

広帯域VLBIシステムによる 測地・周波数比較実験報告

情報通信研究機構

関戸衛、岳藤一宏、氏原秀樹、近藤哲朗、宮内結花、堤正則、川合栄治、
長谷川新吾、市川隆一、小山泰弘、花土ゆう子、小室純一、寺田健次郎、
難波邦孝、高橋留美、青木哲郎、池田貴俊

国土地理院

川畑亮二、石本正芳、若杉貴浩、梅井迪子、豊田友夫
産業技術総合研究所 計量標準センター

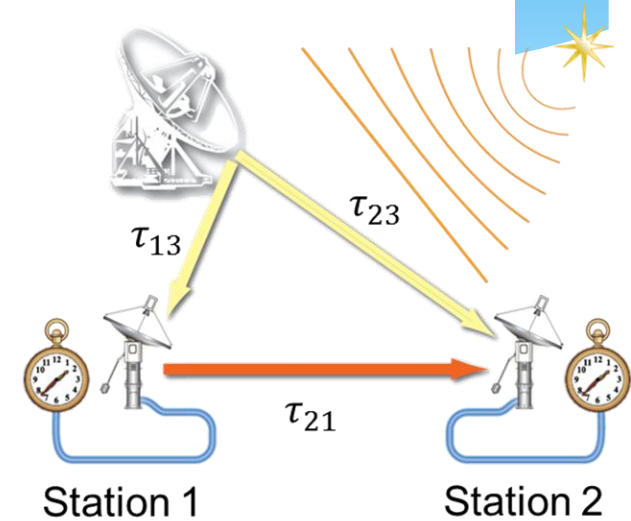
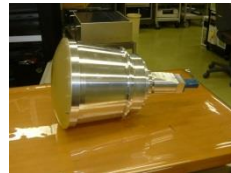
渡部謙一、鈴山智也

Gala-V Project 概要

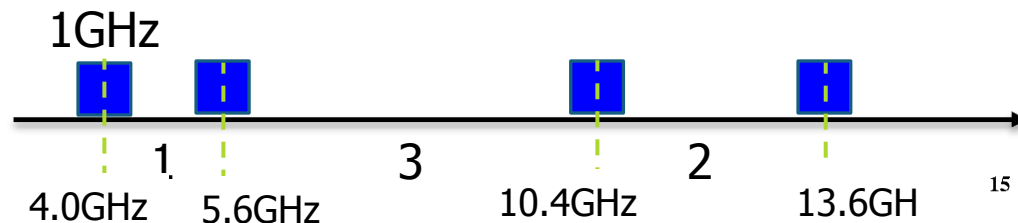
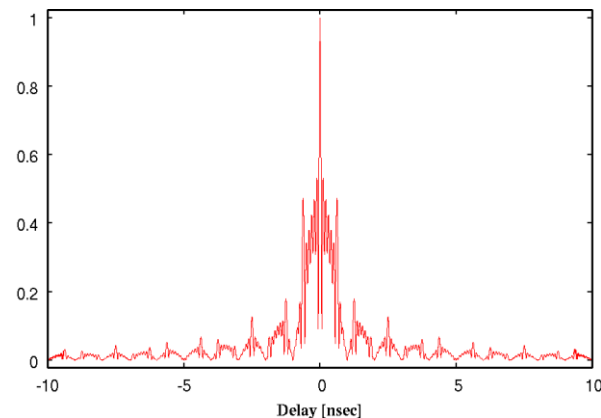
- **目的:** 小型広帯域のアンテナを使って、国際的な原子時計間の周波数比較を行う。
- **特徴:** VGOSと共同観測・ 互換性のある広帯域VLBIシステム

■ 新しい技術

- カセグレン用広帯域フィードの設計開発
- ダイレクトサンプリング法
- データ取得: 3-15GHzで4バンド(1024MHz幅)
 - $F_c = 4.0\text{GHz}, 5.6\text{GHz}, 10.4\text{GHz}, 13.6\text{GHz}$
 - 有効帯域幅: 3.8GHz (従来の10倍)

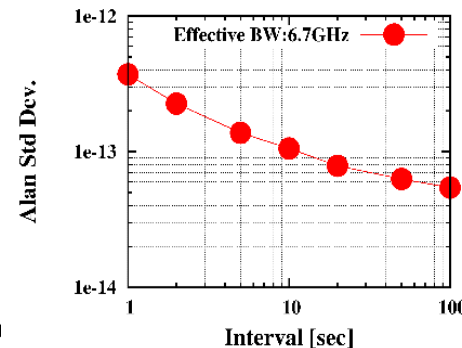
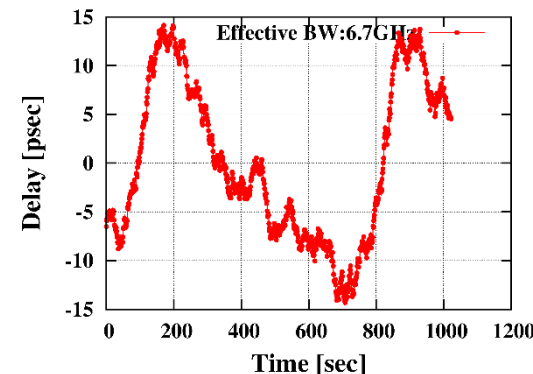
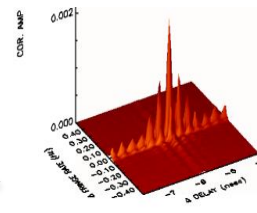


$$\tau_{21} = \tau_{13} - \tau_{23}$$

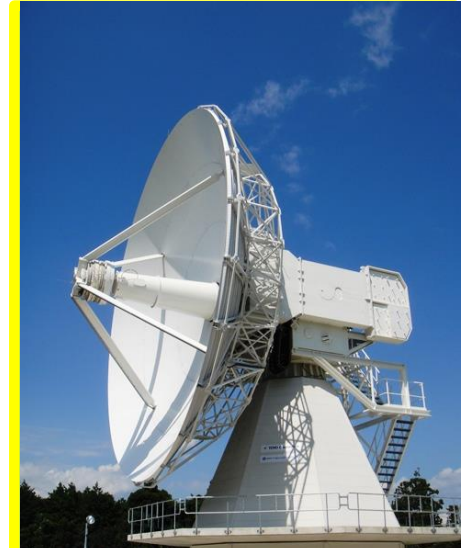
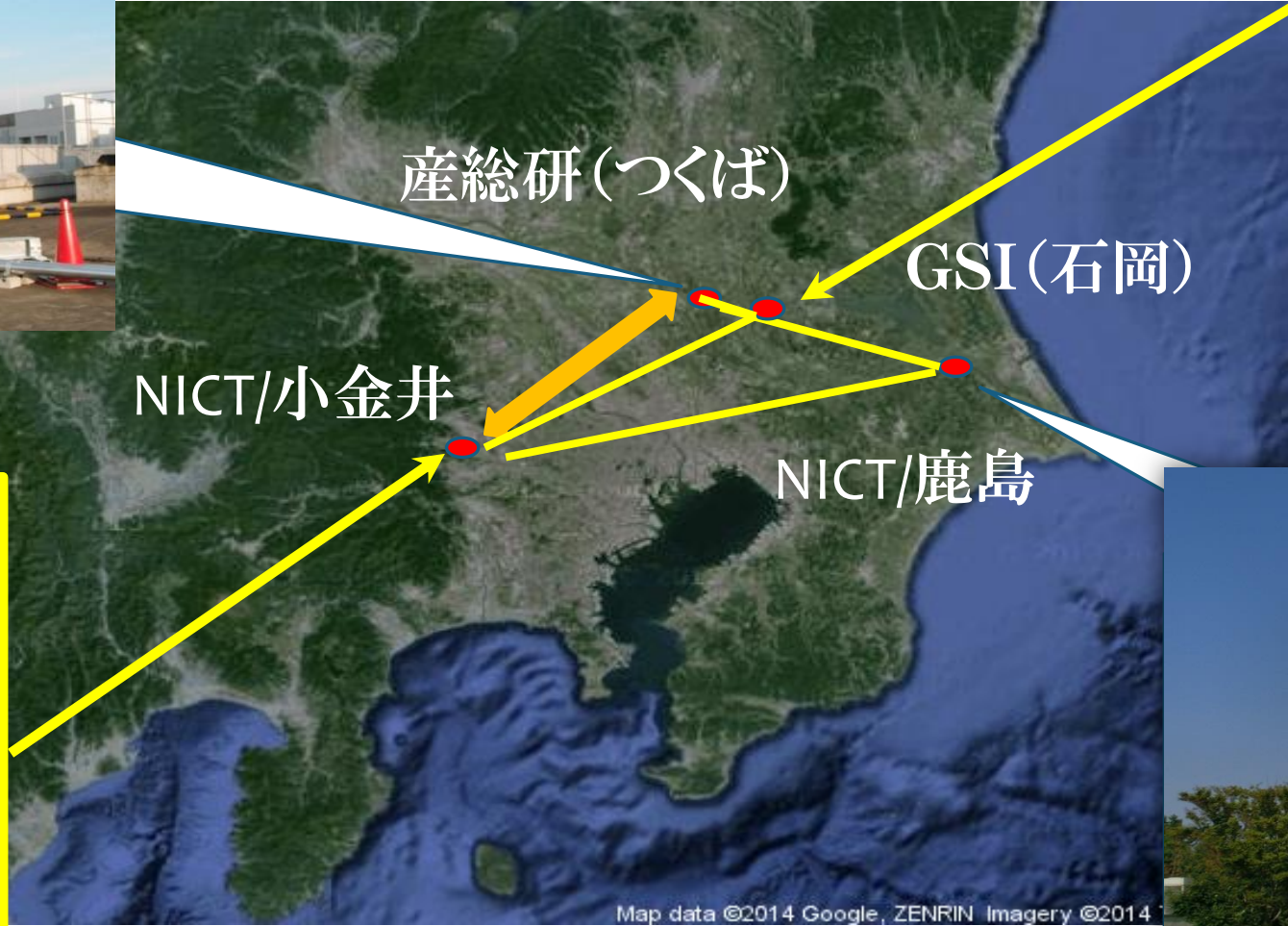


← 遅延分解関数

従来に比べて10倍高い遅延計測精度が期待できる。



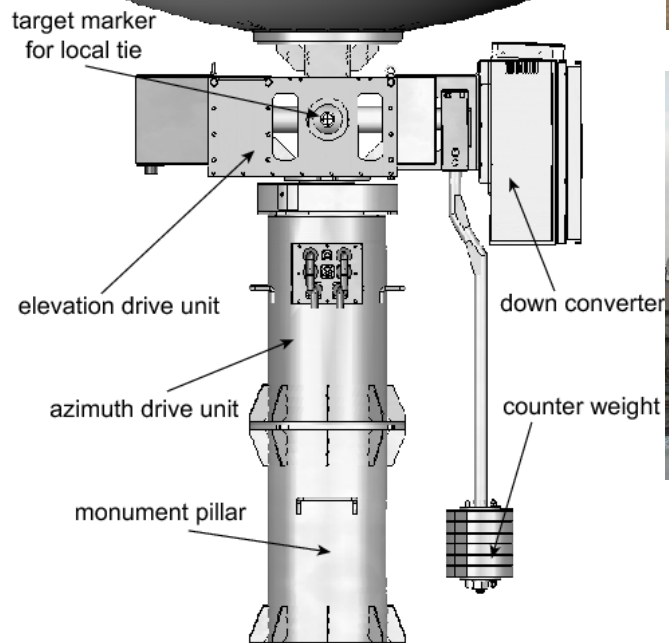
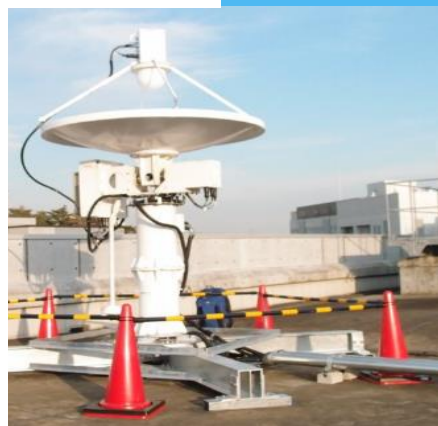
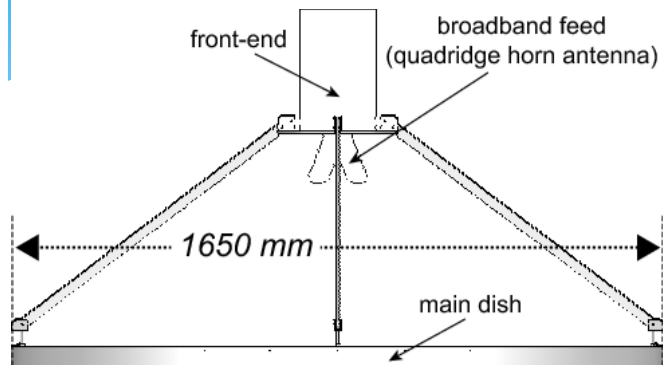
国内の広帯域VLBI観測可能なアンテナと NICT-産総研のUTC周波数比較



発表内容

1. **広帯域VLBI観測システムの特徴・概要**
2. **2016年のVLBI観測・基線解析結果**

小型VLBIアンテナ



システムの特徴

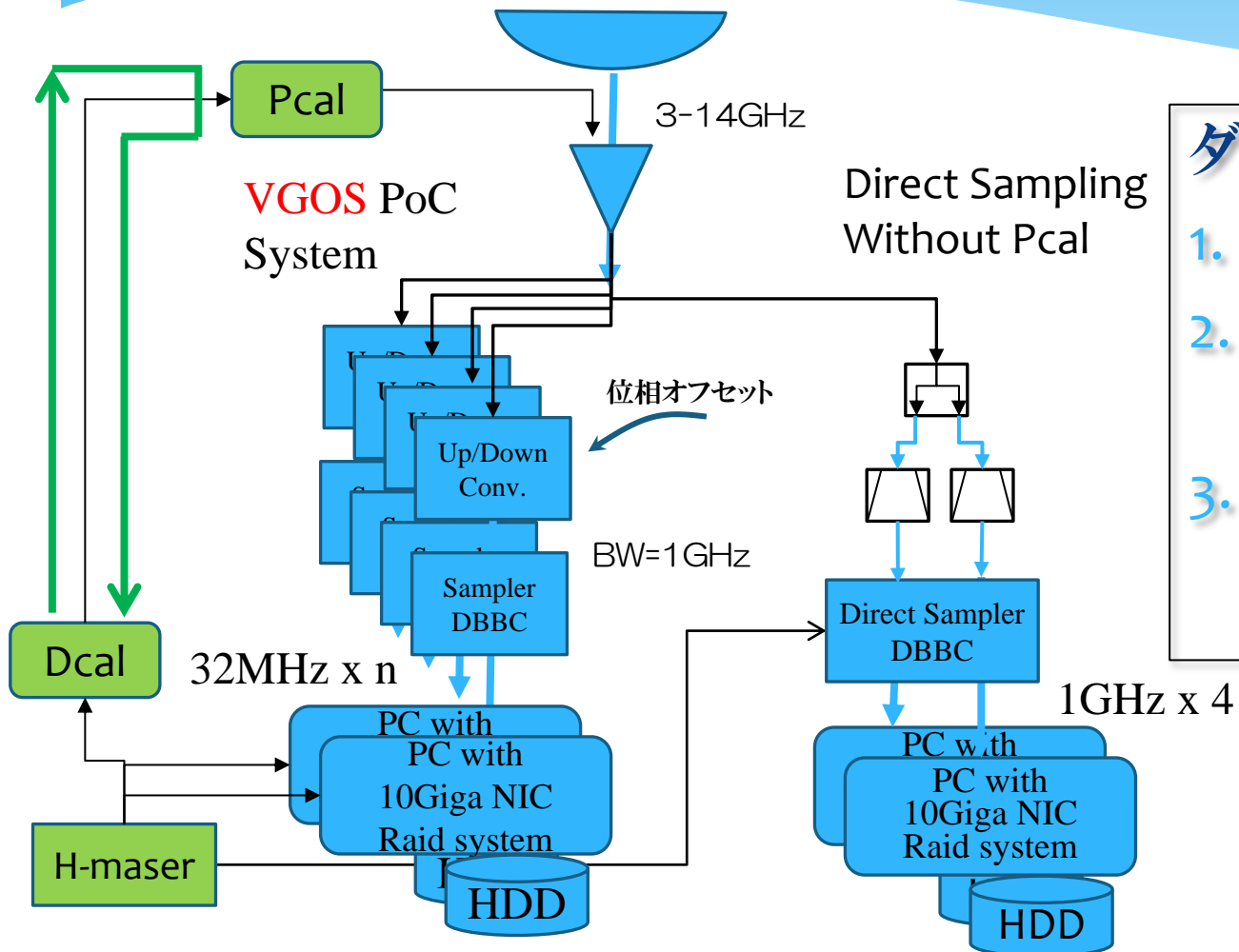
広帯域受信機



16Gbps 高速サンプラ



ダイレクトサンプリング方式により 校正系を簡素化したシステムを実現



ダイレクトサンプリングの利点

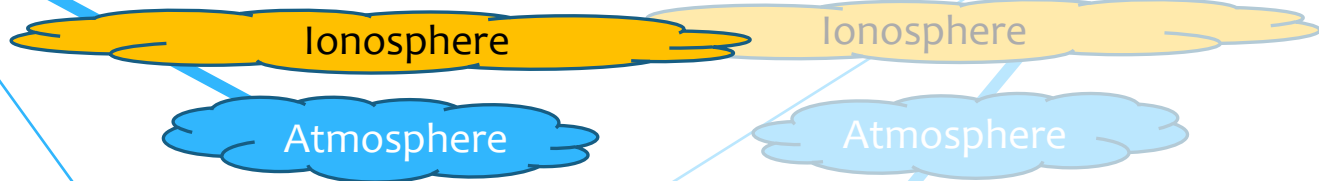
1. 少ない(アナログ)構成機器.
2. チャンネル間の位相関係が安定でPCALが不要に.
3.  遅延校正系も不要.

電波源を使った位相校正⇒直線位相実現

Source1



Source-ref



$$\tau_{scan1} \equiv \tau_{scan1} + \tau_{atm1} + \tau_{inst}$$

$$\Delta\phi_{ref}(f) \equiv \phi_{inst2}(f) - \phi_{inst1}(f)$$

$$C_{scan,1}(f) = A_{scan1}(f) \exp(i2\pi f \tau_{scan1} + \Delta\phi_{ref}(f))$$

$$\frac{C_{scan1}(f)}{C_{ref}(f)} = A_{scan1}(f) \exp(2\pi f i \Delta\tau_{scan1})$$

$$\Delta\tau_{scan1} \equiv (\tau_{scan1} - \tau_{ref.scan})$$

$$\tau_{ref} \equiv \tau_{ref.scan} + \tau_{ref.atm} + \tau_{inst}$$

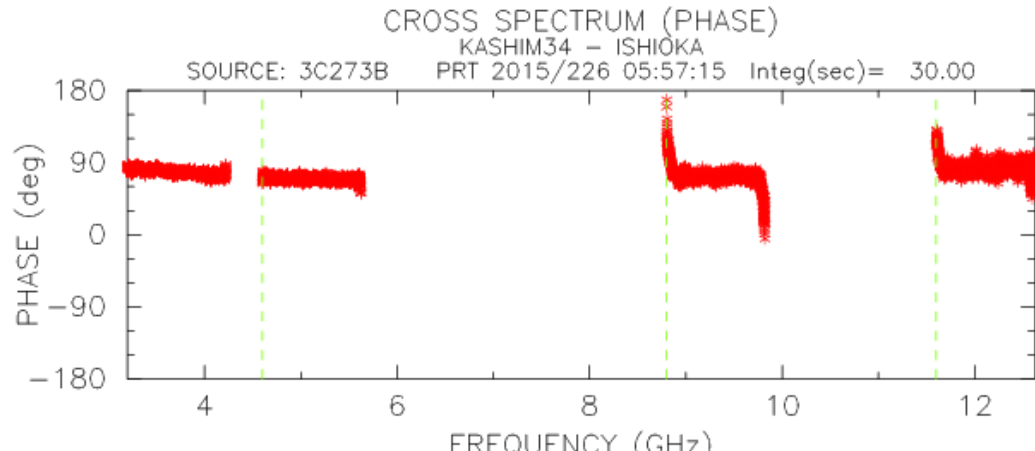
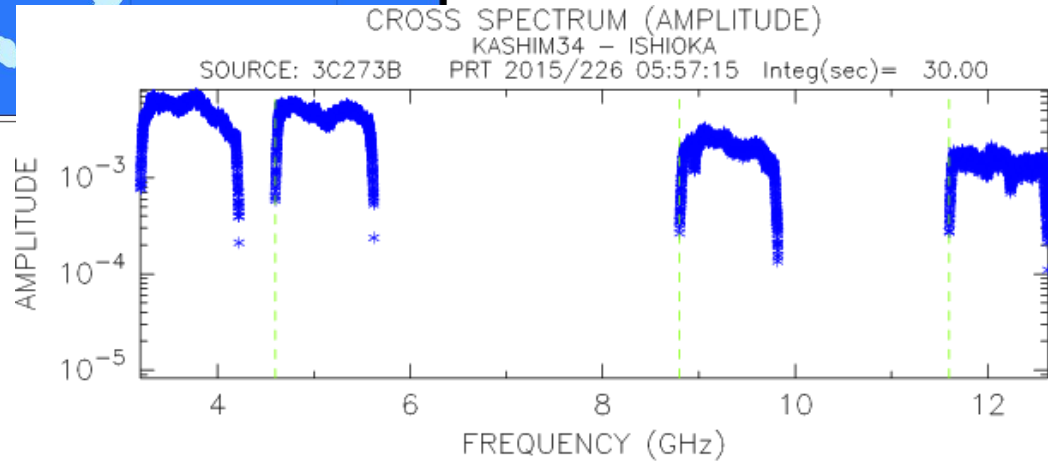
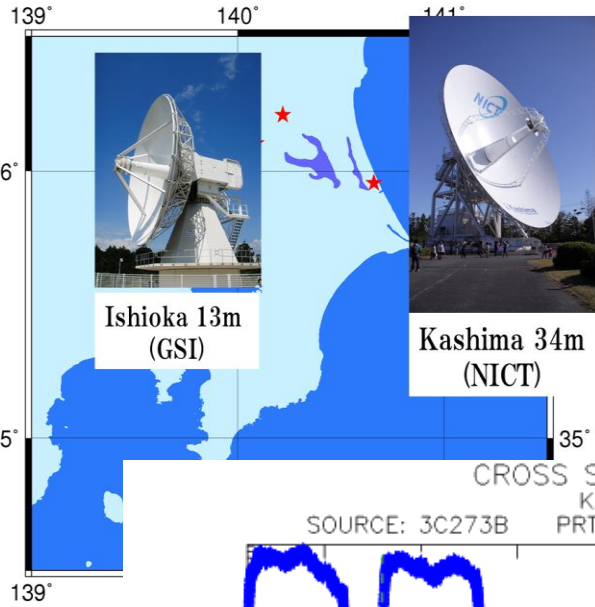
$$\Delta\phi_{ref}(f) \equiv \phi_{inst2}(f) - \phi_{inst1}(f)$$

$$C_{ref}(f) \equiv \exp i (2\pi f \tau_{ref} + \Delta\phi_{ref}(f))$$

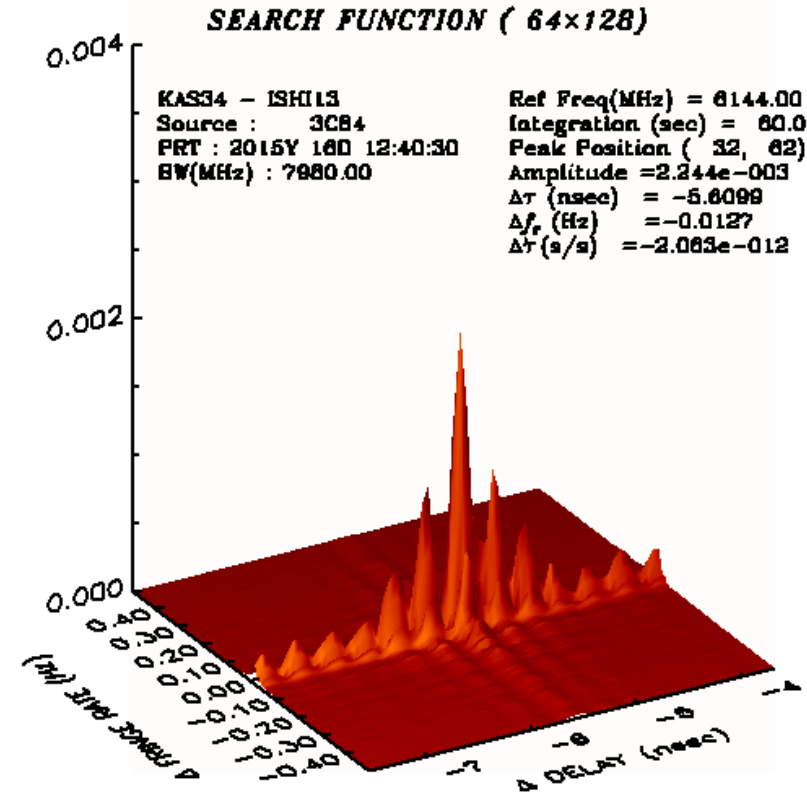
バンド幅合成結果

相互相関スペクトル

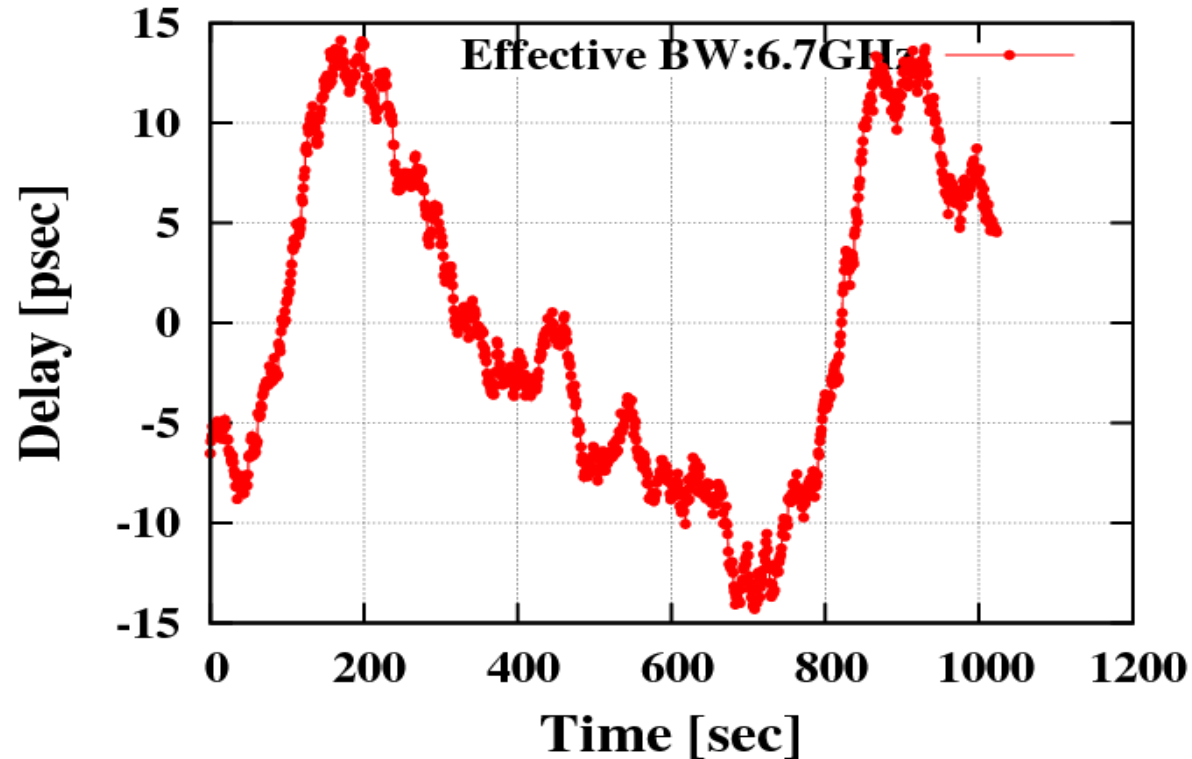
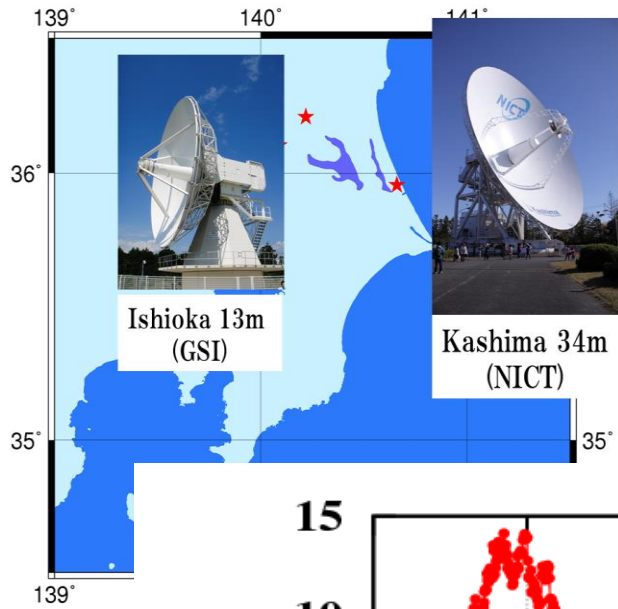
遅延分解関数



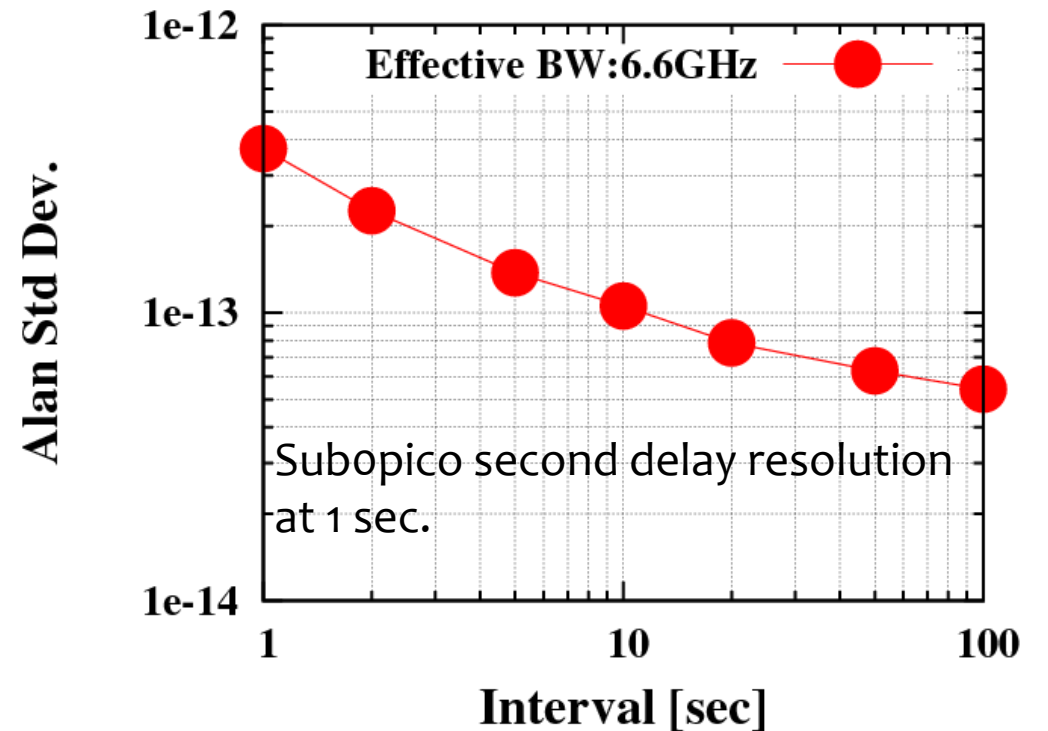
COR. AMP



広帯域群遅延量(3.2-12.6GHz)



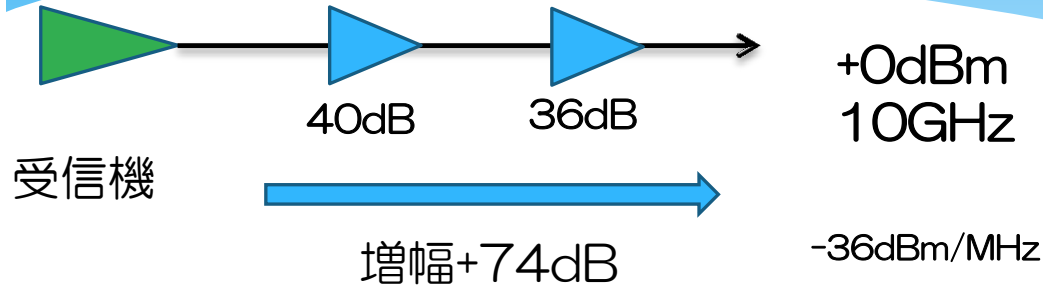
Alan Standard Deviation



広帯域システムはRFIに強い?!

$$200\text{K} = -176\text{dBm/Hz} = -116\text{dBm/MHz} = -76\text{dBm/10GHz}$$

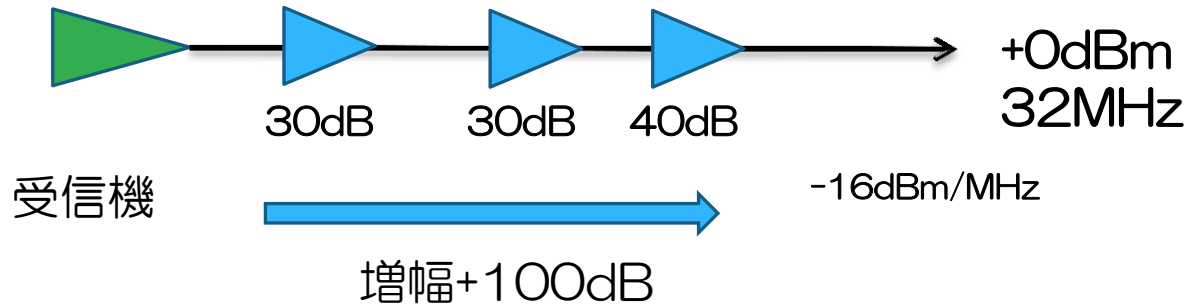
1MHz幅ノイズフロアから+20dBup
のRFIがあった場合



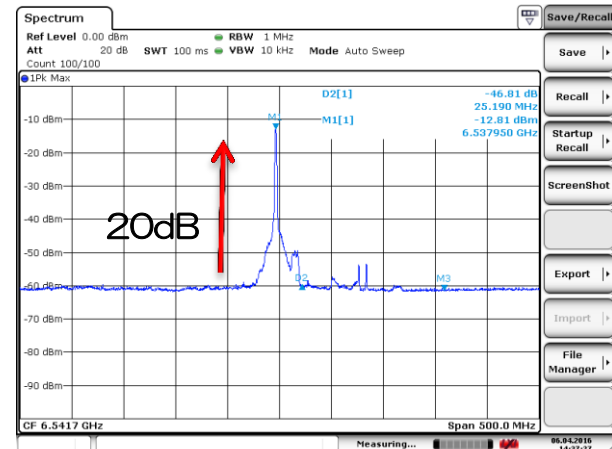
RFIのパワー vs 信号(雑音)のトータルパワー
-22dBm < **0dBm**

広帯域~10GHz

狭帯域~32MHz



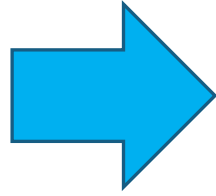
RFIのパワー vs 信号(雑音)のトータルパワー
+4dBm > **0dBm**



小型アンテナの感度改善

1.5m@小金井

2.4m



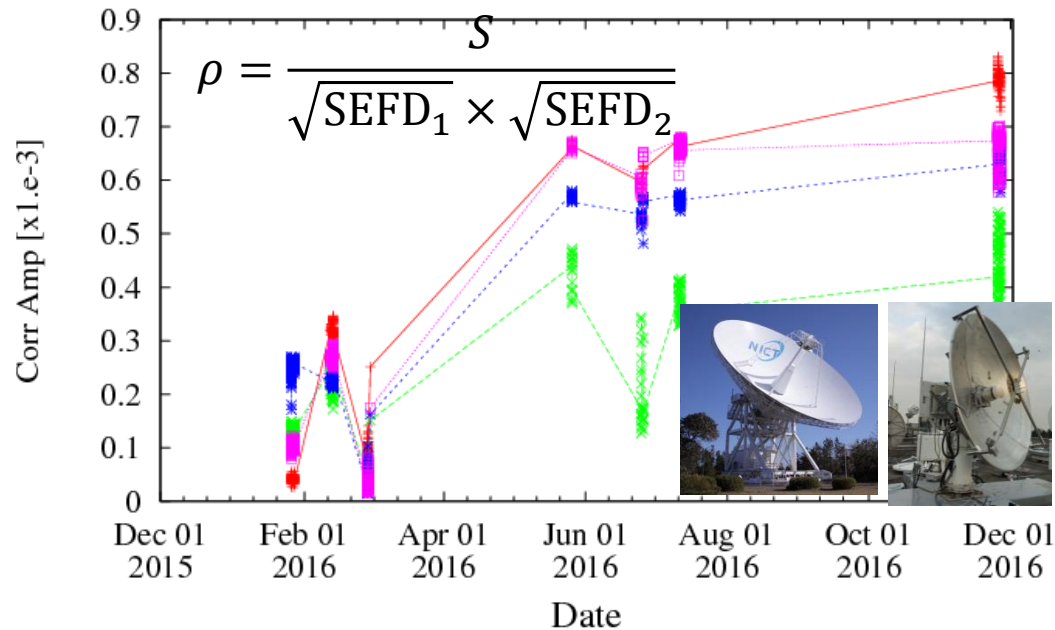
開口面積2倍
開口効率2倍
合計4倍以上の感度改善



1.6m@産総研(つくば)

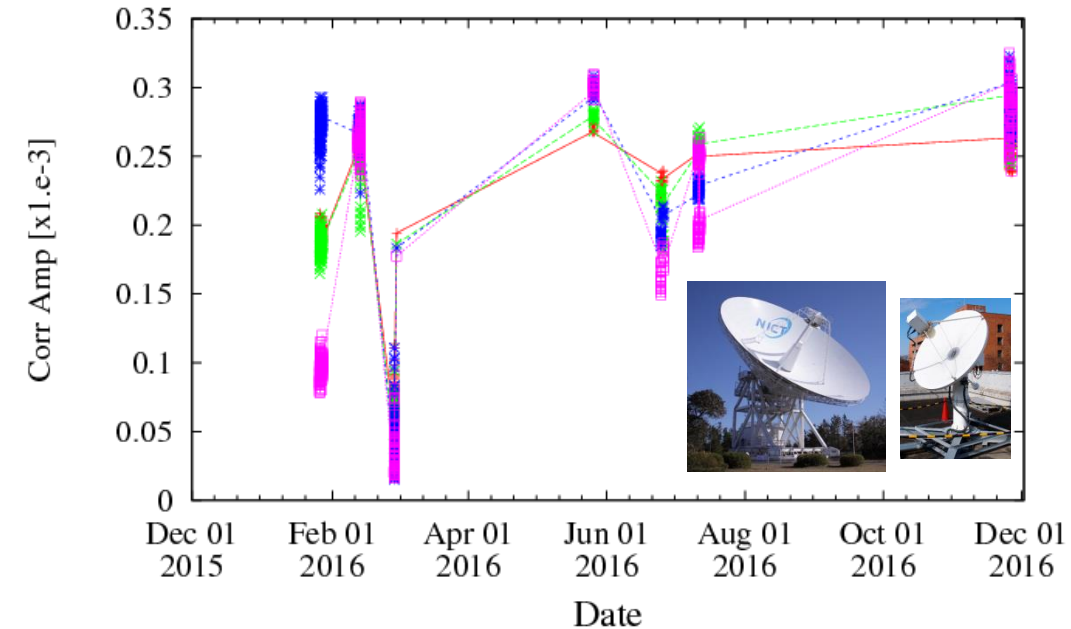
Band-A + Band-B * Band-C * Band-D □

3C84 Corr.Amp. on OB baseline



Band-A + Band-B * Band-C * Band-D □

3C84 Corr.Amp. on OA baseline



発表内容

1. 広帯域VLBI観測システムの特徴・概要
2. 2016年のVLBI観測・基線解析結果

NICT-産総研間の UTC周波数比較 実験

OA, OB基線の観測遅延量から AB基線の遅延量を算出して 基線解析する。
CALC/SOLVE を使って基線解析

2016年 観測日	観測局	観測数	観測時間	時間/Scan
1月26-27日	鹿島34-小金井-産総研	1330/1500	46時間	110秒
2月12-13日	鹿島34-小金井-産総研	1250/1600	47時間	106秒
2月28-29日	鹿島34-小金井-産総研	1050/1450	49時間	122秒
5月16-17日	鹿島34-小金井-産総研	1220/1410	31時間	79秒
6月24-25日	鹿島34-小金井-産総研	1800/1850	49時間	95秒
7月10-11日	鹿島34-小金井-産総研	1960/2003	48時間	86秒
8月23-24日	石岡13-小金井	1372/1385	43時間	112秒
9月12-13日	石岡13-小金井-産総研	1600/1640	35時間	77秒
11月25-28日	鹿島34-小金井-産総研	2193/2237	62時間	86秒
12月09-12日	鹿島34-小金井-産総研	2022/2063	62時間	109秒

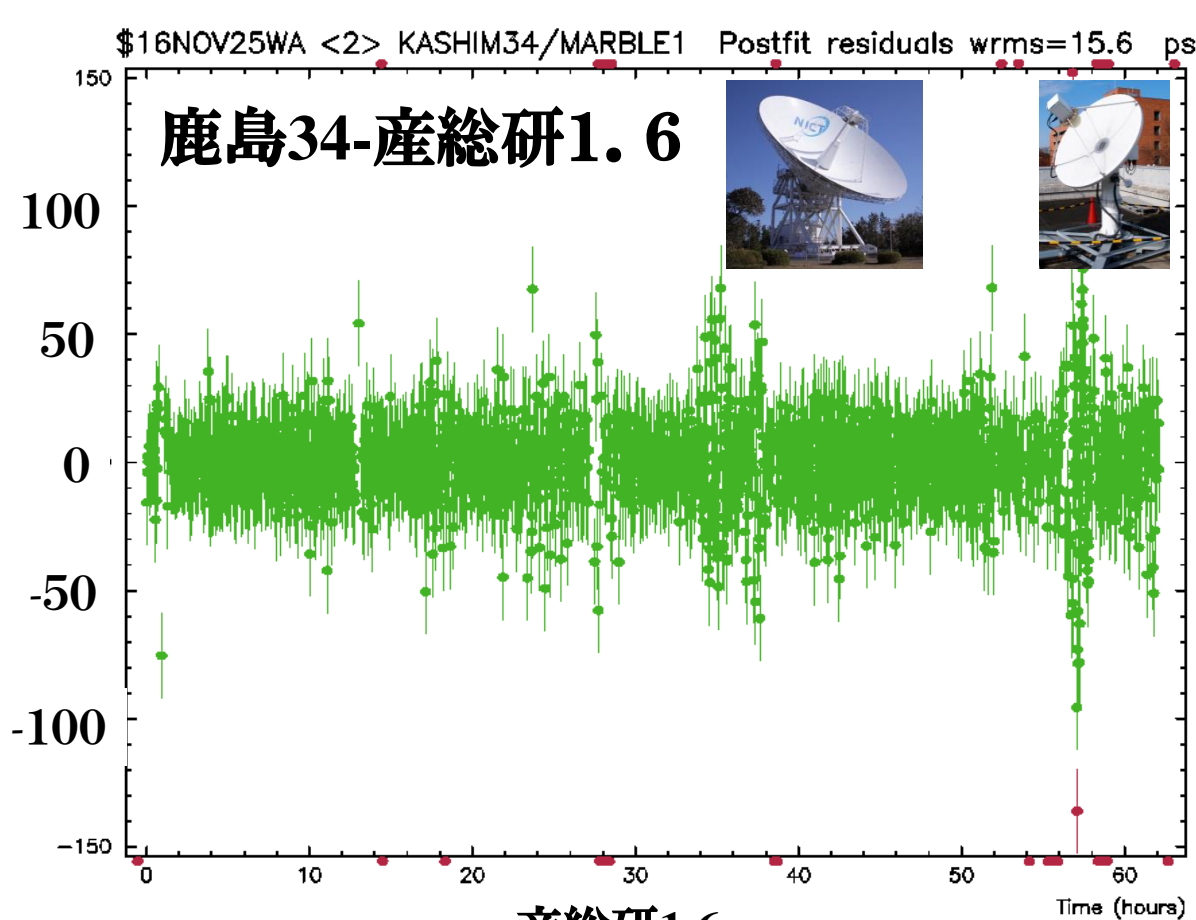
データ処理・解析手順

- * 観測: 1GHz幅 4バンド(5.9GHz, 7.1GHz, 8.7GHz, 10.6GHz)の観測
- * 相関処理: GICO3ソフトウェア相関器 による処理
- * 遅延量: 広帯域バンド幅合成ソフト により高精度遅延決定
- * データベース: Mark3DB 作成
- * 解析: NASA/GSFCのCALC11/SOLVE を使って基線解析
- * 推定パラメータ: 局位置、大気、クロック

CALC/SOLVEの解析残差

Baseline Length

鹿島34 - 産総研1.6: 48718193.8 mm 0.6 mm
 鹿島34 - 小金井2.4: 109427397.8 mm 0.7 mm
 小金井2.4 - 産総研1.6: 70218038.2 mm 0.8 mm

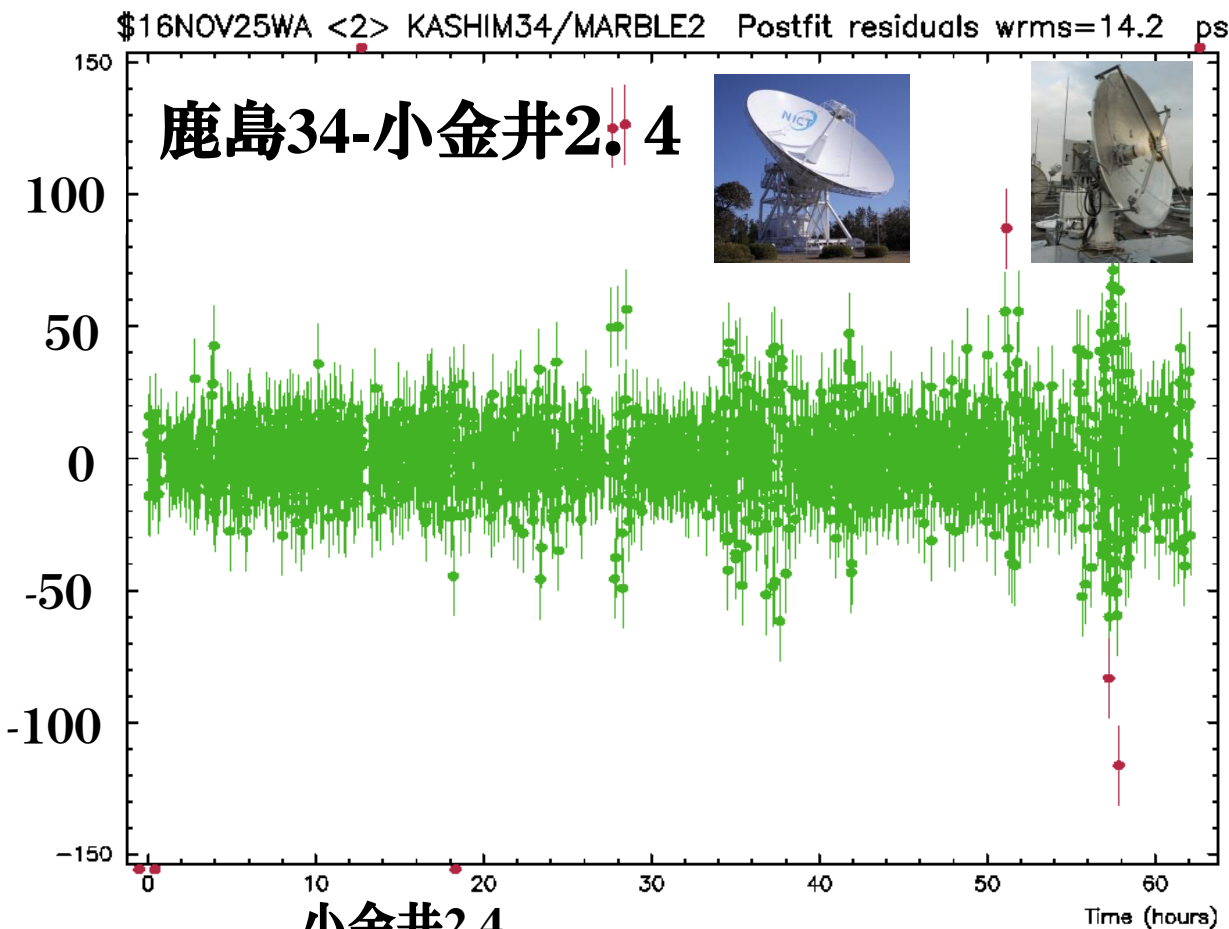


産総研1,6

X : -3962279099.2 mm 1.9 mm

Y : 3308886482.2 mm 1.5 mm

Z : 3733538092.1 mm 1.8 mm



小金井2.4

X: -3942068754.6 mm 1.8 mm

Y: 3368281011.8 mm 1.5 mm

Z: 3702003908.5 mm 1.7 mm

CALC/SOLVEの解析残差

Baseline Length

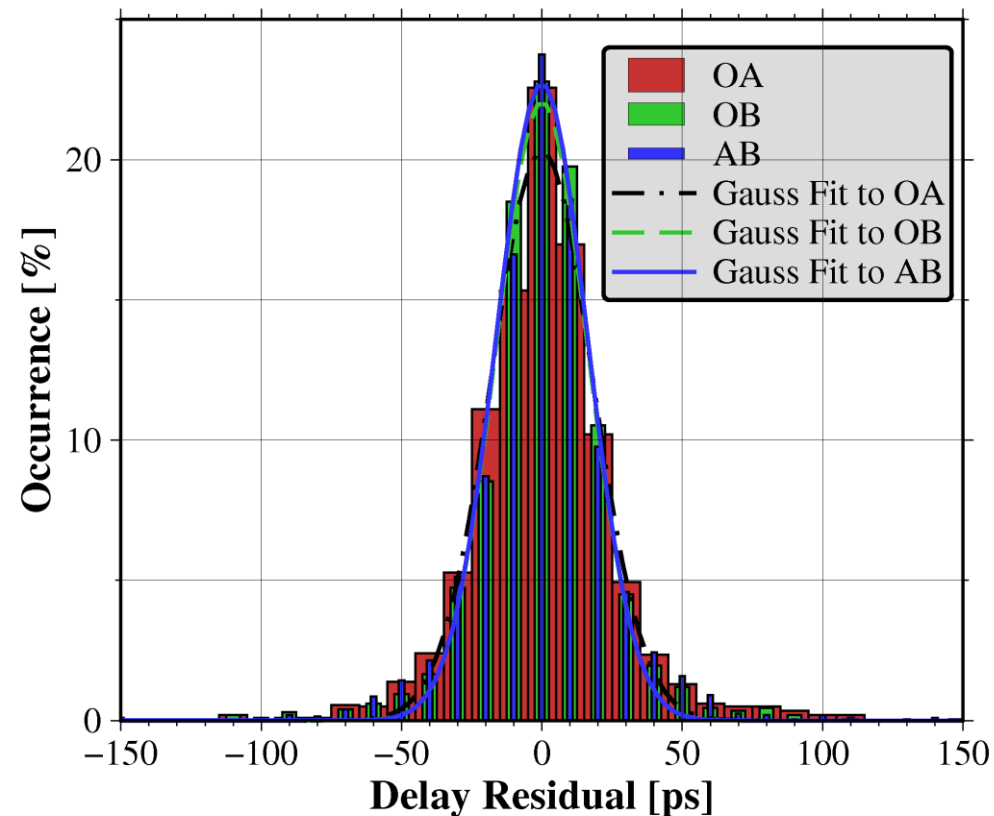
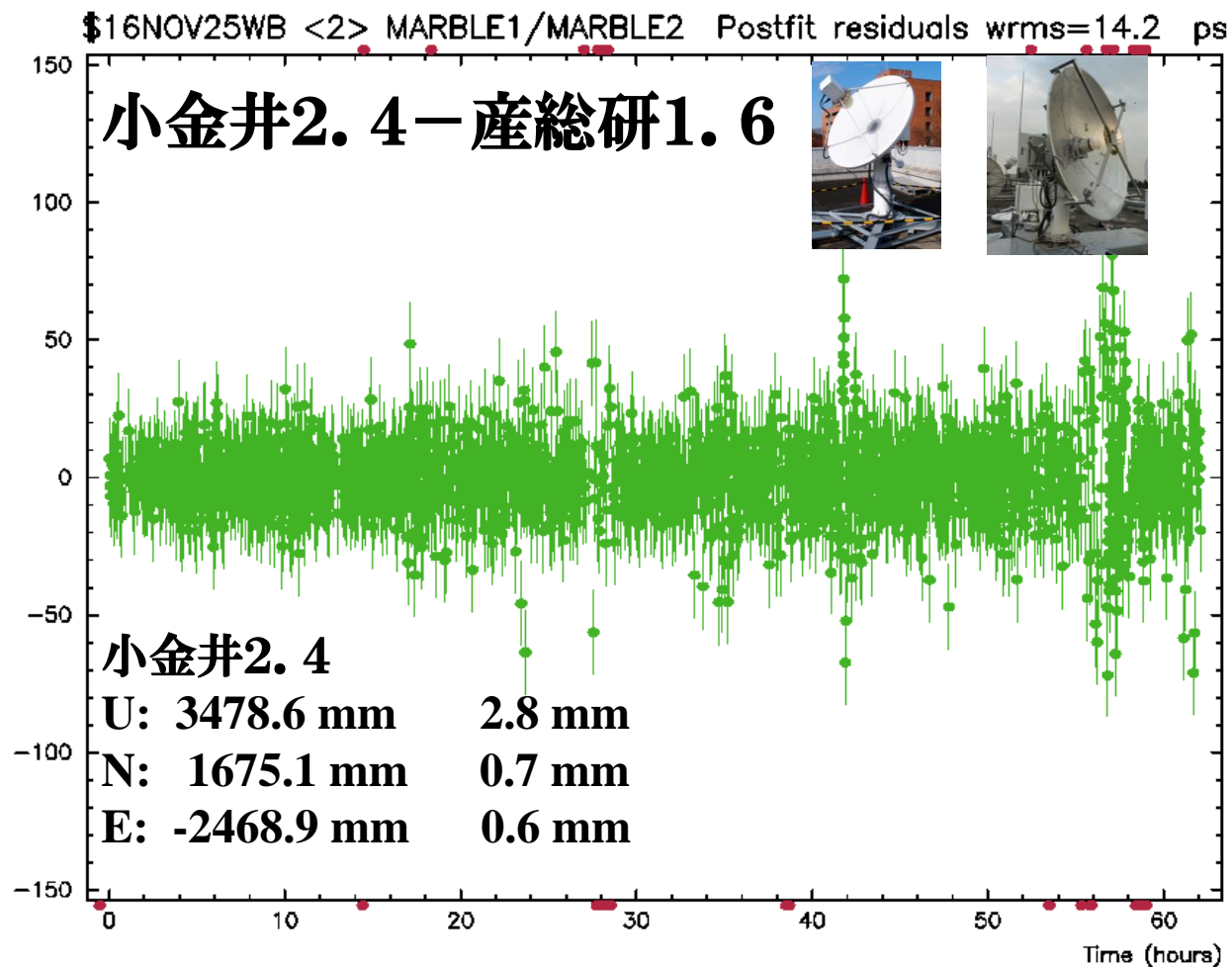
産総研1.6 - 小金井2.4 : 70218041.2 mm 0.7 mm

解析の精度は、遅延計測の精度でなく、
大気の遅延が支配している。

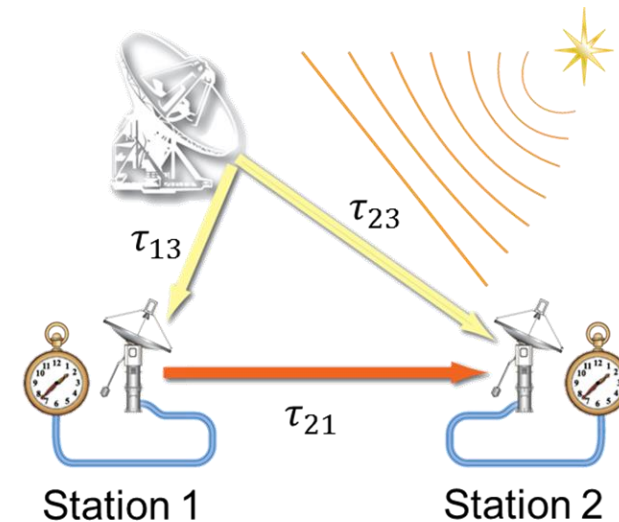
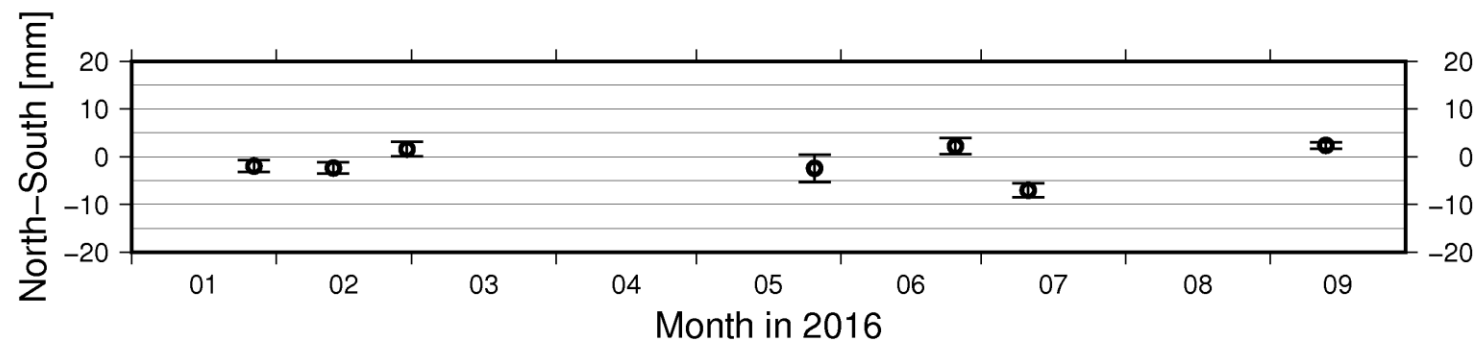
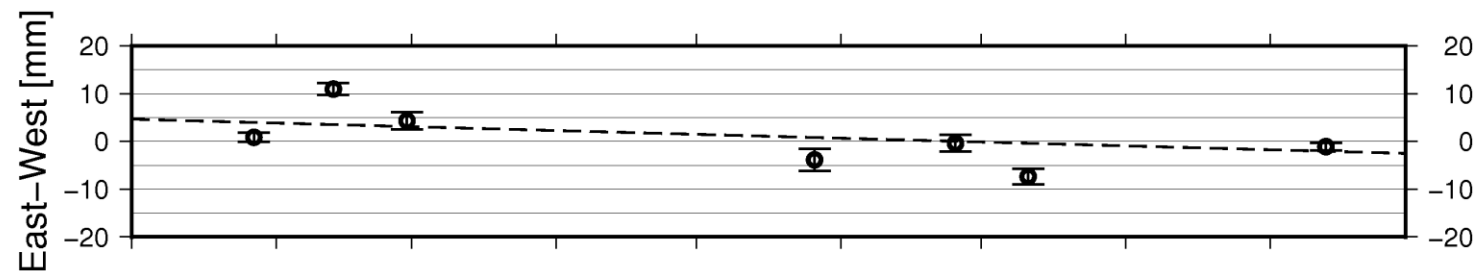
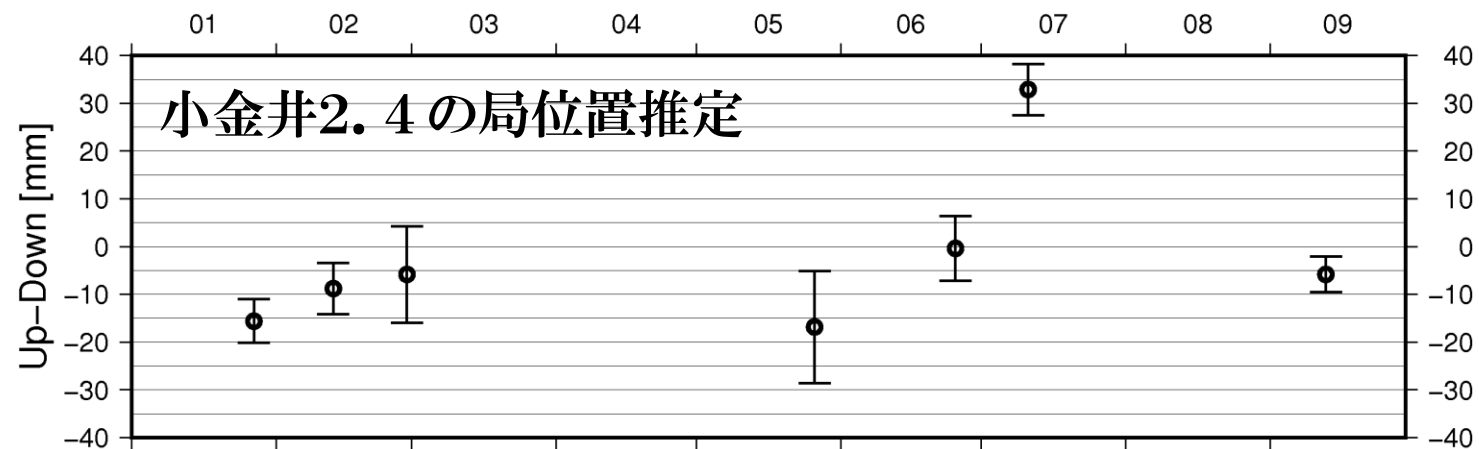
O:Kashim34

A:MARBLE1 つくば1.6m

B:MARBLE2 小金井2.4m



小型アンテナ間の基線解析結果



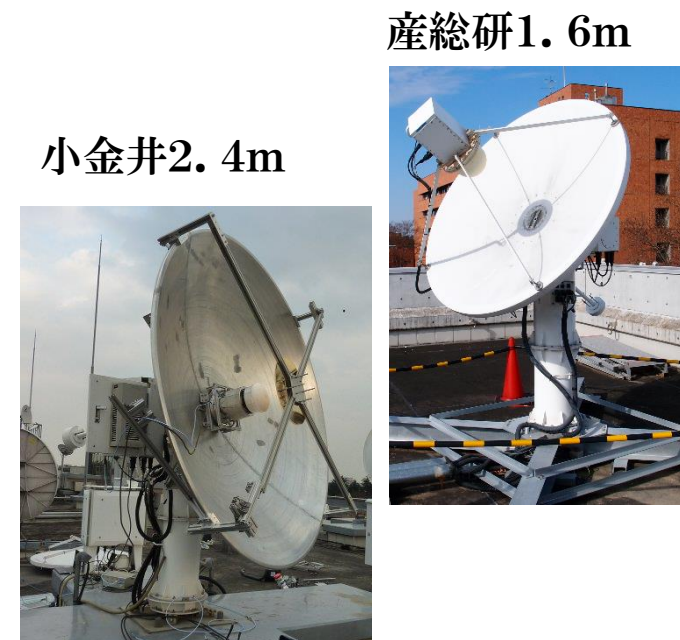
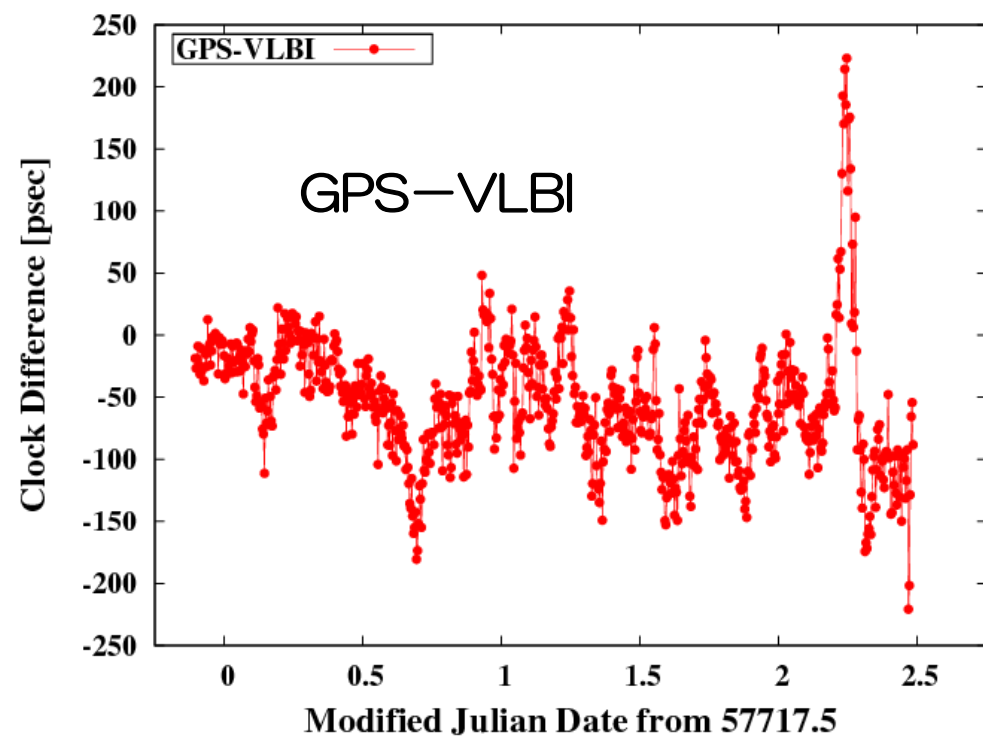
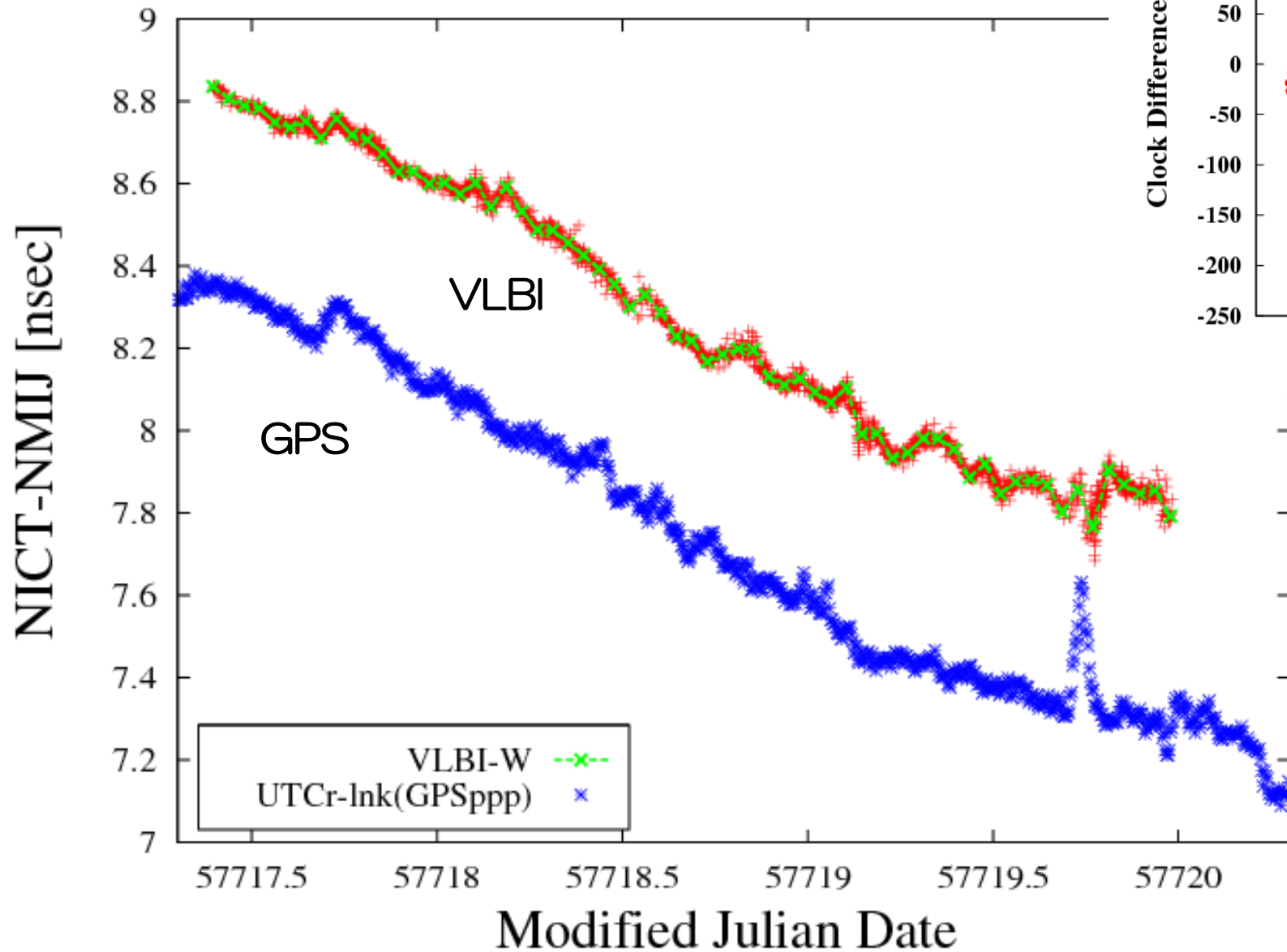
$$\tau_{21} = \tau_{13} - \tau_{23}$$

産総研1.6m

小金井2.4m

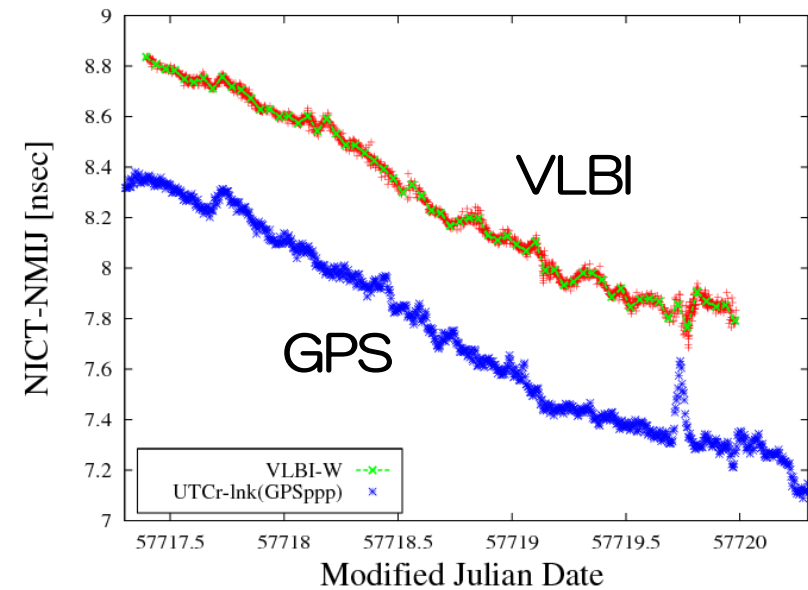
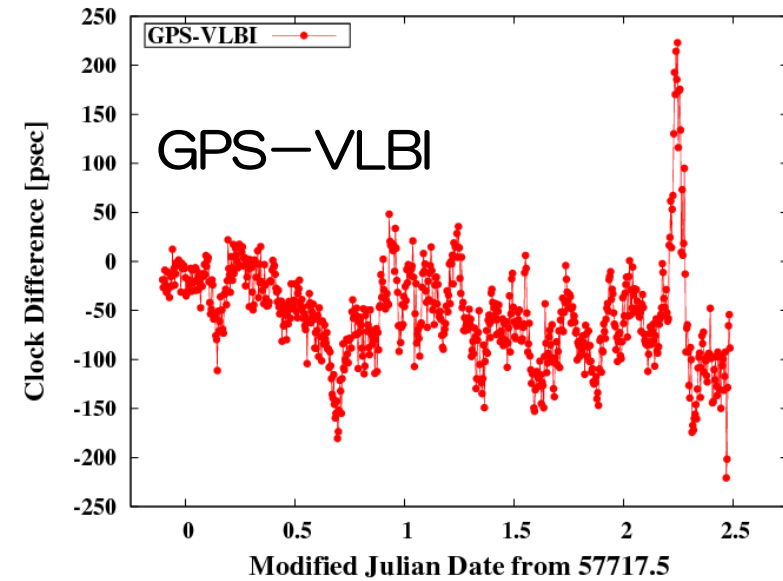
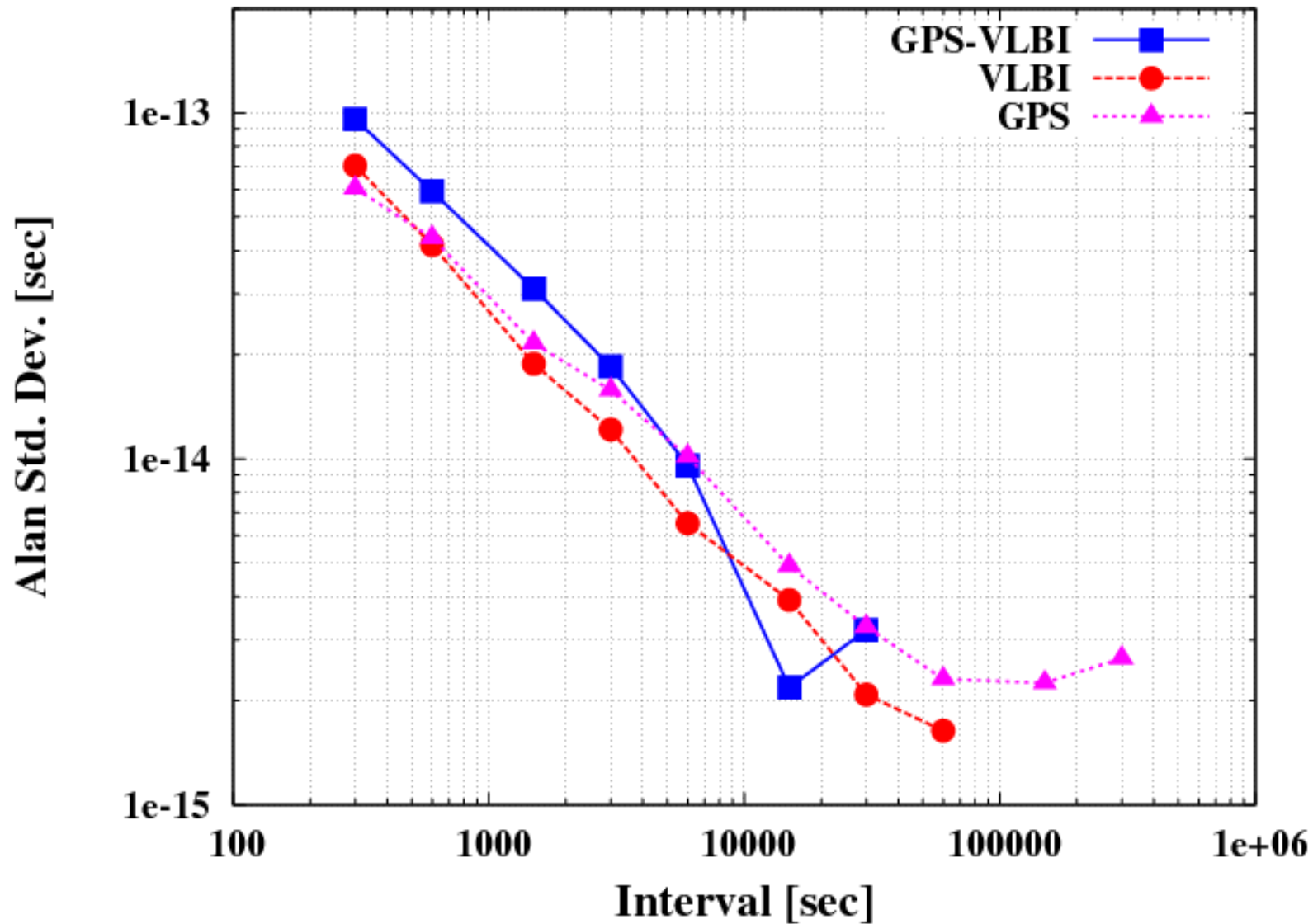


VLBIとGPS-pppによる クロック比較 2016Nov25 UTC(NICT) – UTC(NMIJ)



遠隔周波数比較：VLBIとGPS

GPS-VLBI, VLBI, GPSのアラン標準偏差



まとめ

1. VGOSに対応する広帯域VLBIシステムが安定運用状態になっている。
 1. 鹿島34-MBL1-MBL2、石岡13-MBL1-MBL2
 2. 広帯域の群遅延量の精度はサブピコ秒を実現
 3. 20psec@200秒程度の遅延変動(大気による)を確認
2. VLBIセッションを実施し、
 1. 小型アンテナ間の局位置(水平<10mm,鉛直<20mm)推定
 2. 原子時計間のクロック比較ができるようになった。
3. 今後の計画
 1. 海外の周波数標準機関への小型アンテナの移設を検討する。
 2. 偏波の異なる観測(VV,HH,VH,HV)のバンド幅合成技術の開発

ご清聴ありがとうございました

- 広帯域フィードの開発には、国立天文台の共同開発研究資金（研究代表者：山口大学藤沢さん）の提供を受けています。
- 国内の大容量VLBIデータ交換には、JGN高速ネットワークにサポートいただいています。