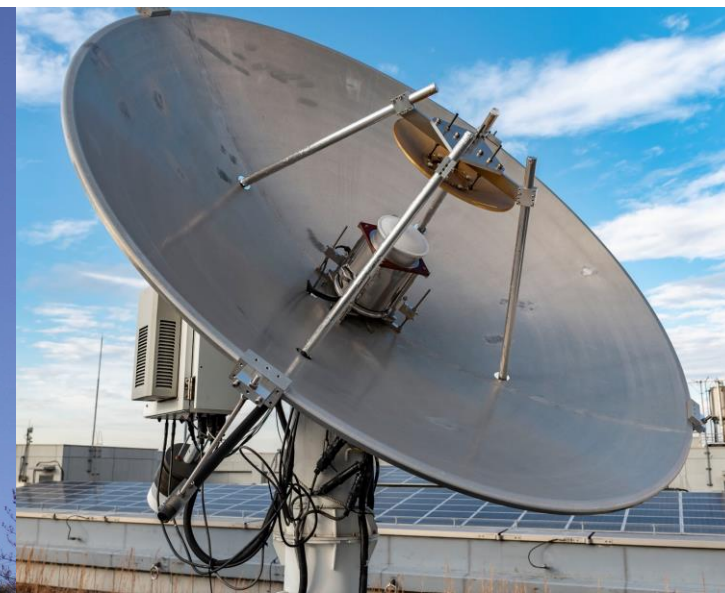


広帯域・小型VLBIによる光格子時計の長距離周波数比較・測地 -誤差要因の検討と展望-

関戸衛, 岳藤一宏, 氏原秀樹, 近藤哲朗, Nils Nemitz, Monia Negusini, 堤正則,, 川合栄治, 蜂須英和, Marco Pizzocaro, Cecilia Clivati, Federico Perini, Giuseppe Maccaferri, Roberto Ricci, Mauro Roma, Claudio Bortolotti, Giampaolo Zacchioli, Juri Roda, 難波邦考, 高橋留美, 岡本慶大, 小室純一, 市川隆一, Julia Leute, Gerard Petit, Davide Calonico, 井戸哲也



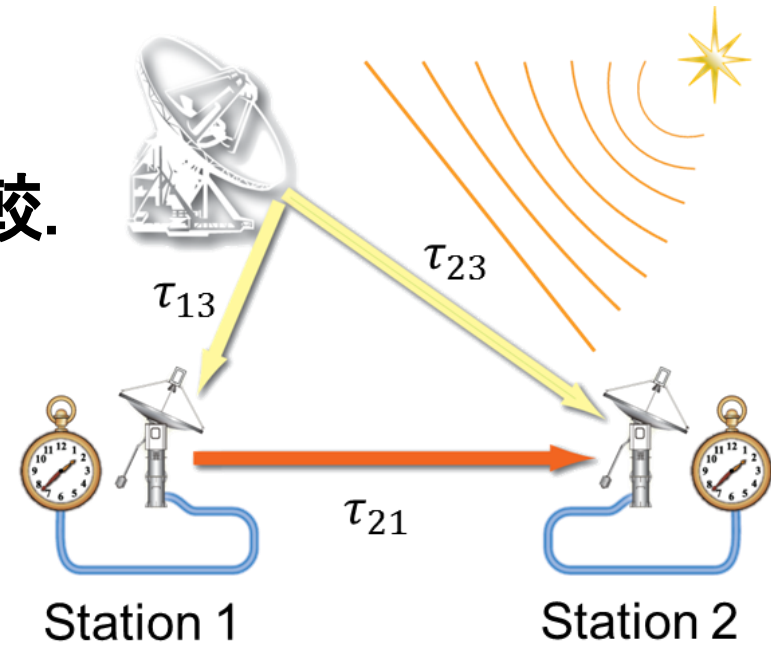
謝辞

- G.Cerretto, F.Bregolin, F.Levi, A.Mura, E.Cantoni, P.Barbieri, A.Tampellini (INRiM), G.Maccaferri, C.Bortolotti (INAF),
- 鈴山智也、渡部謙一 (産総研)、福崎順洋、栗原忍、若杉貴浩、上芝晴香、松本沙歩、梅井迪子、他 (国土地理院)
- 研究ネットワーク [JGN](#), [GARR](#), [GEANT](#), [Internet2](#), and [TransPAC](#), __データ伝送ソフト [JIVE5ab](#) by [H.Verkoeter](#) ([JIVE](#))
- [NASA/GSFC](#)のVLBI 解析ソフト [Calc/Solve](#), アンテナ制御ソフト [Field System9](#), スケジュールソフト [Sked](#).

GALA-V Project Overview

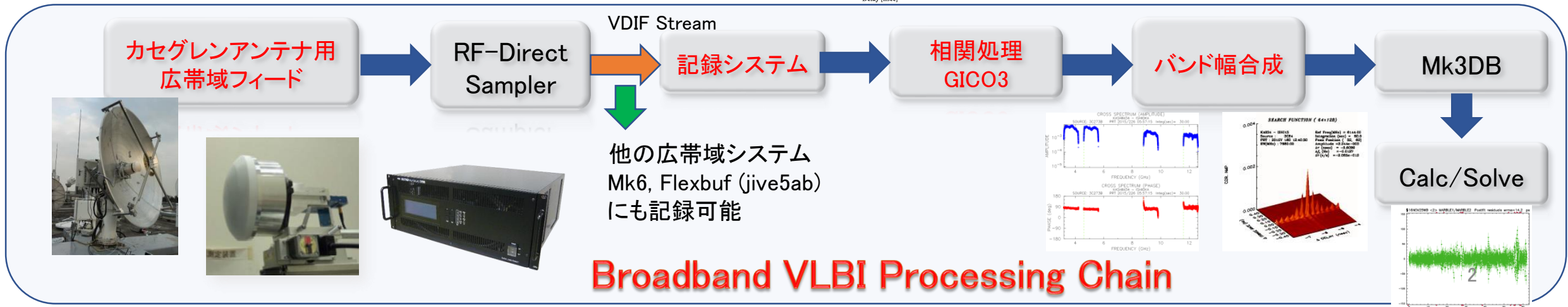
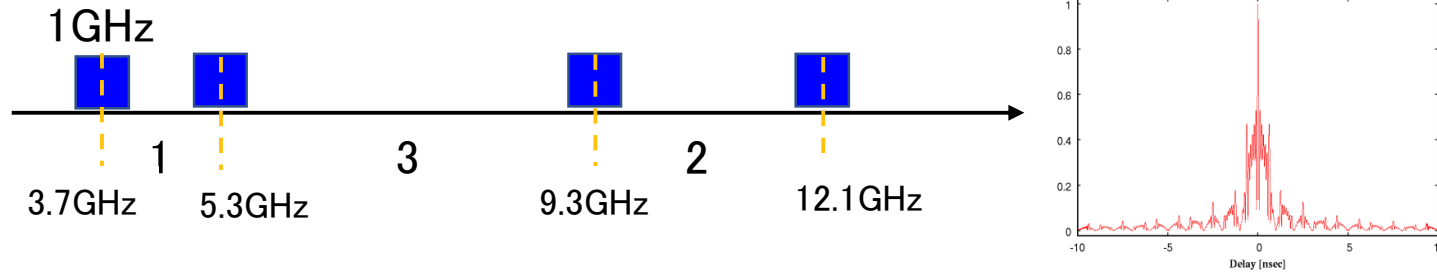
可搬型・広帯域VLBI による大陸間の精密周波数比較.

- 観測周波数: 3.2-14 GHz (ほぼVGOS 互換)
- データ取得: 4 band (1024MHz 幅/band)
 - 有効帯域幅: 2.7GHz (従来システムの約10倍) → 一桁高い遅延計測精度
 - 絶対遅延量計測 (Ambiguityなし)



$$\tau_{21} = \tau_{13} - \tau_{23}$$

閉合遅延を使った遅延処理



本発表の内容

1. 技術的開発内容

1. **可搬型(2.4m)広帯域**VLBIシステム + **Node-Hub Style (NHS) VLBI**
(閉合遅延関係を使った仮想遅延)

2. 得られた成果

- **[周波数比較]** 約9000kmの距離にある光格子時計(Yb/Sr)の周波数比を精密測定 $\gamma(\text{Yb/Sr})=2.5(2.8)\times 10^{-16}$
- **[測地]** 2.4mアンテナペアの観測でIVS観測と同等の基線長再現性
(1.2mm@88km, 1.5cm@9000km)

3. 誤差要因

- 主要誤差要因: 電離層遅延、天体構造

← NHS-VLBI 方式により改善の可能性

技術的特徴1: 'Node-Hub Style' VLBI

閉合遅延関係を使って、観測していない基線の遅延を得る。

$$\tau_{21}^{NHS}(t_1) = \tau_{23}(t_1) - \tau_{13}(t_1) + \tau_{13}(t_1)\dot{t}_{21}(t_1)$$

$$\tau_{21}^{NHS} - \tau_{21}^{\text{true}} = (\tau_{31}^{\text{str}} + \tau_{23}^{\text{str}}) - \tau_{21}^{\text{str}}$$

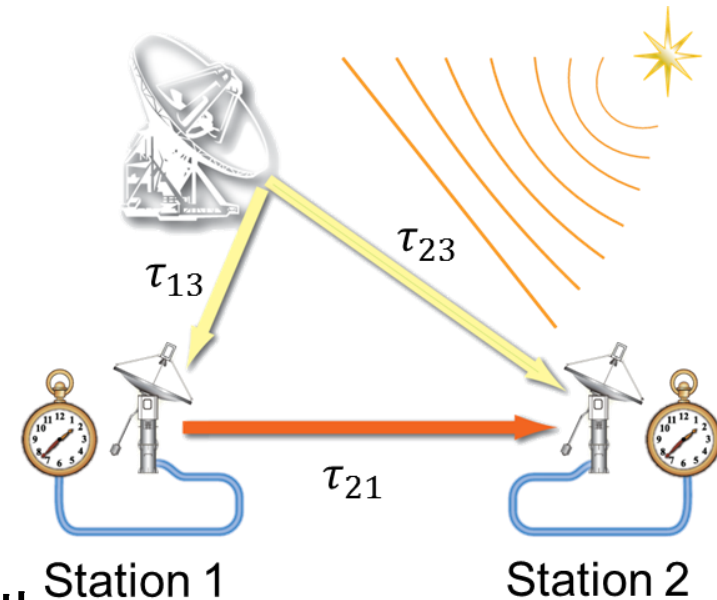
VLBI観測のSN比(SNR)はアンテナ口径の積に比例する

$$\text{SNR} \propto S D_1 D_2 \sqrt{\frac{\eta_1}{T_{\text{sys1}}} \cdot \frac{\eta_2}{T_{\text{sys2}}}}$$

D_n : 直径
 S : 天体のフラックス
 η_n : 開口効率
 T_{sys} : システム雑音温度

- 大型アンテナの**重力変形**、**ケーブル温度変動**などはキャンセル
- **可搬型・広帯域・小型アンテナ**を必要なところに設置・運用
- 天体構造の影響を低減する手法として効果がある

なぜなら、一般に $(\tau_{31}^{\text{str}} + \tau_{23}^{\text{str}}) < \tau_{21}^{\text{str}}$.



技術的特徴2: Broadband と RF-Direct Sampling

• 広帯域フィード

- 既存のアンテナを広帯域化



• 広帯域バンド幅合成 (BWS)

- 従来の S/X VLBI: 1GHz中を 16MHz x 10 ch

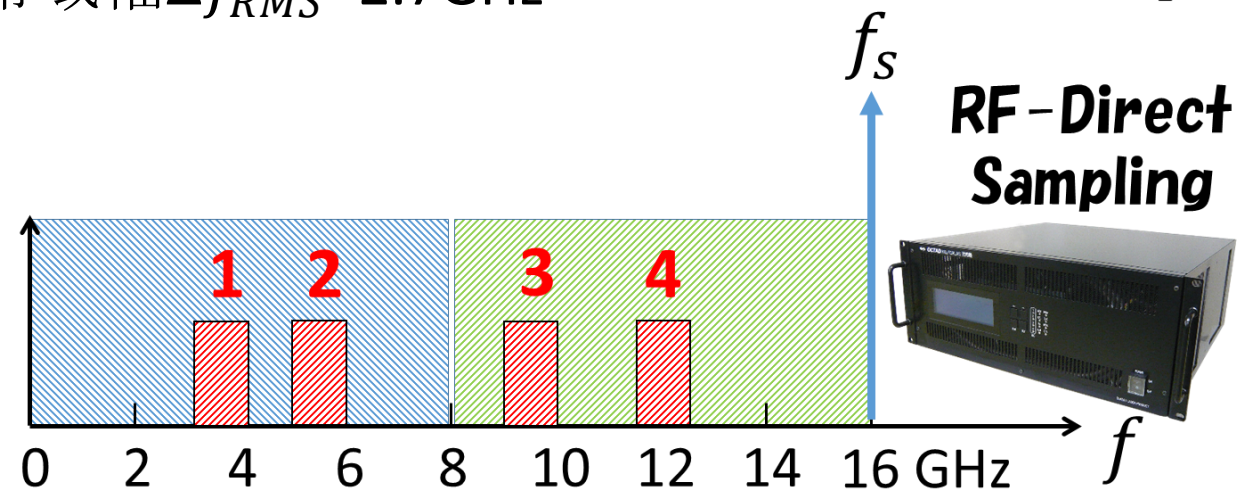
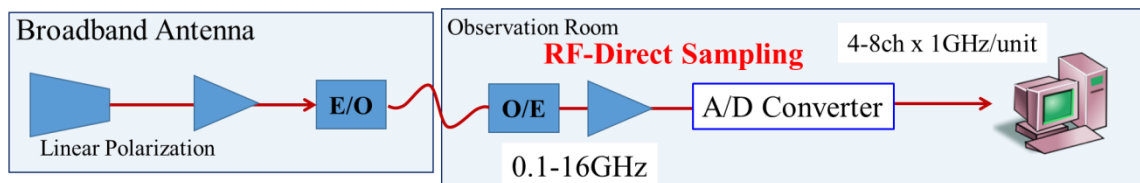
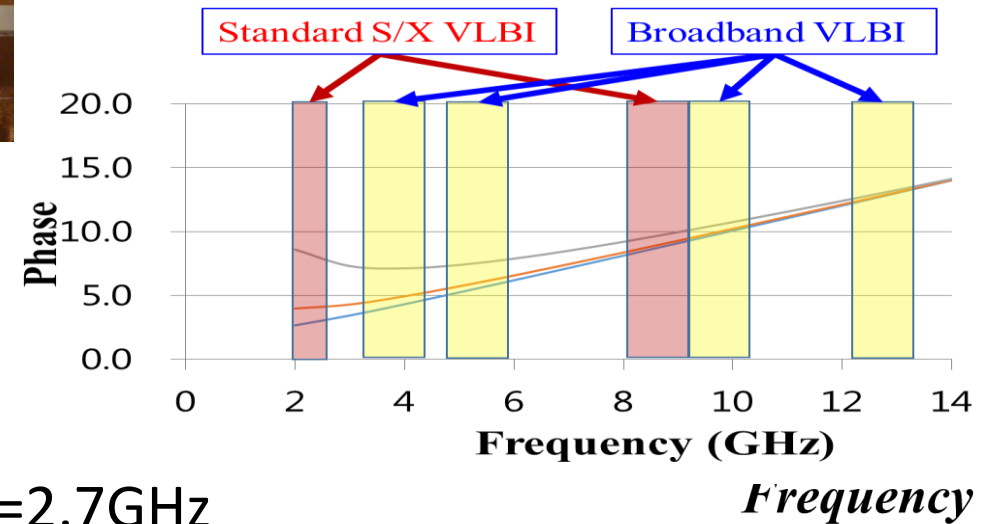
有効帯域幅 $\Delta f_{RMS} = 150 \sim 300 \text{ MHz}$

- Broadband VLBI, 3-14GHz range

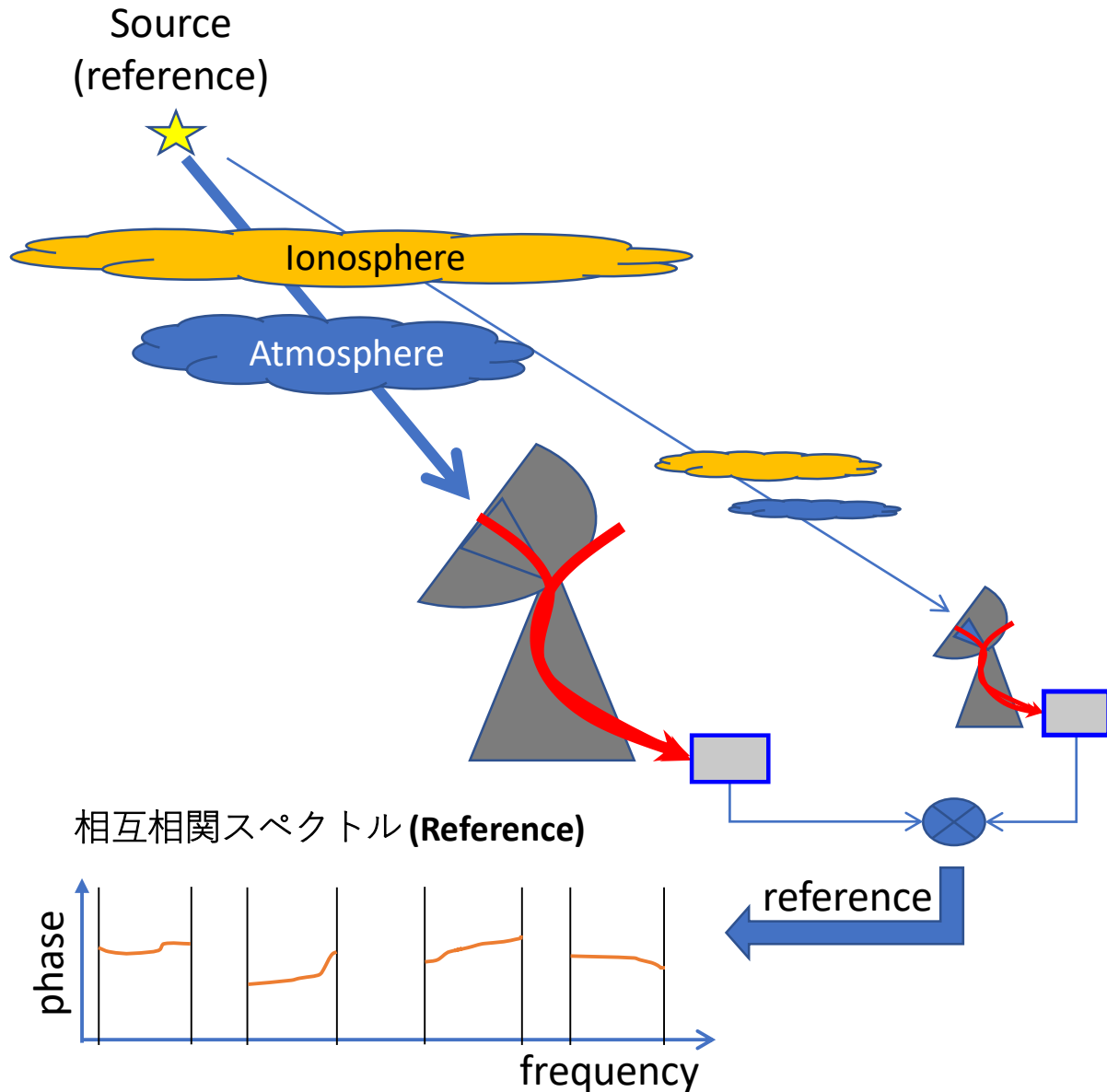
Freq: 6.0, 8.5, 10.4, 13.3GHz \rightarrow 有効帯域幅 $\Delta f_{RMS} = 2.7 \text{ GHz}$

• RF-Direct Sampling

- アナログ周波数変換なし
- 高い位相安定性 (チャンネル間)



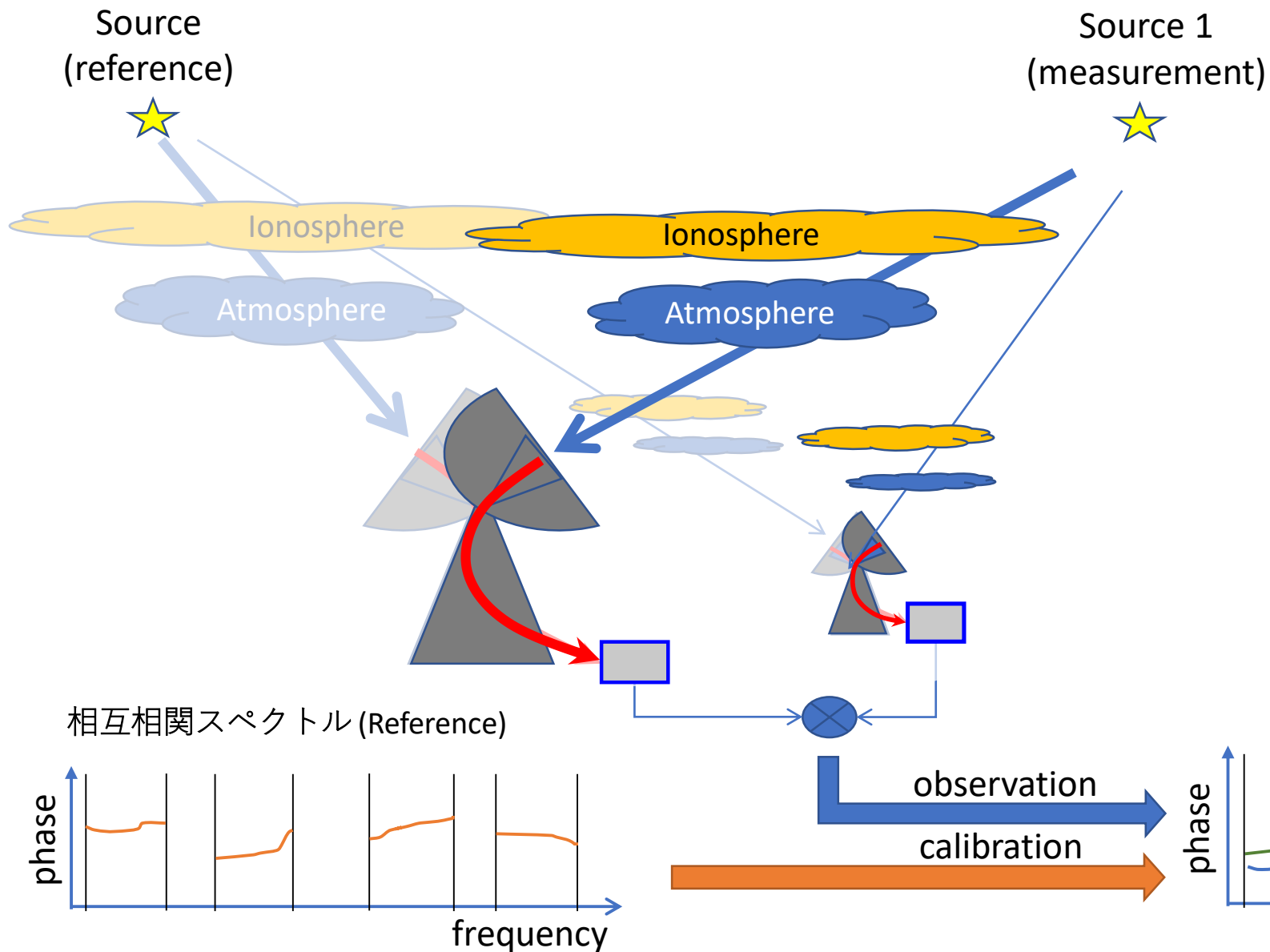
天体を使った位相校正



基準天体の観測

信号経路の位相情報を含む相互相関スペクトルをリファレンスとして保存する.

天体を使った位相校正



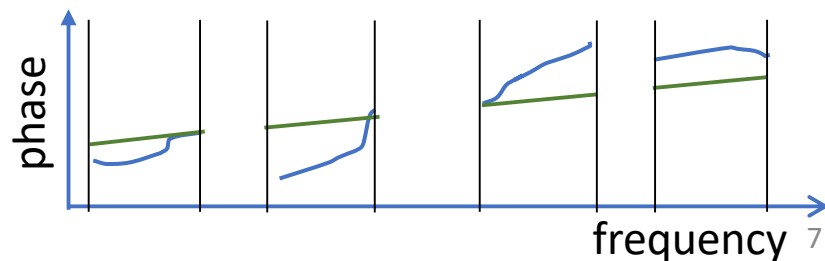
基準天体の観測

信号経路の位相情報を含む相互相関スペクトルをリファレンスとして保存する.

天体を使った位相校正 (RSPcal)

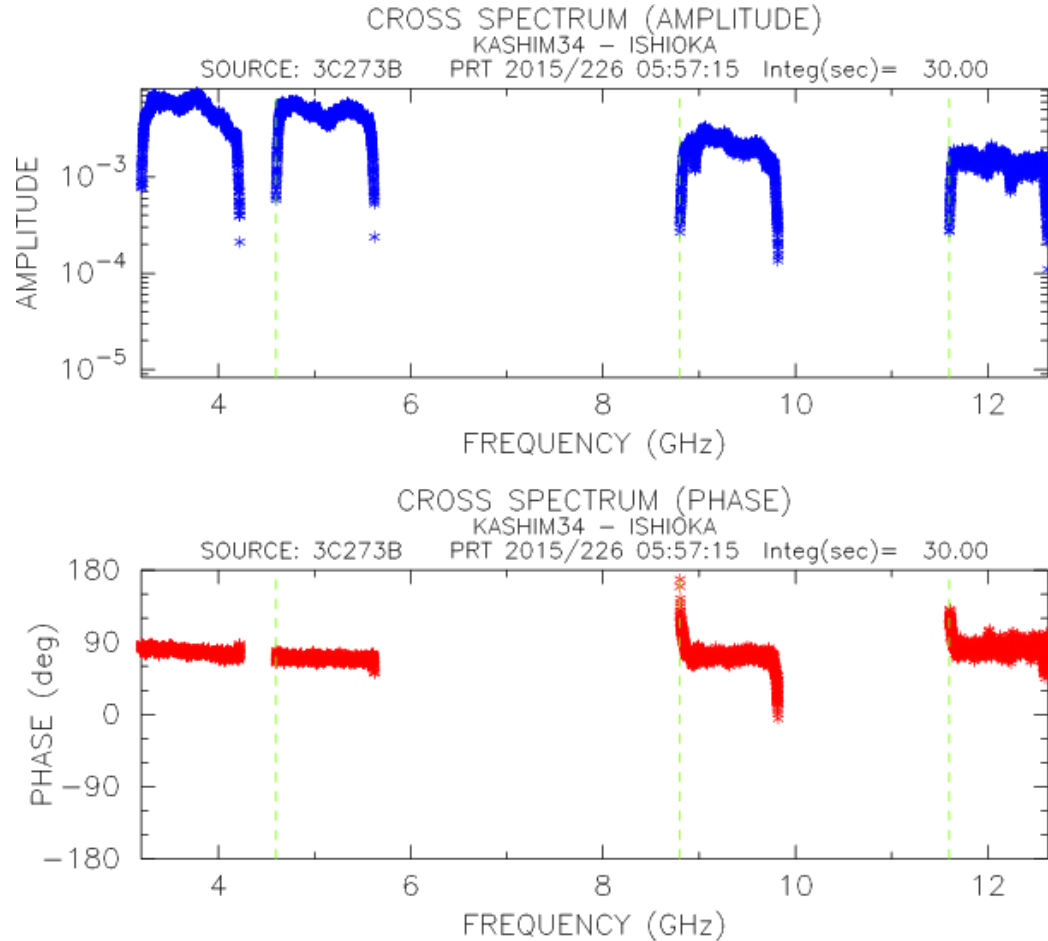
観測データを基準天体のスペクトルにより構成された精密群遅延を得る。

相互相関スペクトル

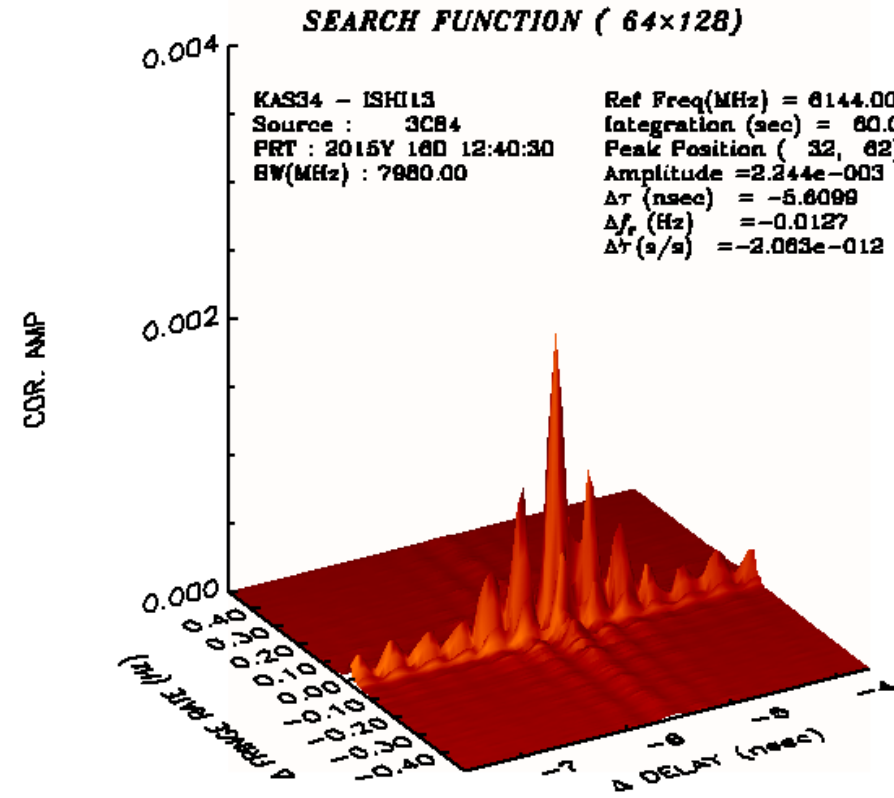


広帯域バンド幅合成(6-14GHz)

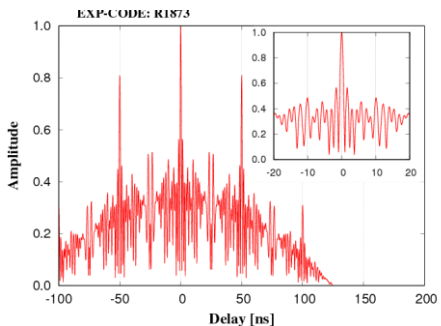
Cross Spectrum



Delay Resolution Function



バンド幅合成後の遅延分解関数



従来のS/X VLBI

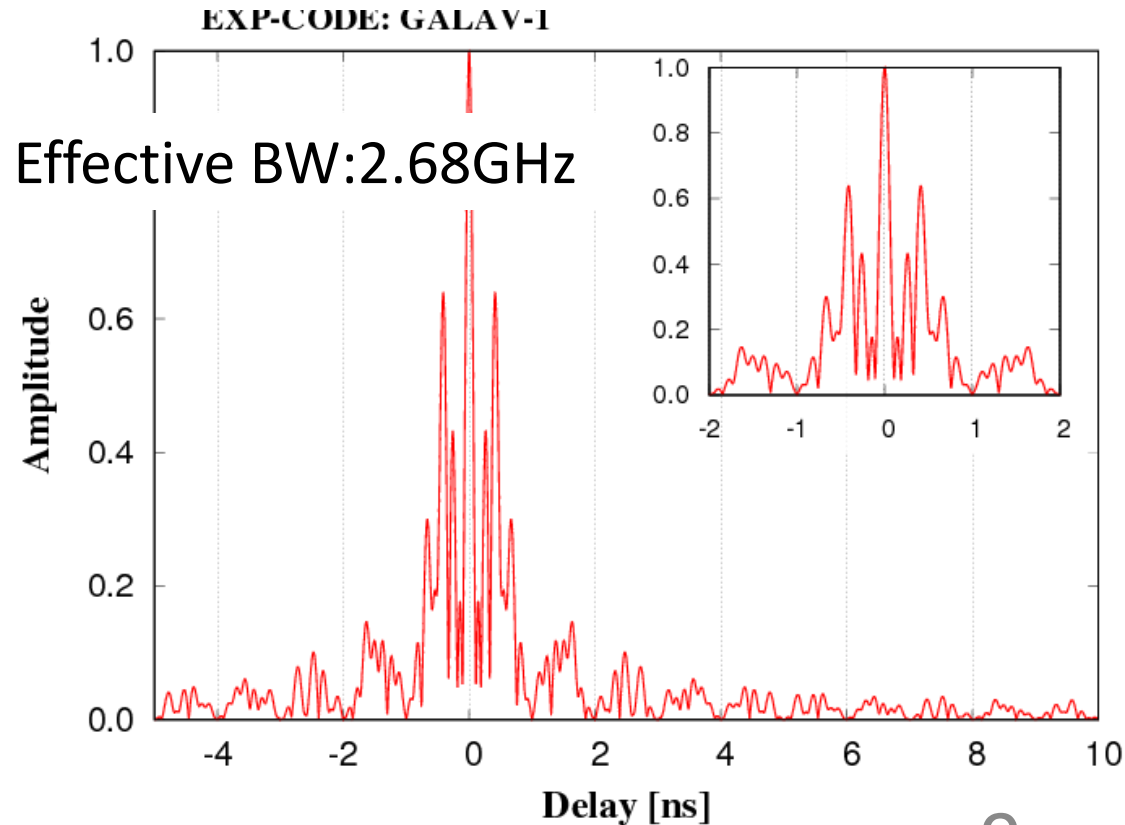
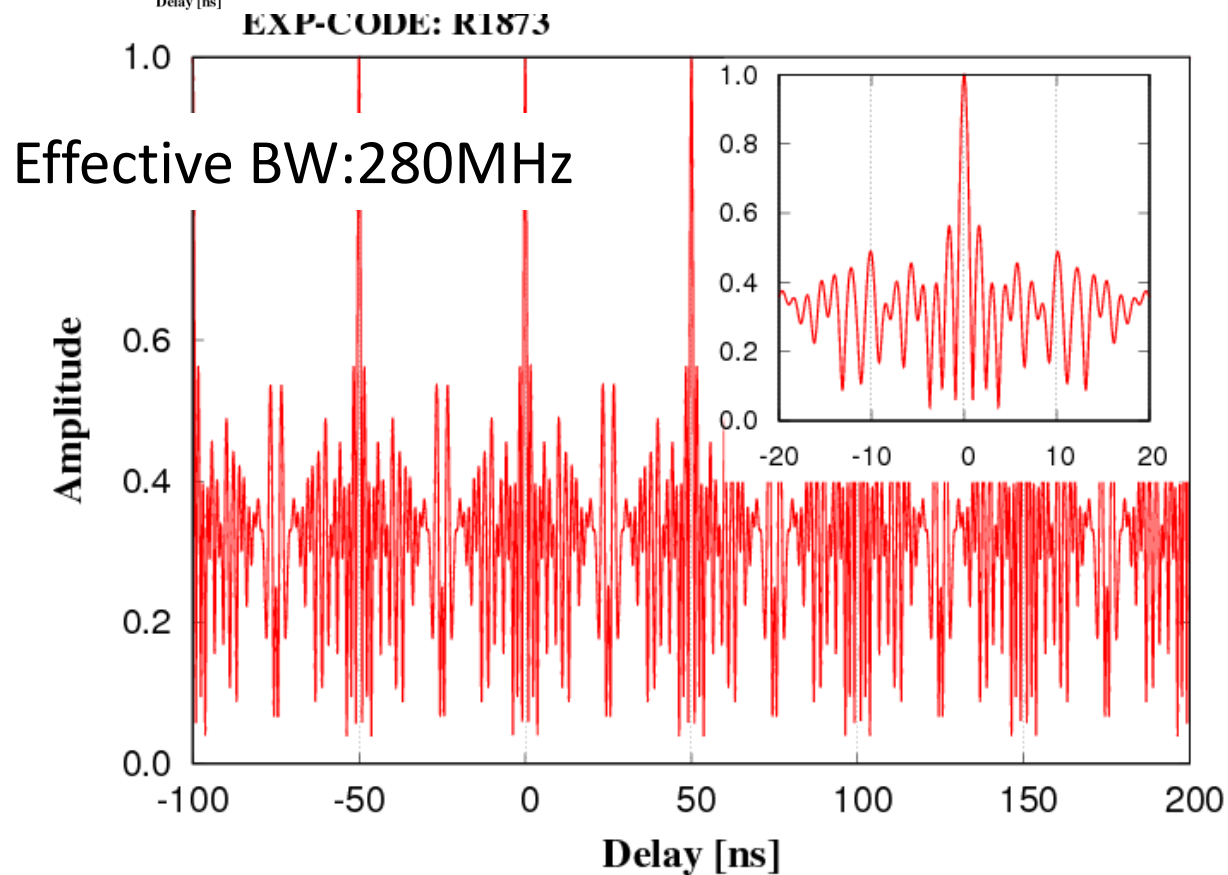
Freq.= 8212.99, 8252.99, 8352.99,
8512.99, 8732.99, 8852.99,
8912.99, 8932.99 MHz

BW = 8MHz

広帯域 VLBI

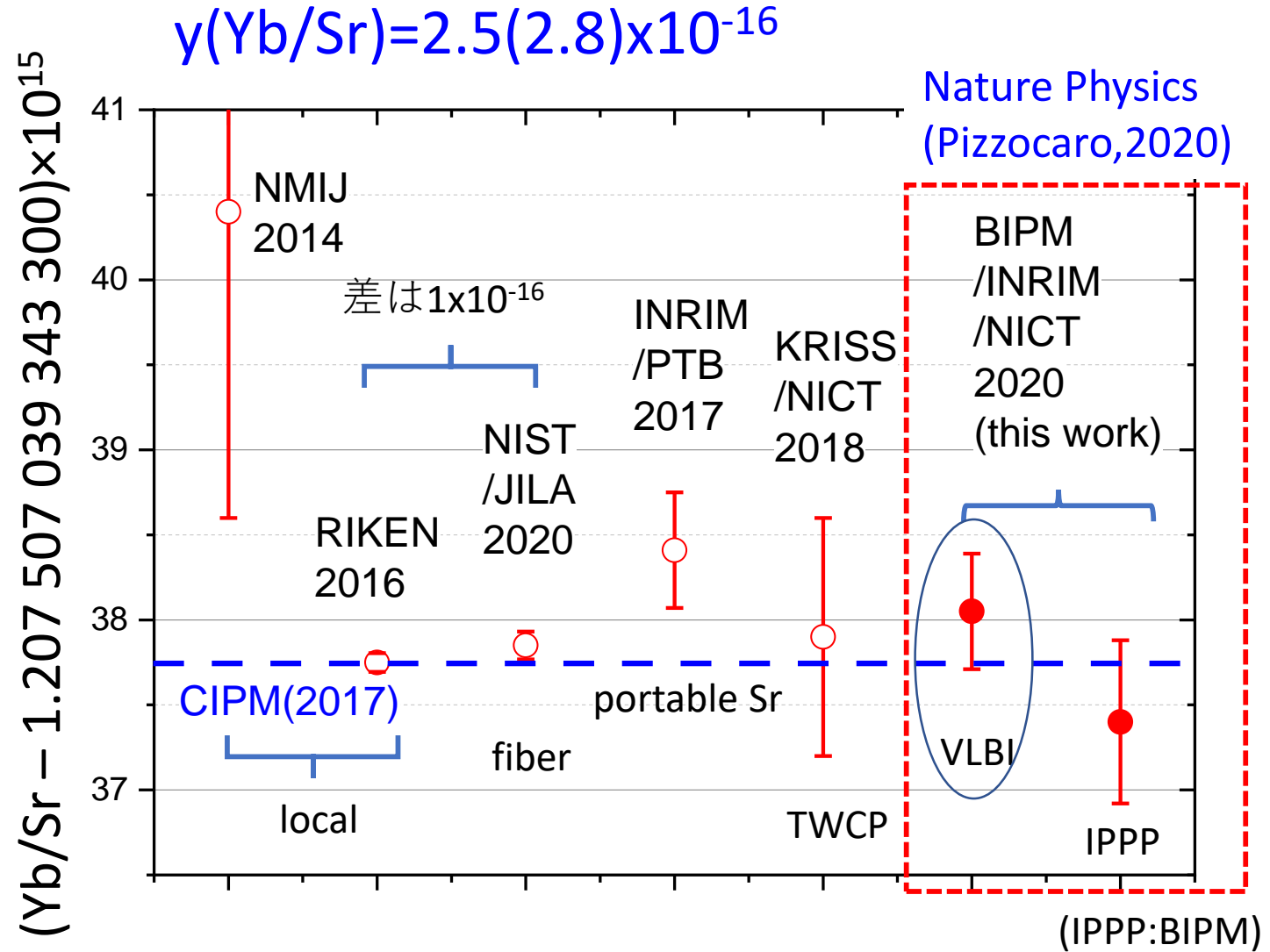
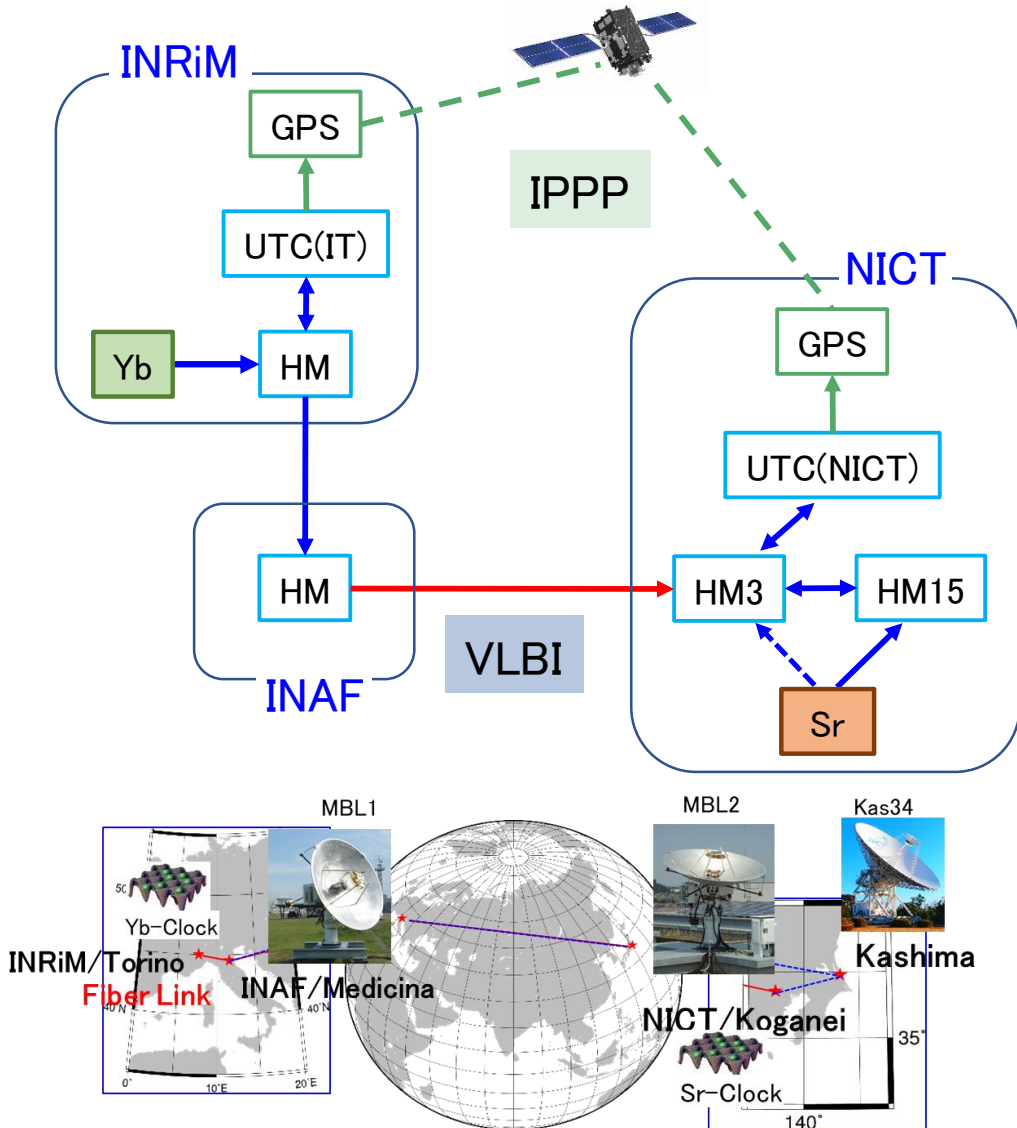
Freq.= 6000, 8500, 10800, 13300 MHz
BW= 1024MHz

- 10倍の有効帯域幅
- アンビギュイティなし



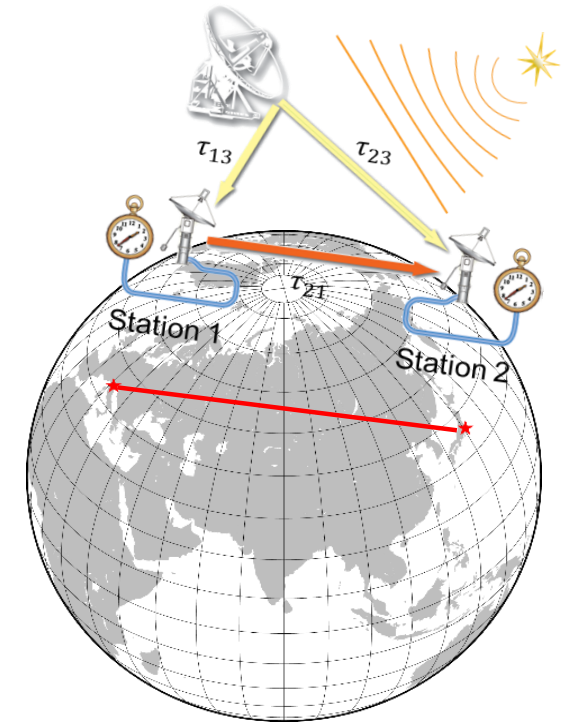
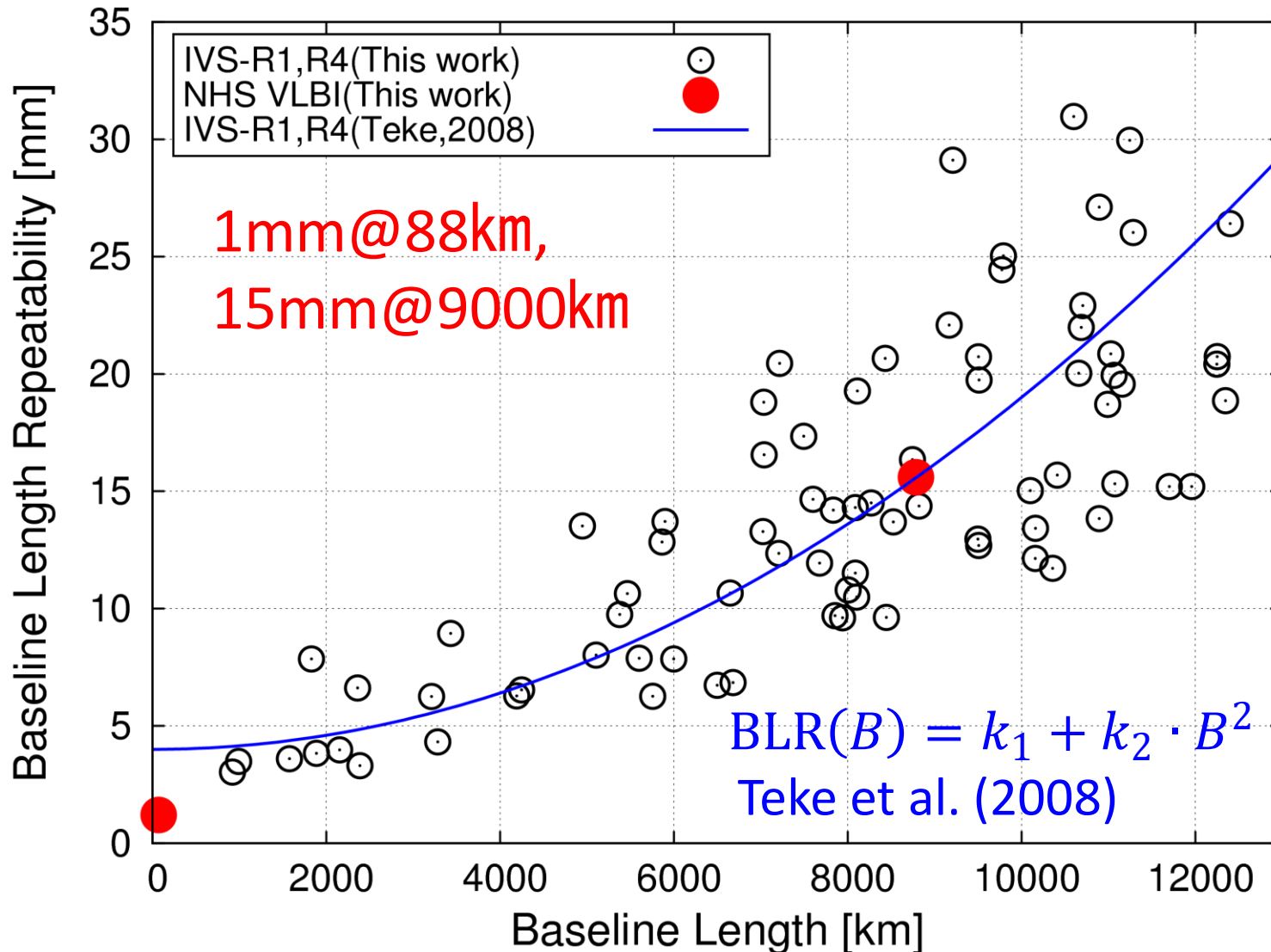
[周波数比較] IT-Yb/NICT-Sr 周波数リンクの結果

VLBIと独立なGPS (IPPP)解析で比較検証



[測地] IVS同等の基線長再現性 (BLR)

NHS方式による2.4m-2.4m 基線 と IVS-R1,R4 セッションのBLR比較



Submitted to J.Geod.
(Sekido, 2020)

広帯域VLBIの誤差要因 評価 (感度、装置)

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

1. 感度

有効帯域幅EBW=2.7Hz

遅延精度 $\sigma_{\tau} = 1/(2\pi \cdot \text{SNR} \cdot \text{EBW})$ → SNR=10 で遅延精度5.7ps

2. 装置の遅延

- 600mの光ファイバ(温度計数 $5.2 \times 10^{-7}/\text{K}$) 地下トレンチ5Kの温度変化→7.6ps
- 小金井50m光ファイバ(温度変化15K)→1.9ps
- サンプラの群遅延温度特性~10ps
- サンプラジッター: 0.2 ps
- AZEL機械的ストレス: 0.5ps

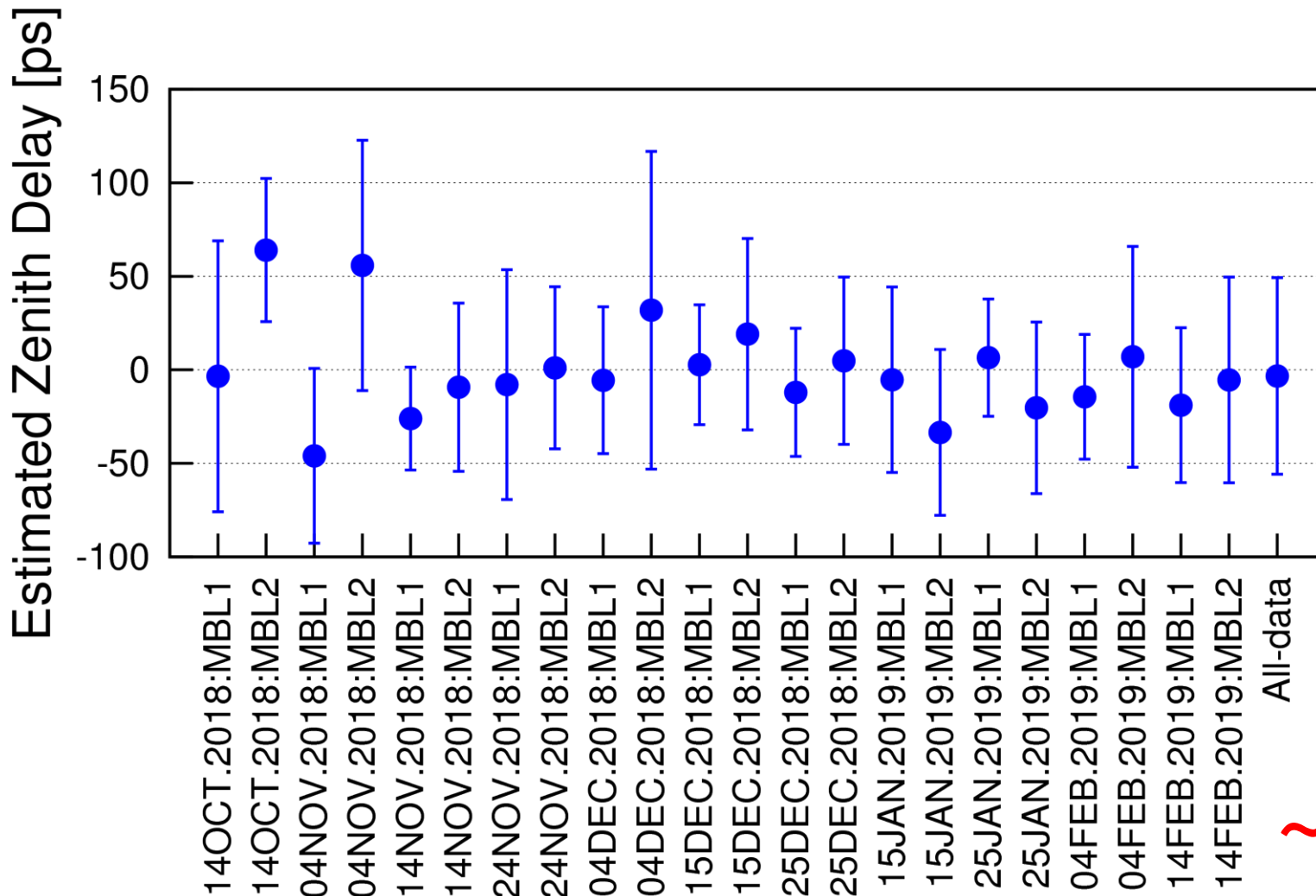
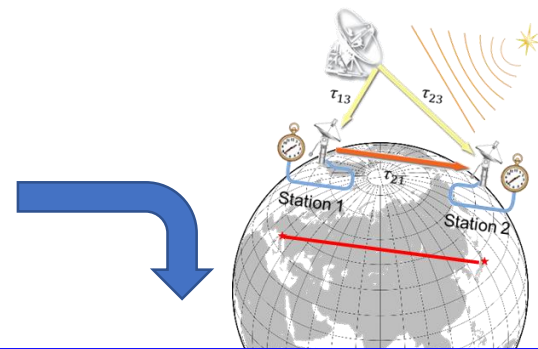
合計

$$\sqrt{7.6^2 + 1.9^2 + 10^2 + 0.2^2 + 0.5^2} = 12.7$$

誤差要因	誤差 [ps]
感度($\propto 1/\text{SNR}$)	6.4
装置	12.7
大気	7.9
電離層	1.7~17
電波源構造	22-33

広帯域VLBIの誤差要因 評価 (大気)

長基線のため、低仰角・方位角の偏り。→データから大気の異方性推定は困難



VMF3(Vienna Mapping Function)を導入

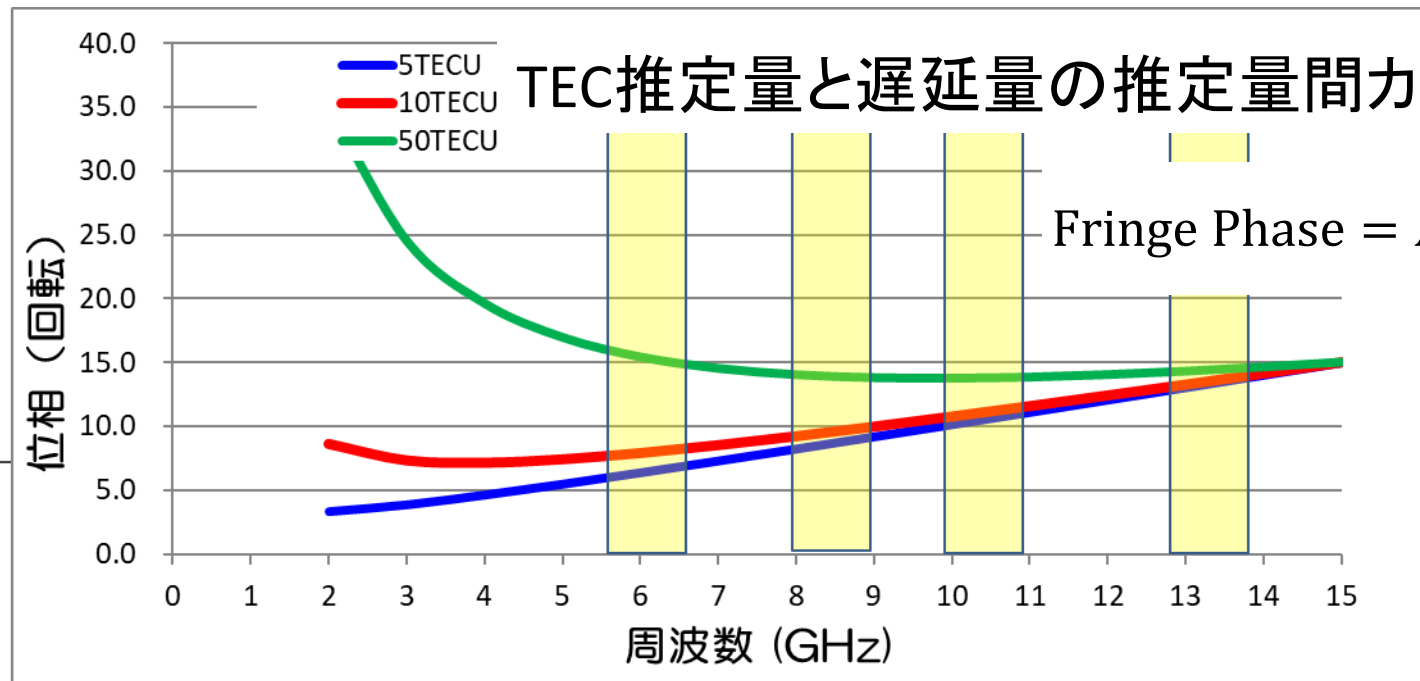
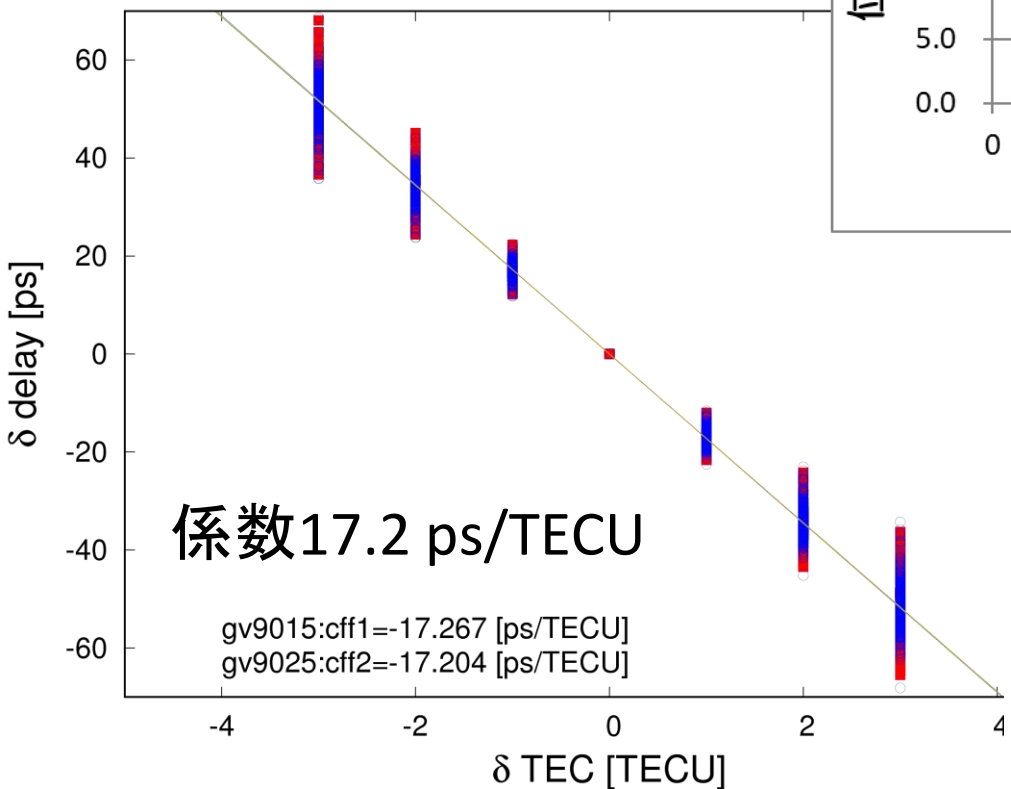
- ECMWF(ヨーロッパ中期予報センター)の数値予報モデル
- データ
 - 乾燥・湿潤・大気勾配の係数
 - 6時間ごと

誤差要因	誤差 [ps]
感度($\propto 1/\text{SNR}$)	6.4
装置	12.7
大気	7.9
電離層	1.7~17
電波源構造	22-33

~2.4mm

広帯域VLBIの誤差要因 評価 (電離層)

広帯域バンド幅合成処理の中で群遅延量と電離層TECを同時推定する。



今回の観測のTEC精度

SNRの制限(小型アンテナ)のため

$\sigma_{TEC} = 0.1-1$ TECU

Kondo&Takefuji(2016,2019)

広帯域VLBIの場合

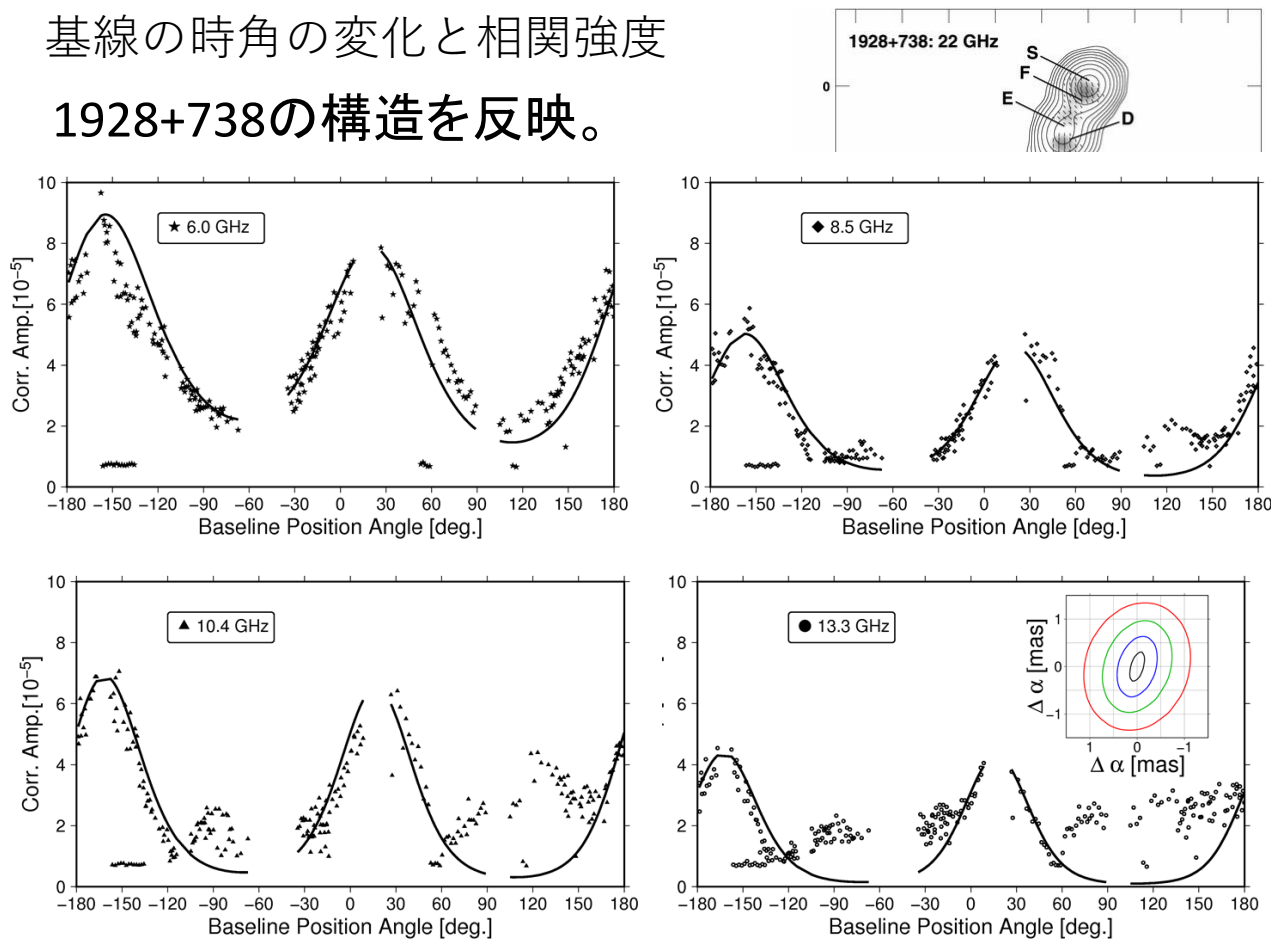
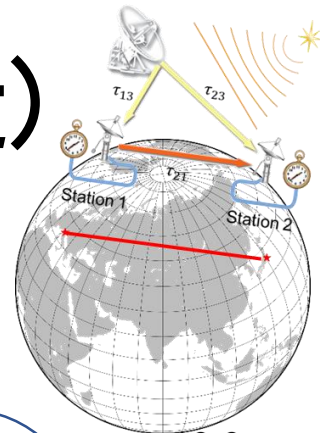
電波源構造の周波数依存性がTEC推定に誤差として影響する。

誤差要因	誤差 [ps]
感度($\propto 1/SNR$)	6.4
装置	12.7
大気	7.9
電離層	1.7~17
電波源構造	22-33

広帯域VLBIの誤差要因 評価 (電波源構造)

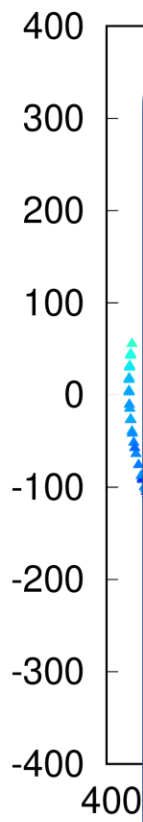
2.4m-34m(8800km基線)で観測された
4つのバンド(6.0,8.5,10.4,13.3GHz)の相関振幅

基線の時角の変化と相関強度
1928+738の構造を反映。



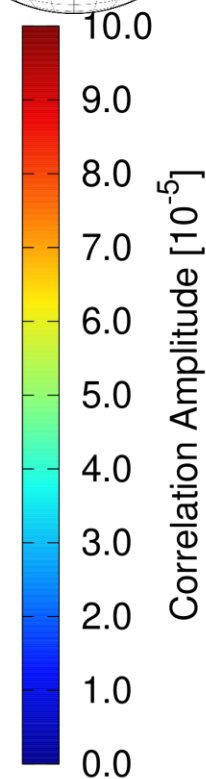
複雑な天体構造は、群遅延量に誤差を導入する。

Projected Baseline V [10° λ]

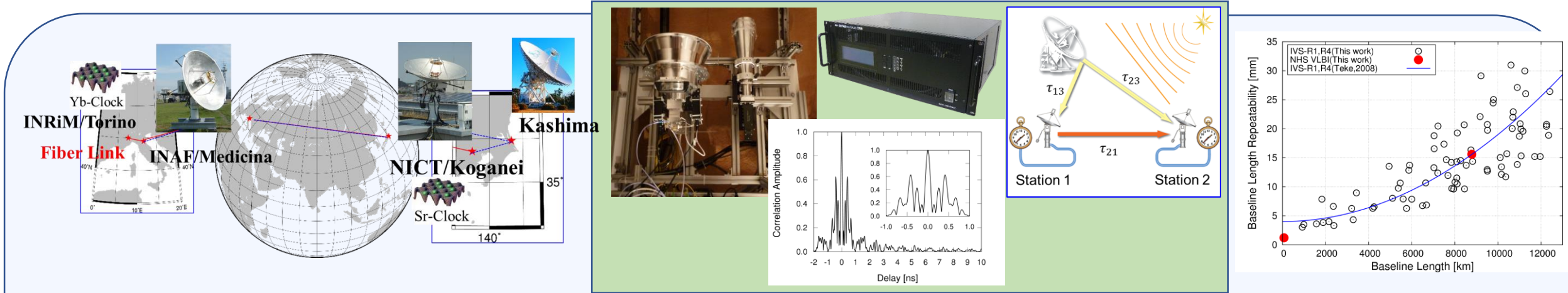


天体構造が群遅延量に及ぼす誤差は、天体・基線・位置角に依存し一般的に評価することは難しい。今後の研究課題

誤差要因	誤差 [ps]
感度($\propto 1/\text{SNR}$)	6.4
装置	12.7
大気	7.9
電離層	1.7~17
電波源構造	22-33



まとめ：広帯域VLBI+Node-Hub方式の開発



距離9000km離れた光格子時計Yb/Srの周波数比をVLBIにより 10^{-16} オーダで計測した.(世界初)

Nature Physics (Pizzocaro,2020)

2.4mアンテナペアでIVS観測と同等の測地性能を実現.

Submitted J.Geod. (Sekido, 2020)

• 支配的な誤差要因評価

- 電離層遅延 (~17 ps)
- 電波源構造 (20-30 ps) ← Node-Hub 方式 VLBI は、影響低減の可能性を持つ

なぜなら、一般に $(\tau_{31}^{\text{str}} + \tau_{23}^{\text{str}}) < \tau_{21}^{\text{str}}$. $\tau_{21}^{\text{NHS}} - \tau_{21}^{\text{true}} = (\tau_{31}^{\text{str}} + \tau_{23}^{\text{str}}) - \tau_{21}^{\text{str}}$.

大陸間距離の 周波数比較技術

Csに代わる秒の再定義に向けて、光周波数標準器の精密周波数比較が必要

技術名	信号源	軌道依存	電波送信	精度	運用コスト
衛星双方向	通信衛星	小	送信免許	1.e-15 (Code) 1.e-16 (Carrier Phase)	>100万円/年
GNSS	GPS /GNSS 衛星	高	--	1.e-16 (IPPP)	低
VLBI	電波天体(ICRF)	--	--	1.e-16 (Broadband)	中 (**)

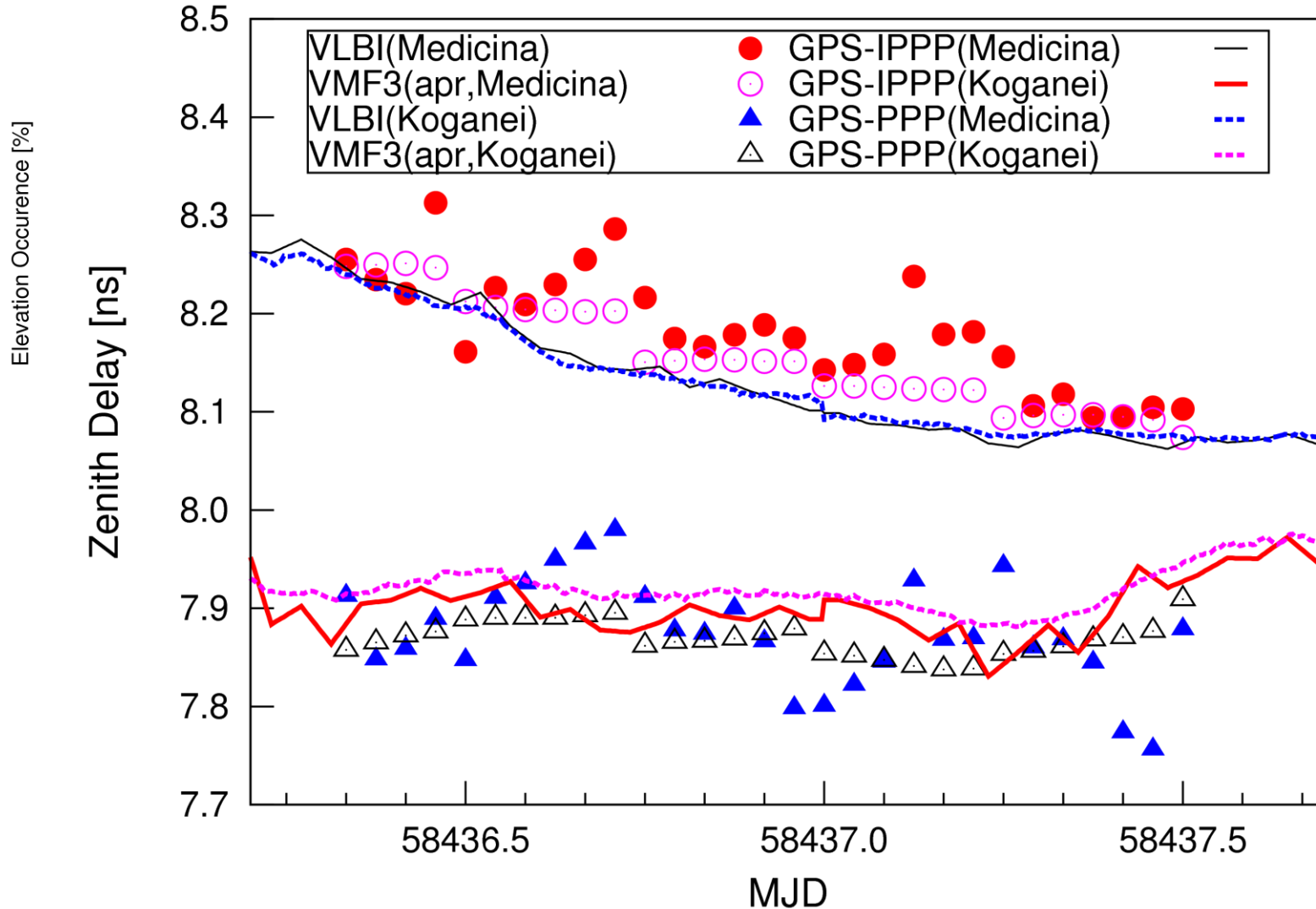
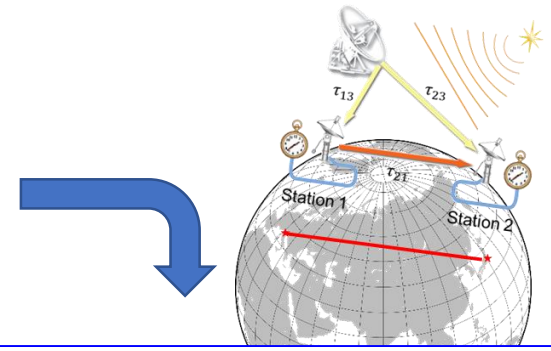
** 小型 VLBI 局の運用コストは低いが大規模アンテナの保守費は別.

広帯域VLBI周波数比較法の特徴

- (絶対遅延量) 広帯域VLBIによる**絶対群遅延量(Ambiguity Free)**計測
- (安定性) 遠方の電波源を固定点として使用する。絶対群遅延計測と合わせてVLBI周波数リンクの長期安定性が特徴
- (自由度) 衛星の軌道・可用性、送信免許などに依存しない。

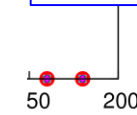
広帯域VLBIの誤差要因 評価 (大気)

長基線のため、低仰角・方位角の片より。→データから大気の異方性推定は困難



VMF3を導入

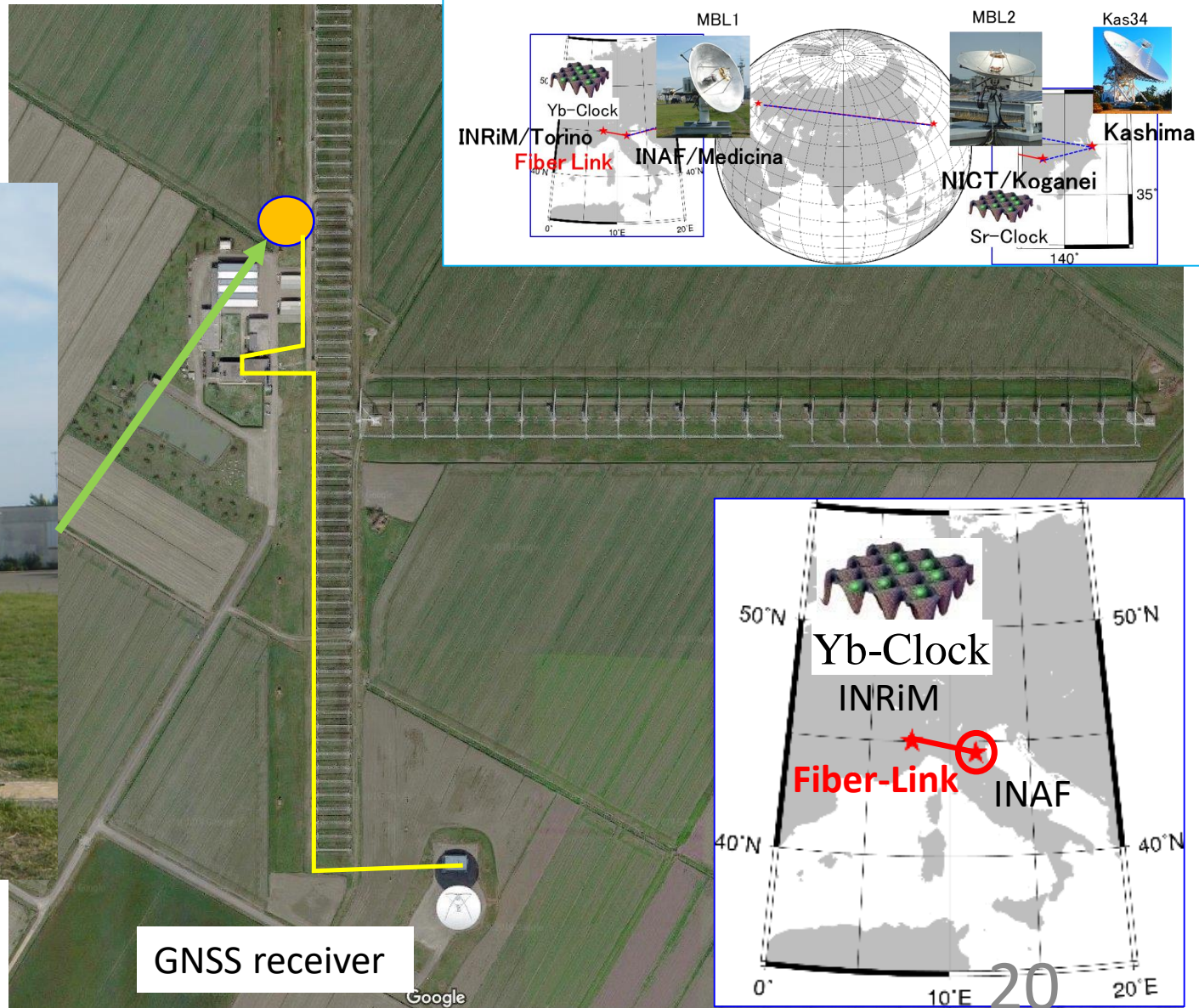
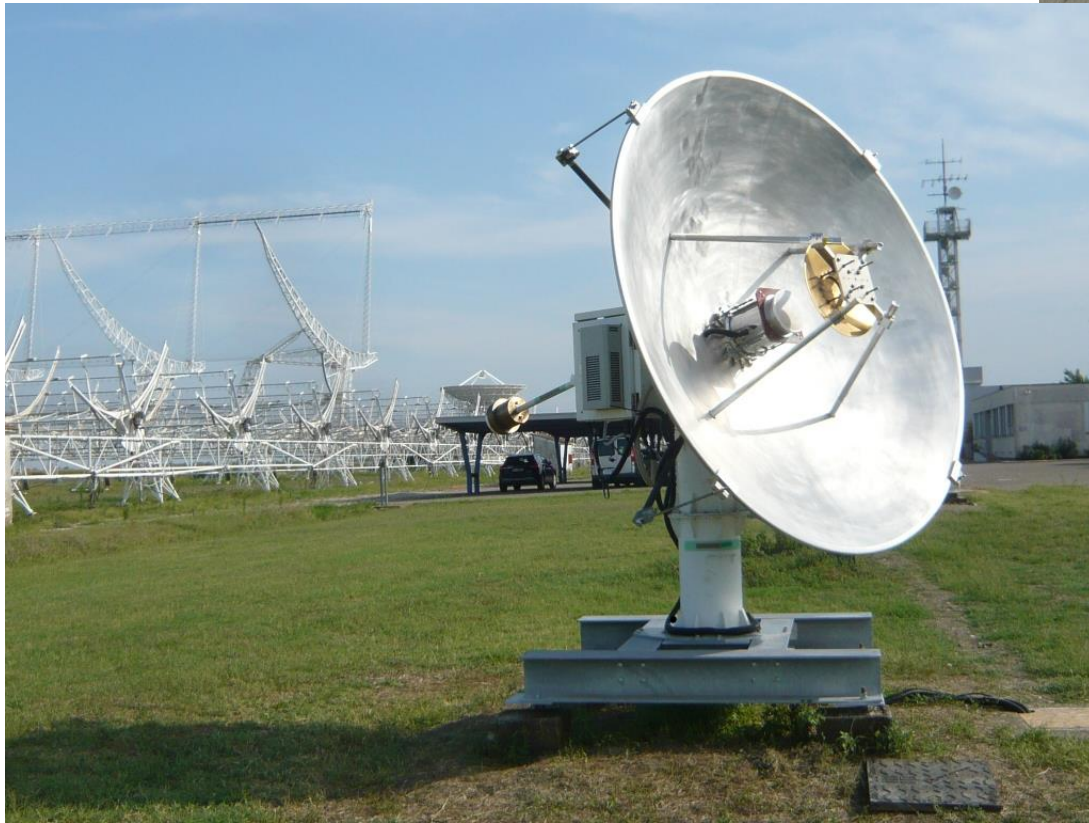
- ECMWF(ヨーロッパ中期予報センター)の数値予報モデル
- データ
 - 乾燥・湿潤・**大気勾配** の係数
 - 6時間ごと



誤差要因	誤差 [ps]
感度($\propto 1/\text{SNR}$)	6.4
装置	12.7
大気	7.9
電離層	1.7~17
電波源構造	22-33

INAF/IRA Medicina Radio Astronomical Observatory

2.4m Diameter Antenna(MBL1)

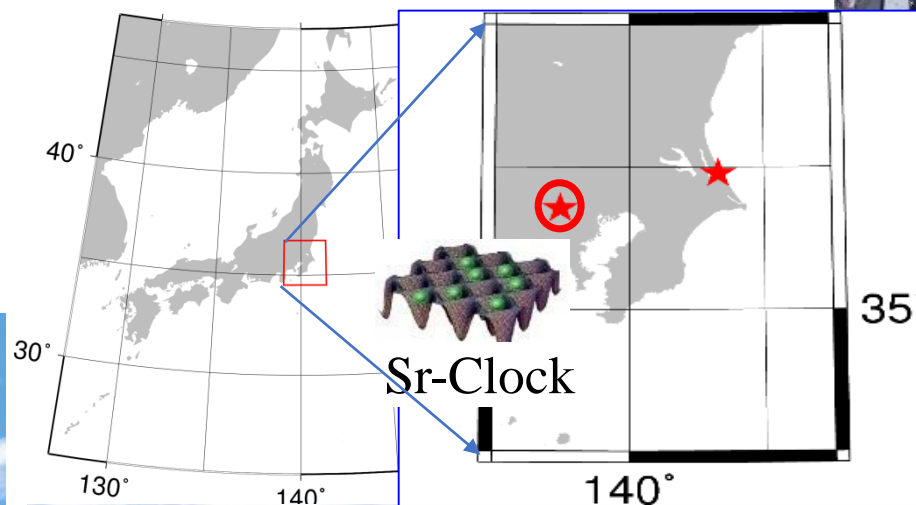
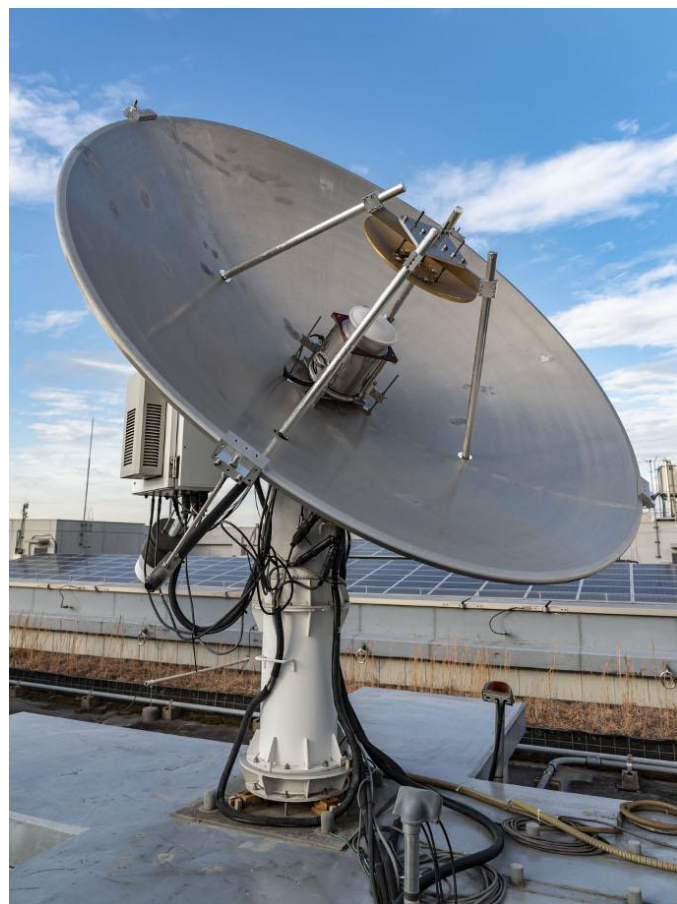


GNSS receiver

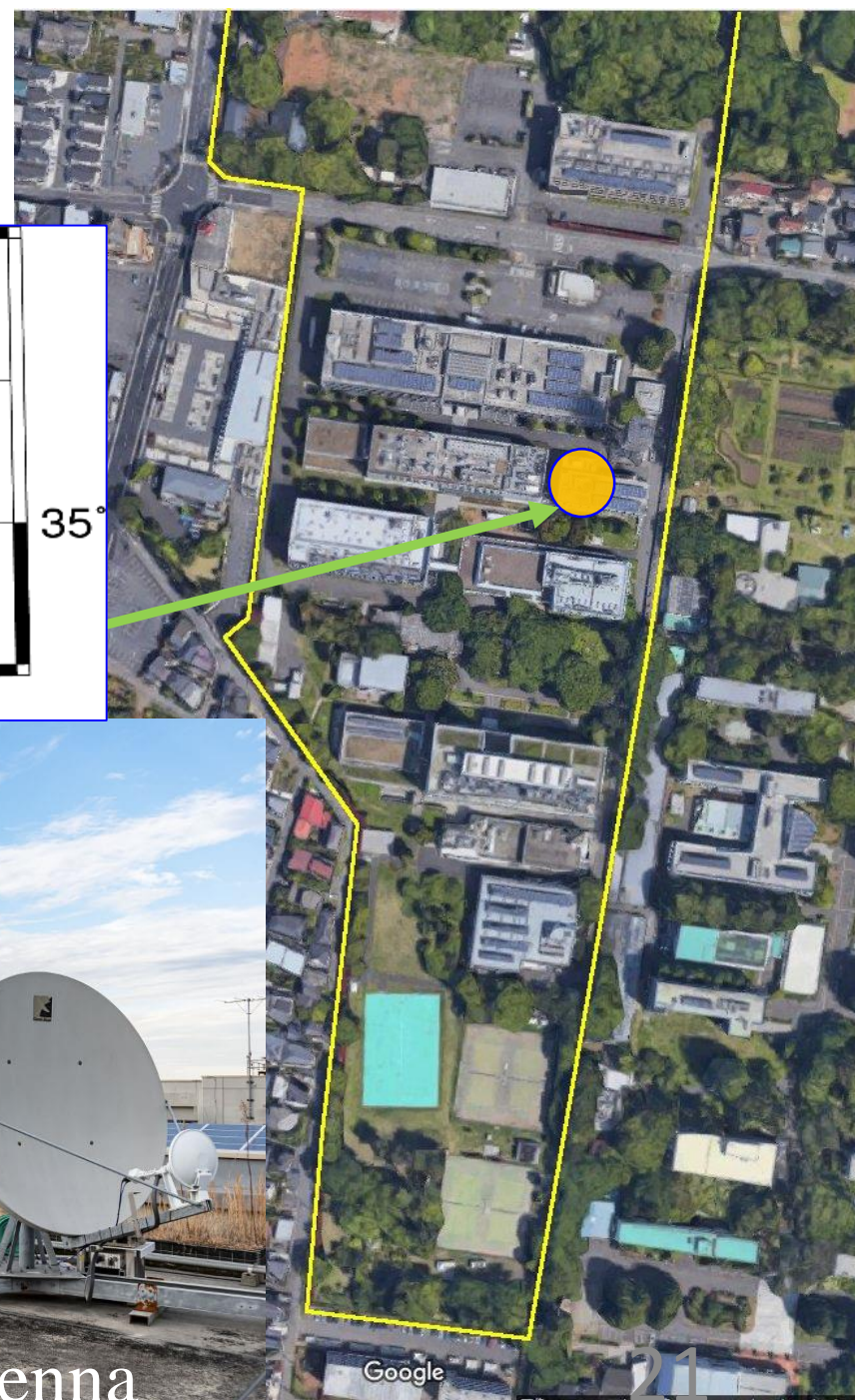
Google

NICT/ Koganei Headquarters

2.4m Diameter
Antenna(MBL2)

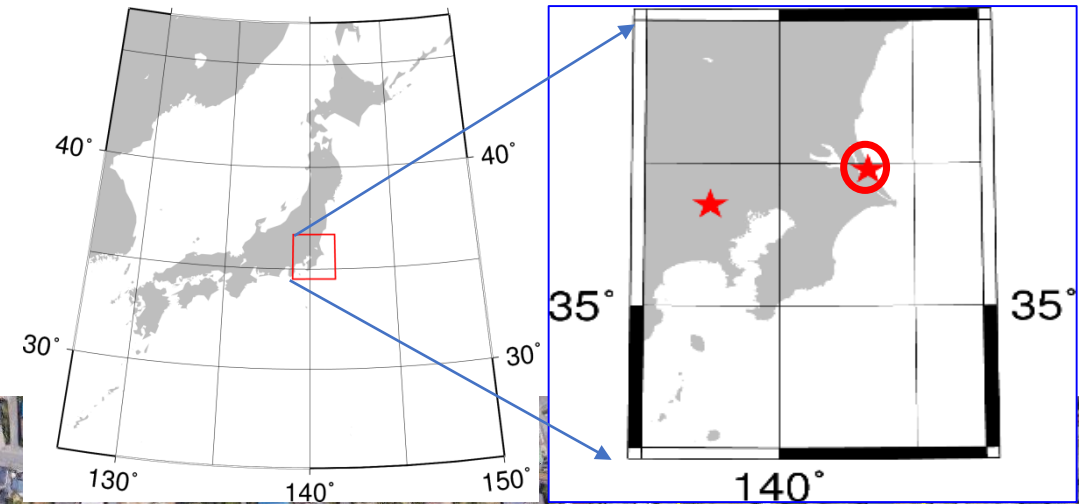


MBL2 and TWSTFT Antenna



NICT/ Kashima Space Technology Center

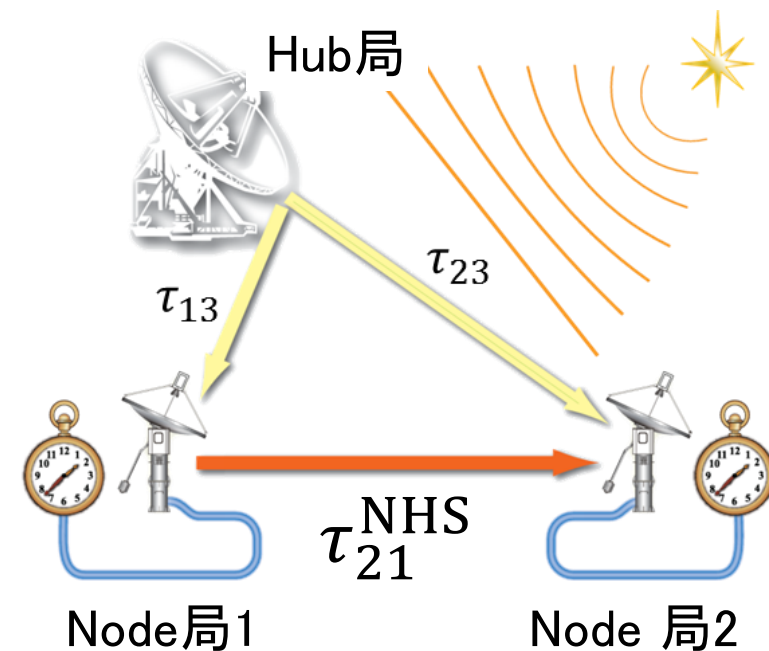
34m Diameter Antenna(Kashima34)



Node-Hub Style (NHS) VLBI による天体電波源構造の影響低減

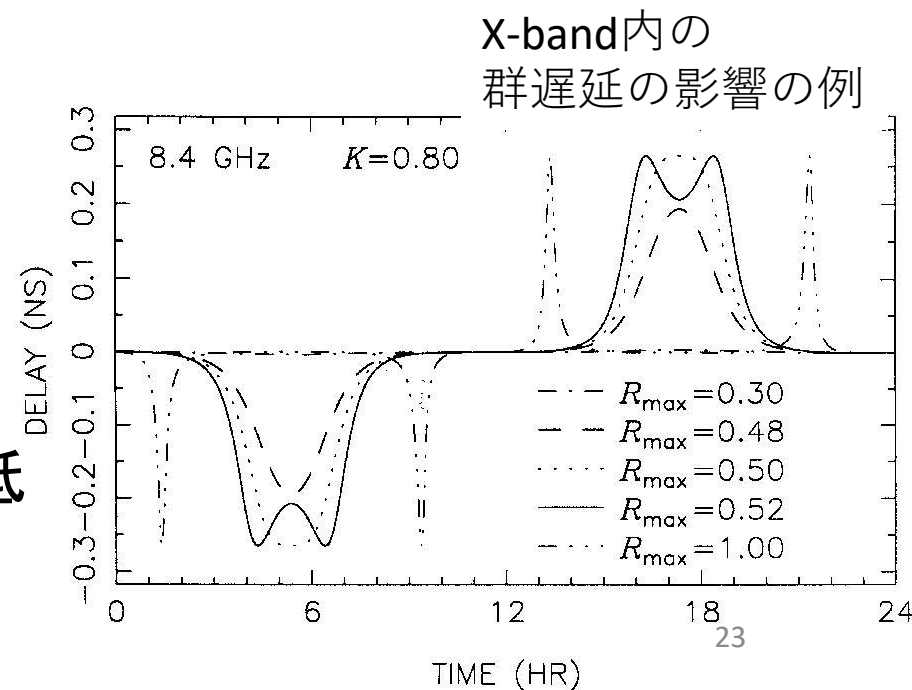
$$\tau_{21}^{\text{NHS}}(t_1) = \tau_{13}(t_1) - \tau_{23}(t_1) + \tau_{13}(t_1)\dot{t}_{12}(t_1)$$

計算された τ_{21}^{NHS} と本来の τ_{21}^{org} との差は天体の影響のみ。



	NHS方式 1-2 基線	本来の 1-2 基線
電波源構造の影響	$\tau_{31}^{\text{str}} + \tau_{23}^{\text{str}}$	τ_{21}^{str}

- 天体構造の影響は基線長Bの非線形関数
- 一般に $(\tau_{31}^{\text{str}} + \tau_{23}^{\text{str}}) \leq \tau_{21}^{\text{str}}$ for $B_{13}, B_{23} < B_{21}$.
- Hub局を1-2局の中間に設置すると天体構造の影響を低減できる可能性がある ← 今後の研究課題

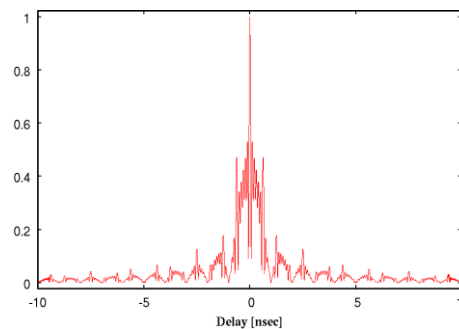
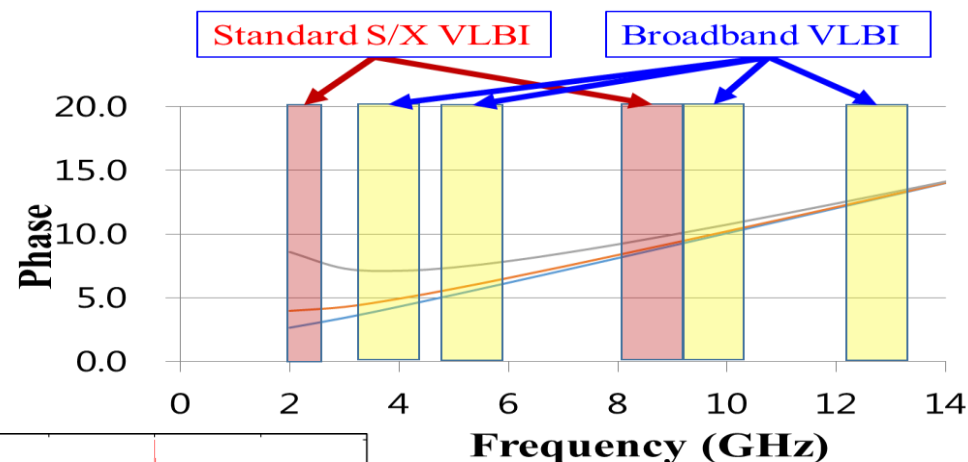


可搬型広帯域VLBIシステムによる精密周波数比較プロジェクト

従来のVLBIにない2つの特徴

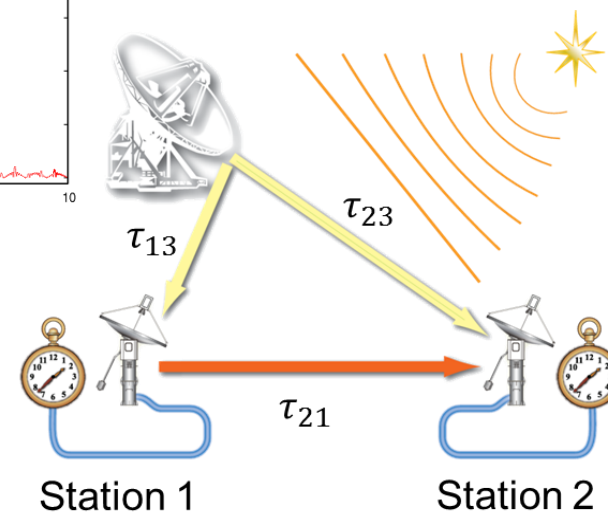
1. 広帯域VLBI

- 観測周波数(3-14 GHz)の4バンド(1GHz幅)
 - 従来の10倍の有効帯域幅
- 絶対群遅延計測 (Ambiguity Free)
 - Sessionを超えて長期スパンで解析できる遅延量



2. Node-Hub方式 (併合遅延活用)

- 可搬型アンテナ局 + 高感度VLBI局で併合遅延関係
 - 大型 (Hub) アンテナの影響を完全相殺
 - 安価、可搬小型 (Node) 局を展開したVLBI (Haas, 2020)
 - Hub局の配置によっては長距離のNode局間の電波源構造の影響を低減可能



$$\tau_{21} = \tau_{13} - \tau_{23}$$