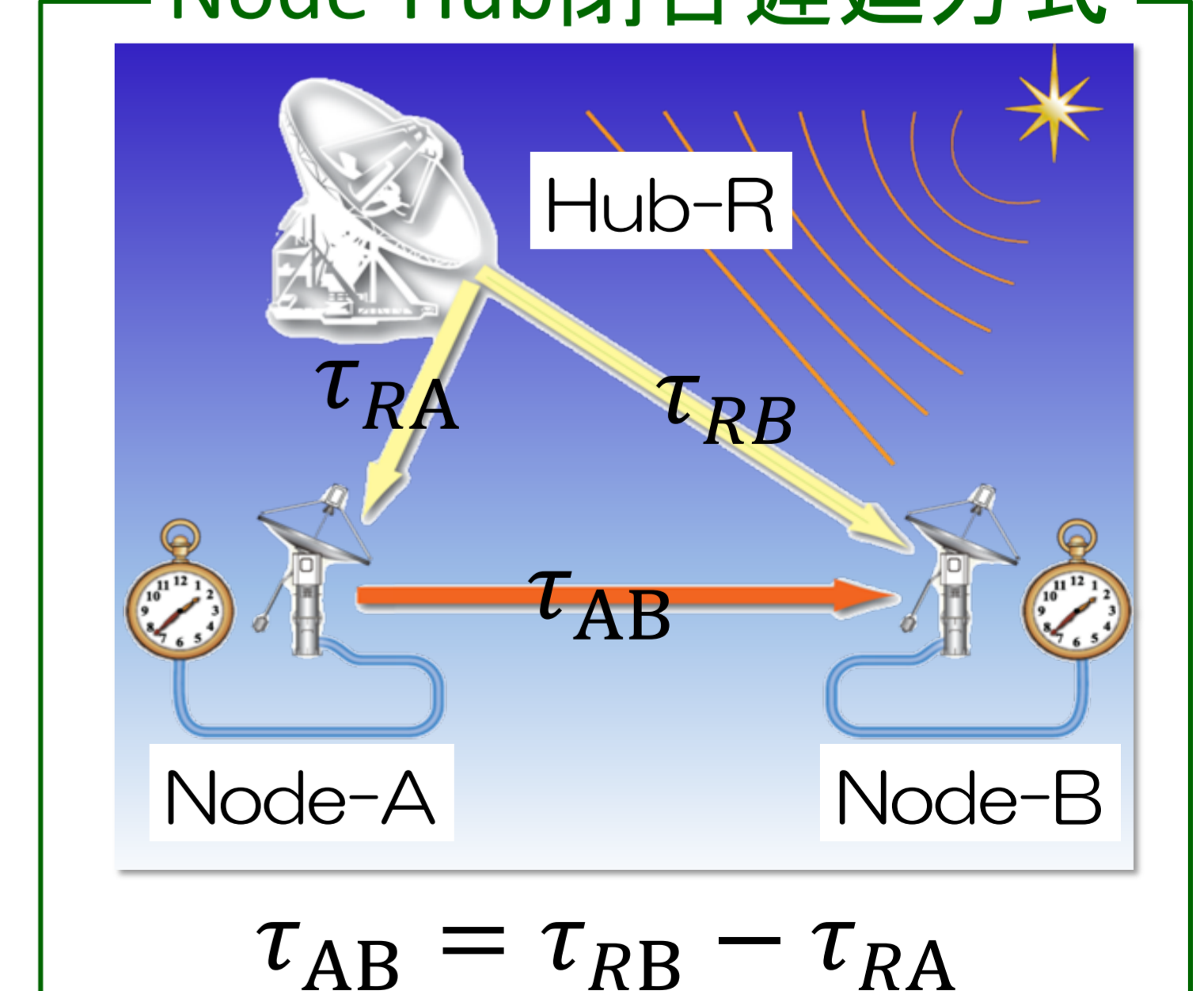


図7. 大型のHub局に対して複数のNode局が同時にVLBI観測を行い、閉合遅延により、観測が成立しないNode局AB間の遅延量をRA, RB基線の遅延量から算出できる。大型Hubアンテナの重力変形などの影響は相殺される。