

広帯域VLBIシステムの開発

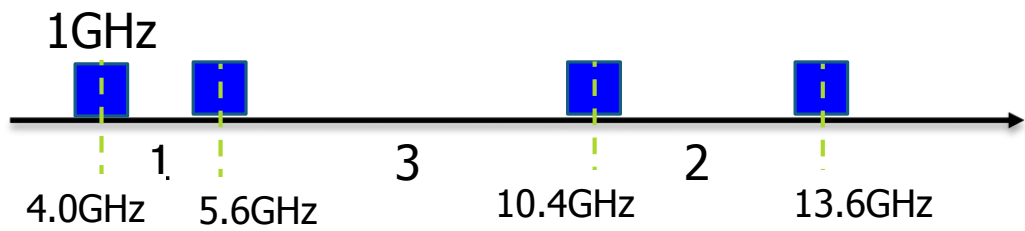
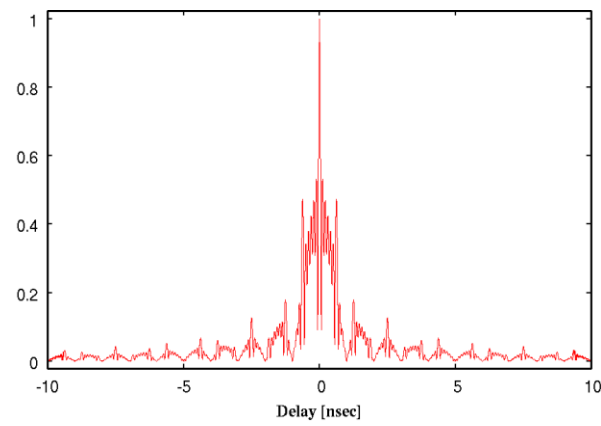
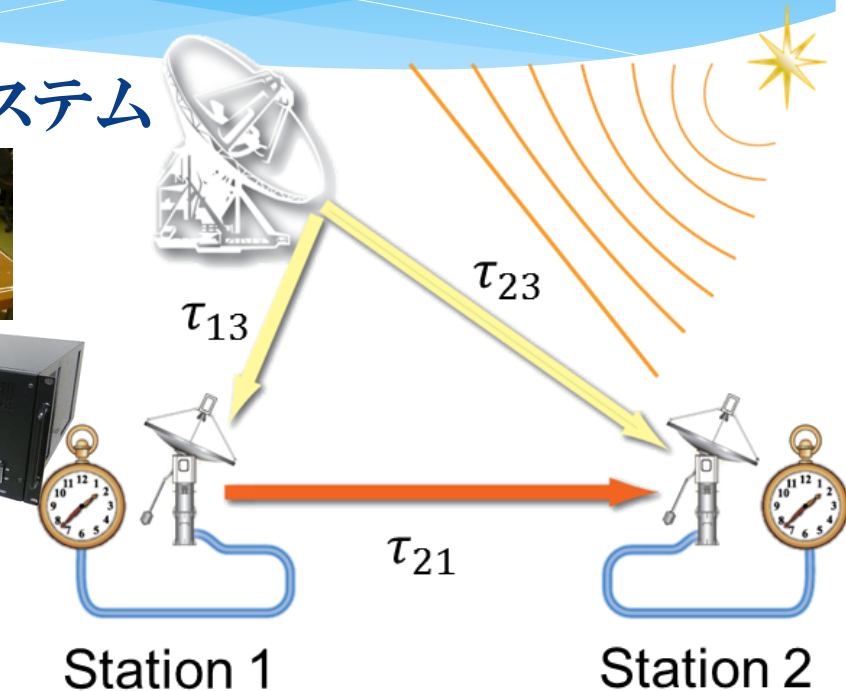
関戸衛, 岳藤一宏, 氏原秀樹, 近藤哲朗, 宮内結花, 堤正則, 川合栄治,
長谷川新吾, 瀧口博士, 市川隆一, 花土ゆう子, 小山泰弘, 小室純一,
寺田健次郎, 難波邦考, 高橋留美, 岡本慶大, 青木哲郎, 池田貴俊

情報通信研究機構

渡部謙一, 鈴山智也: 産業技術総合研究所

Gala-V Project Overview

- 小型広帯域のアンテナを原子時計の開発拠点に設置して、原子時計間の周波数比較を行う。
- 観測周波数帯域は、VGOSと互換性のある広帯域VLBIシステム
- 独自技術
 - 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)



← 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。

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

小型アンテナ間の基線1-2間の遅延量は1-3, 2-3基線間のデータから得られる

昨年の報告からの主な進捗

- 8GHz幅のVLBI実験実施: 広帯域VLBI観測により1秒でサブピコ秒($\sim 0.2\text{mm}$)の精度の測定が可能となった。(2015・1)
- 広帯域(3.2–13GHz)フィードを34mアンテナに搭載(2015・7)
- GSI石岡13mアンテナとの間でVLBI実験を実施(2015・8)
 - ダイレクトサンプリング法式により、広帯域の信号を位相校正(PCAL)信号なしに合成できることを実証。
 - しかし、最終的な測地・クロックパラメータ推定精度は、大気の遅延誤差等により制限されそうである。
- 広帯域フィードを使った日米国際実験実施: K5/VSI-Mk6 (2015・1)

VGOS (VLBI Global Observing System)

* VGOSとは

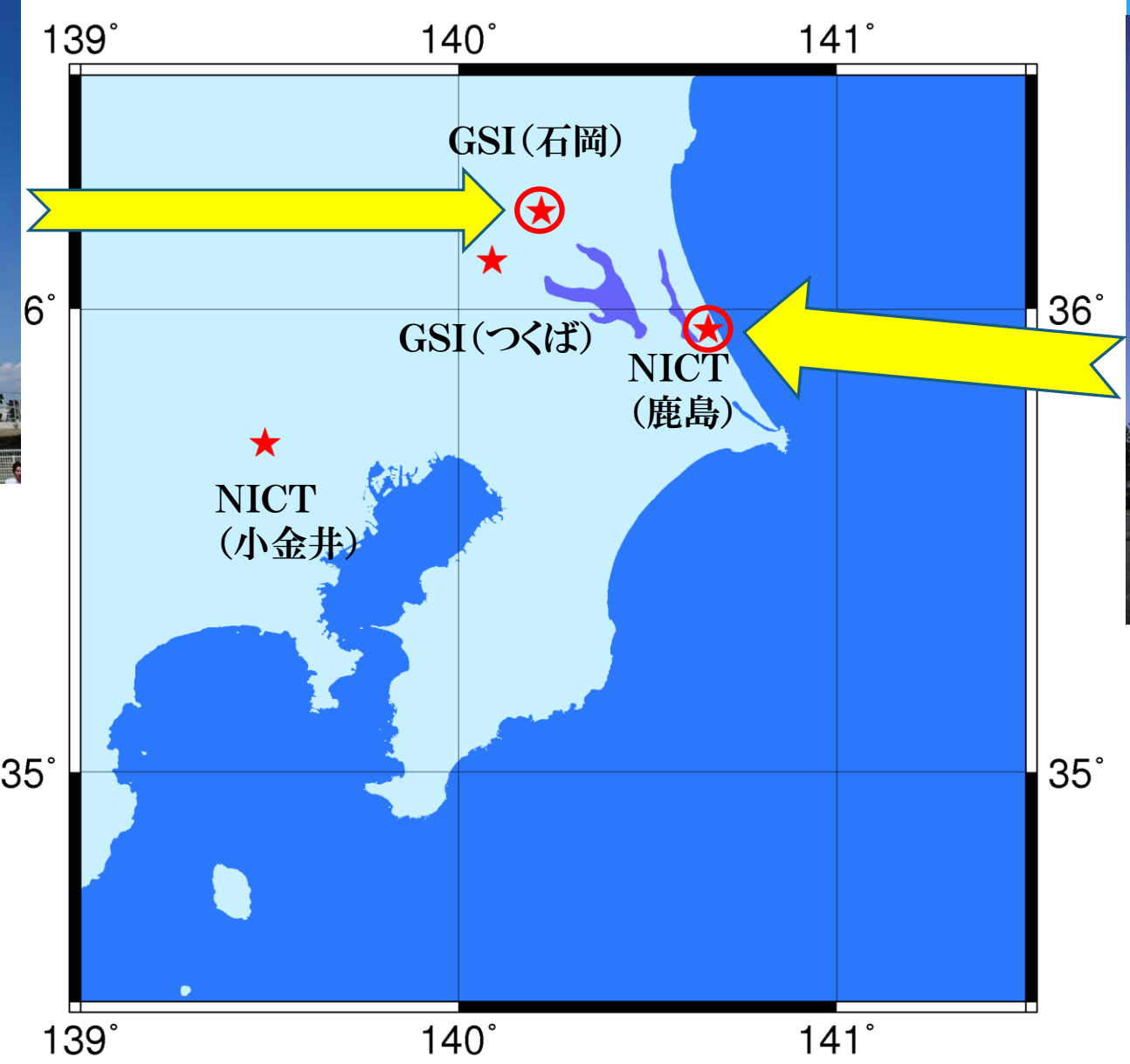
- * IVS (国際VLBI事業)が進める次世代の測地VLBIシステム
- * システム: **広帯域(2-14GHz)、高速駆動アンテナ**
- * 目標精度: 1 mm, アンテナ整備: 米国、ドイツ、日本、オーストラリア、スペイン、ロシア、スウェーデン、ノルウェー、中国など
- * 国土地理院の石岡VGOS局
 - * 国内初のVGOS仕様のアンテナ, 2014年完成
- * NICTのGALA-V (鹿島34m、MARBLE1, 2)も共通の観測周波数を持ち、共同観測可能



GSI石岡局と鹿島34m



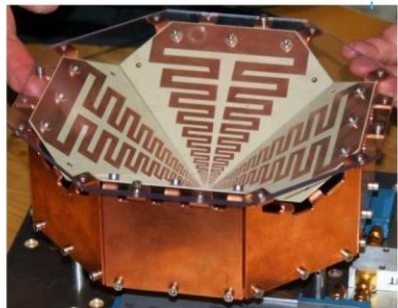
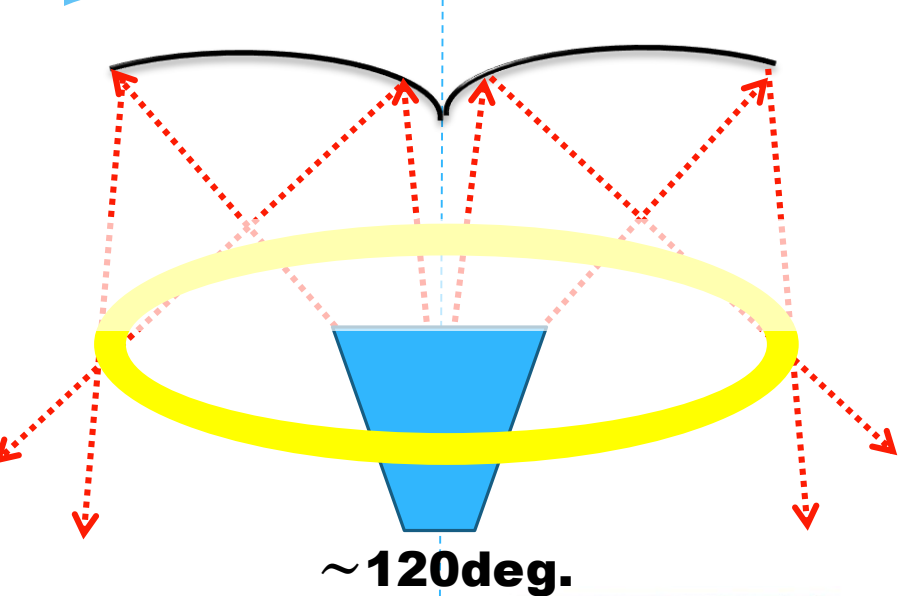
石岡13m(GSI)



鹿島34m(NICT)

NICT 広帯域フィードの独自開発

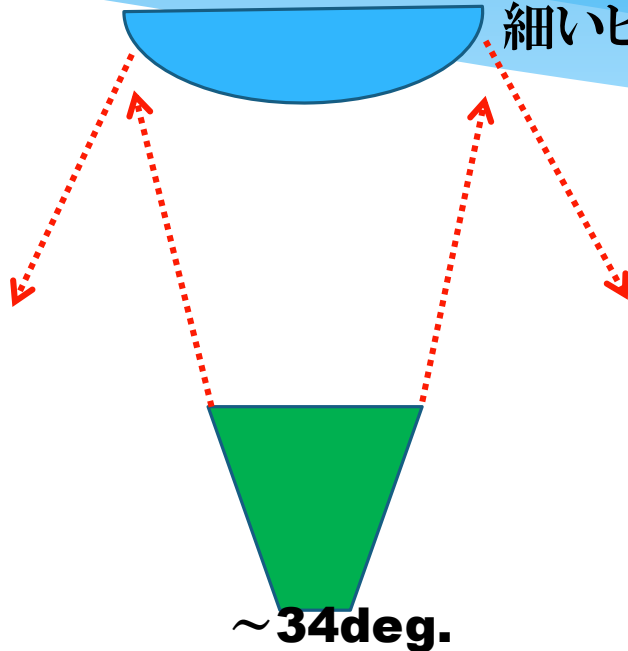
リングフォーカス



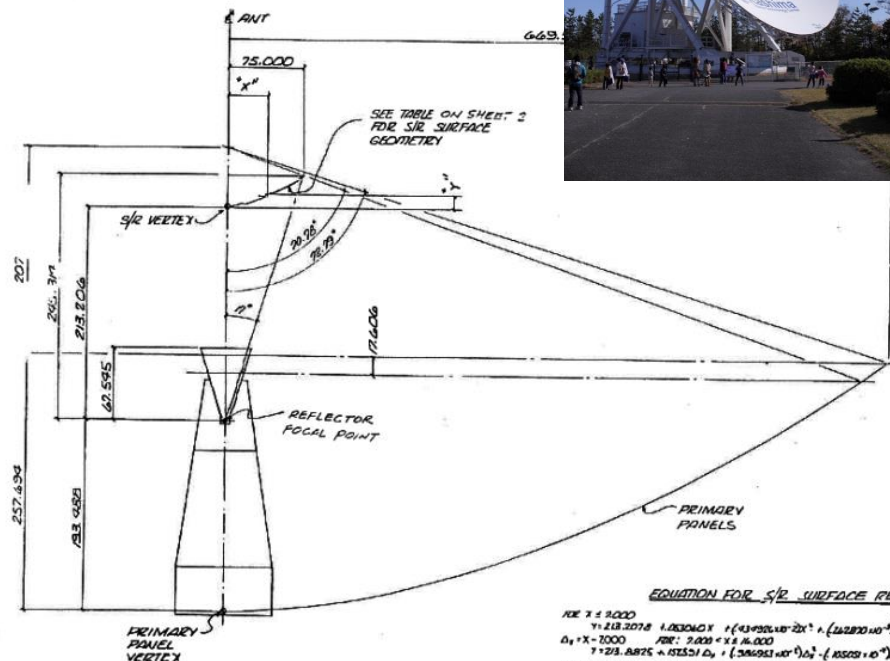
イレブンフィード

カセグレン

広帯域と
細いビーム幅の両立



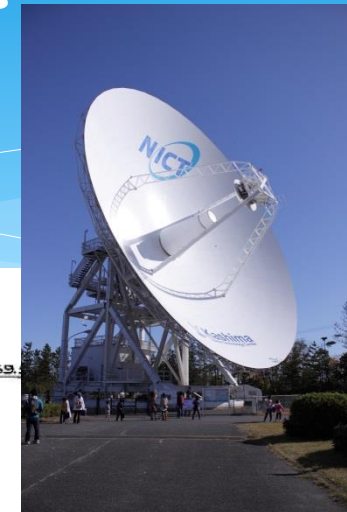
QRFH (JPL)



NOTES:
1. FOR ADDITIONAL COORDINATES OF SUB-REFLECTOR CONTOUR USE EQUATION
2. S/B REFLECTOR GEOMETRY GENERATED FROM MATRIX [A] = 1007336

EQUATION FOR S/R SURFACE REF

$$\begin{aligned}
 \text{FOR } X = 3000 & \quad Y = 218.2078 + 1.083040X + (-434950 \times 10^{-10})X^2 + (1.02870 \times 10^{-10})X^3 - 218.2078 \\
 \text{FOR } X = 2000 & \quad Y = 218.2078 + 1.083040X + (-434950 \times 10^{-10})X^2 + (1.02870 \times 10^{-10})X^3 - 218.2078 \\
 \text{FOR } X = 1500 & \quad Y = 218.2078 + 1.083040X + (-434950 \times 10^{-10})X^2 + (1.02870 \times 10^{-10})X^3 - 218.2078 \\
 \text{FOR } X = 1000 & \quad Y = 218.2078 + 1.083040X + (-434950 \times 10^{-10})X^2 + (1.02870 \times 10^{-10})X^3 - 218.2078 \\
 \text{FOR } X = 500 & \quad Y = 218.2078 + 1.083040X + (-434950 \times 10^{-10})X^2 + (1.02870 \times 10^{-10})X^3 - 218.2078 \\
 \text{FOR } X = 0 & \quad Y = 218.2078 + 1.083040X + (-434950 \times 10^{-10})X^2 + (1.02870 \times 10^{-10})X^3 - 218.2078
 \end{aligned}$$

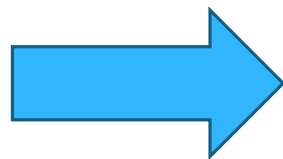




2015年7月 広帯域フィード(NINJA)を搭載



IGUANA-H Feed (6.5-15GHz)



NINJA Feed (3.2-14.4GHz, nominal)



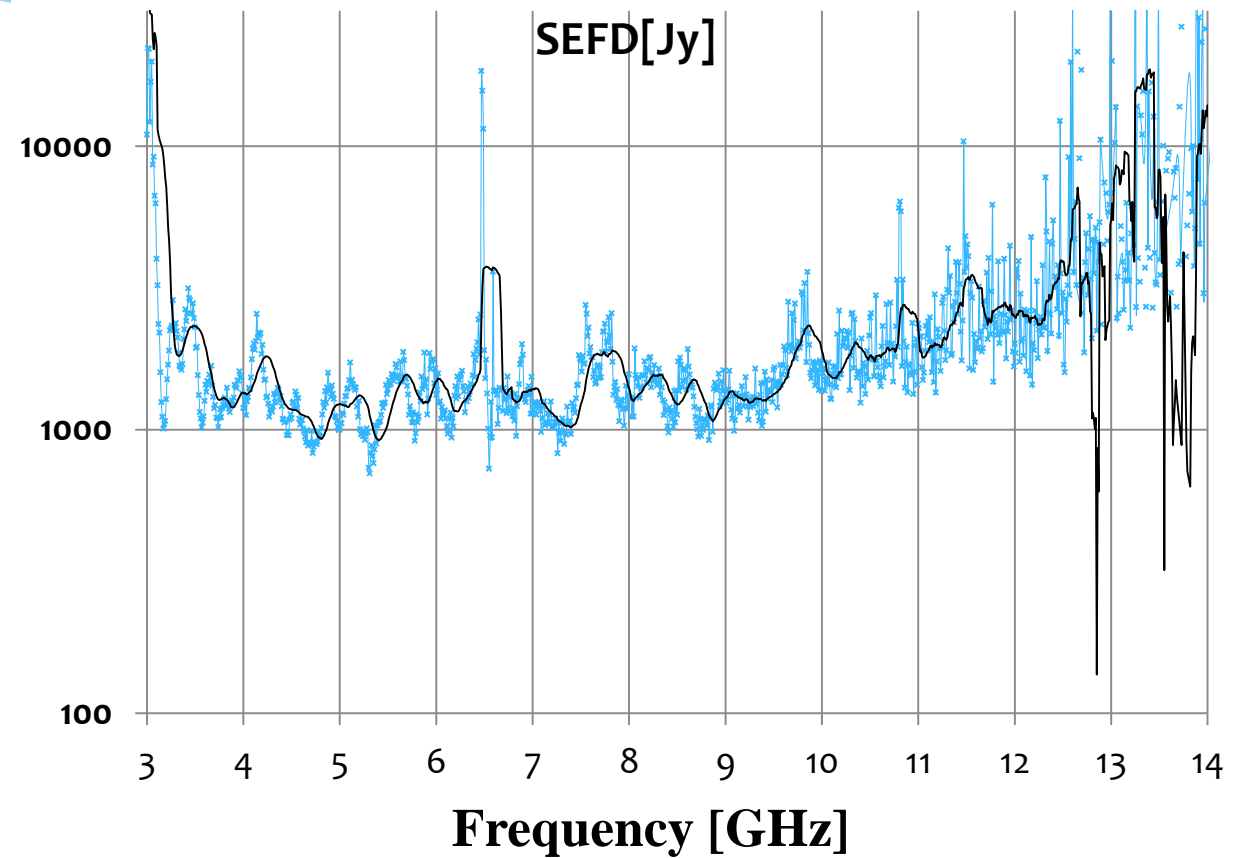
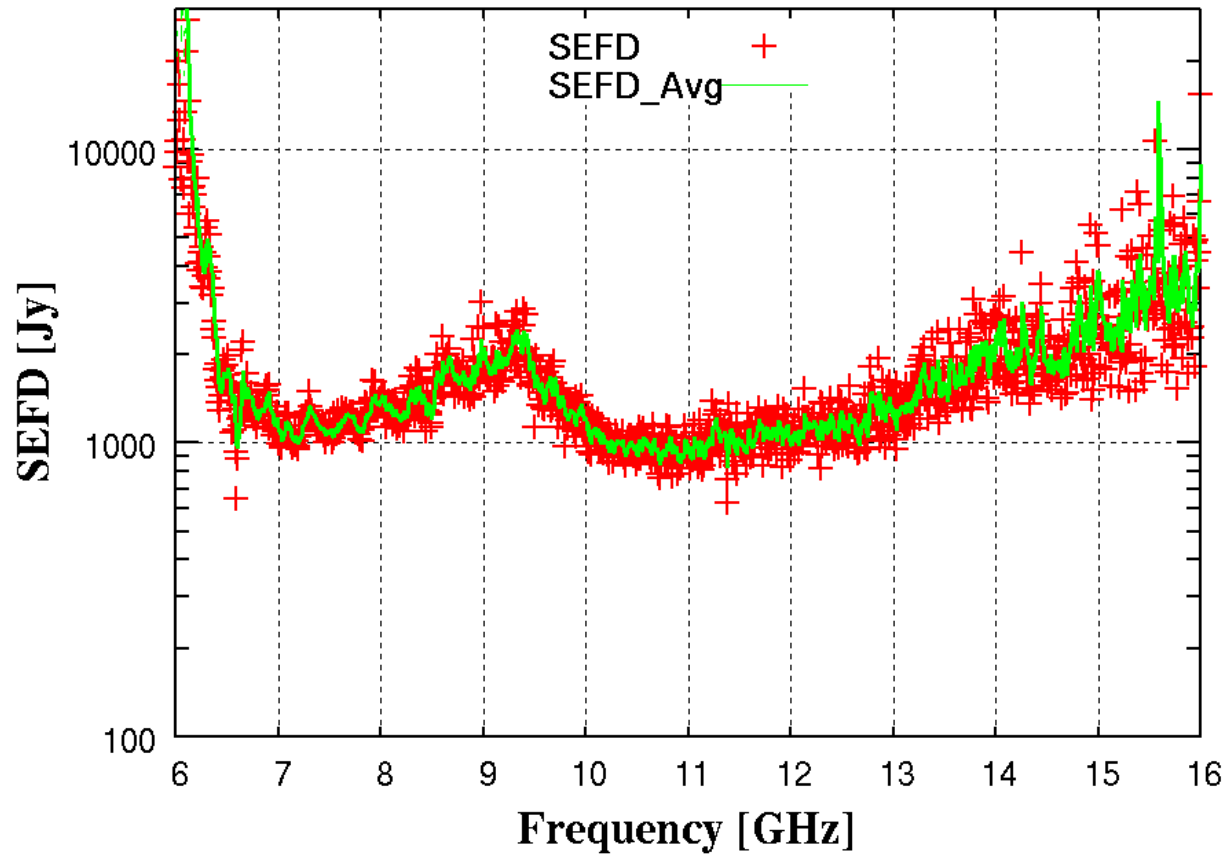
2014年～

IGUANA-Hフィード

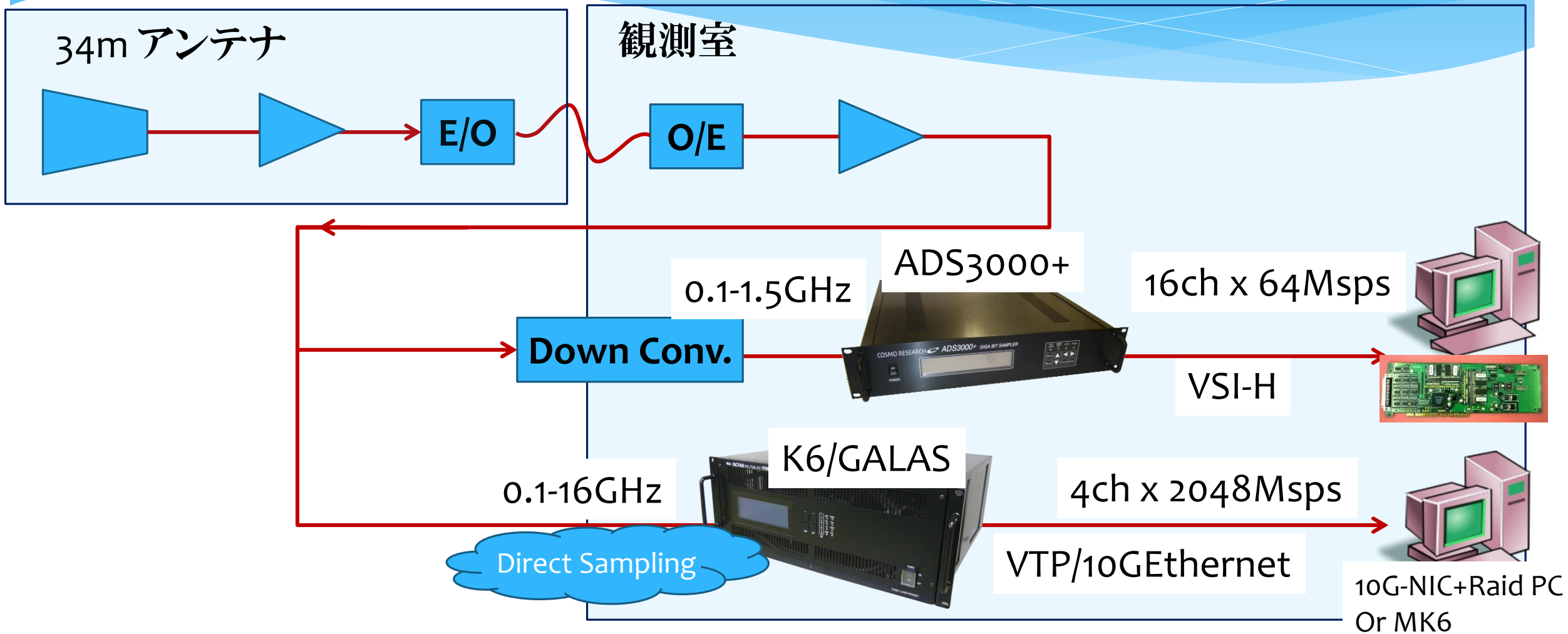


2015年8月～

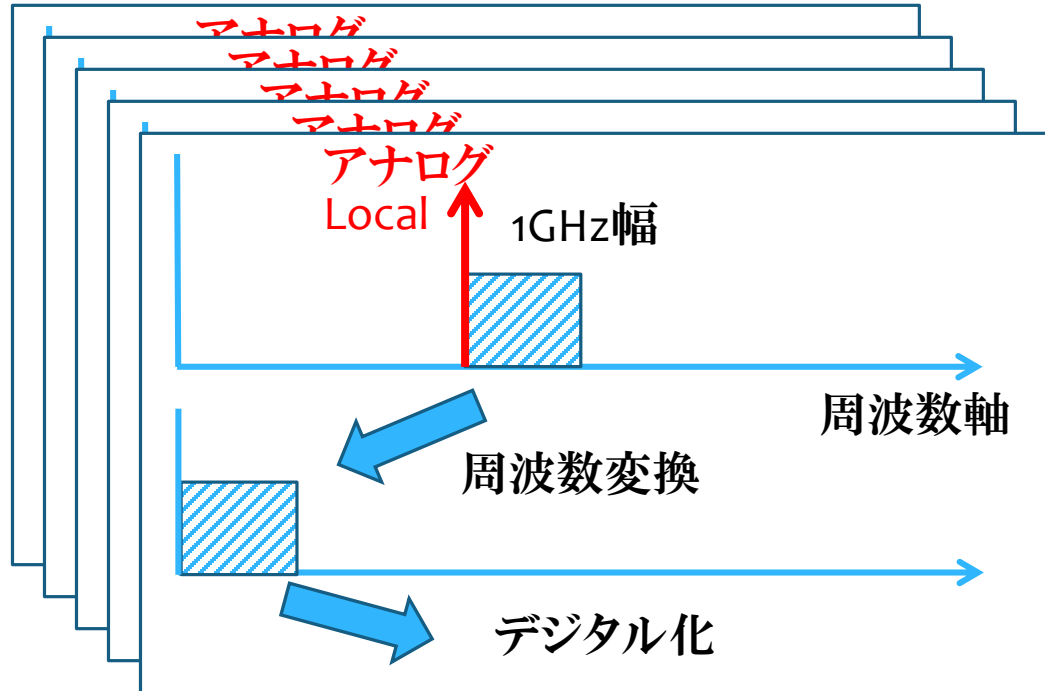
NINJA フィード



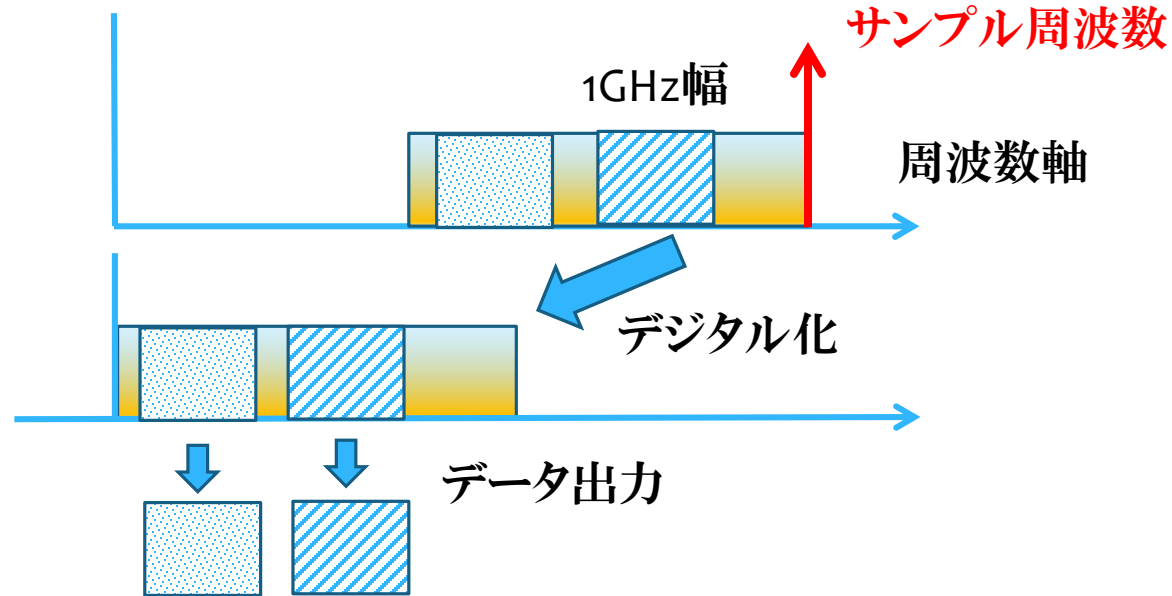
信号のパスと データ収集系



通常の 周波数変換+A/Dの場合



ダイレクトサンプリング方式

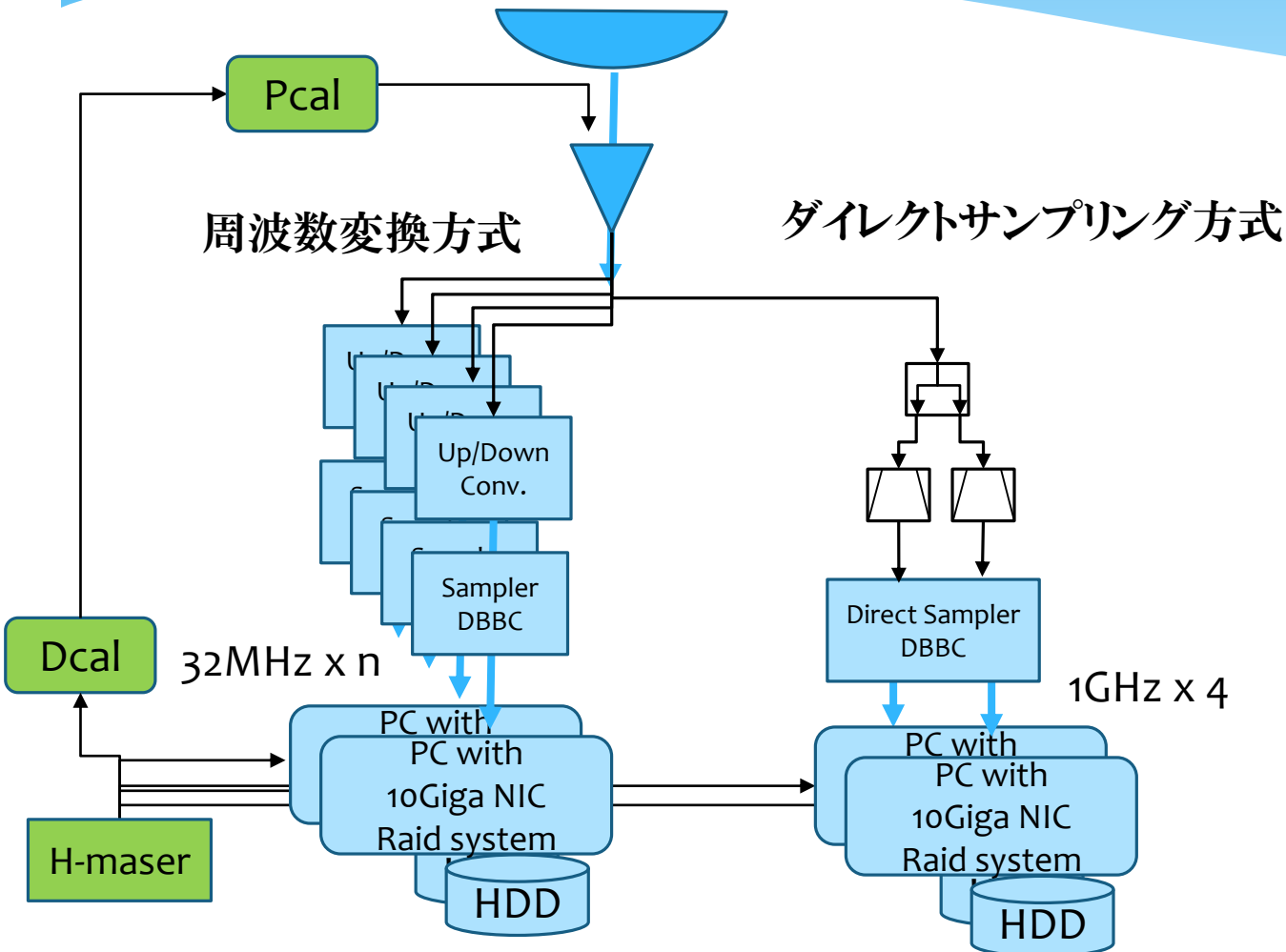


高速サンプラ
K6/GALAS



IF Input Port	2
Input Freq. Range	0.1-16.4 GHz
Sampling mode	DBBC Mode Nch/unit=1,2,3, or 4 2048 Msps/ch Qbit=1, or 2 bit
Output Port	10GBASE-SR, 4port
Max Data rate	16384 Mbps/port

ダイレクトサンプリング法の利点



1. システムが簡素化
 2. バンド(チャンネル)間の遅延(位相)変動要因が少ない
- 位相校正信号(Pcal)を省略できるか
→遅延校正(D-CAL)も不要に

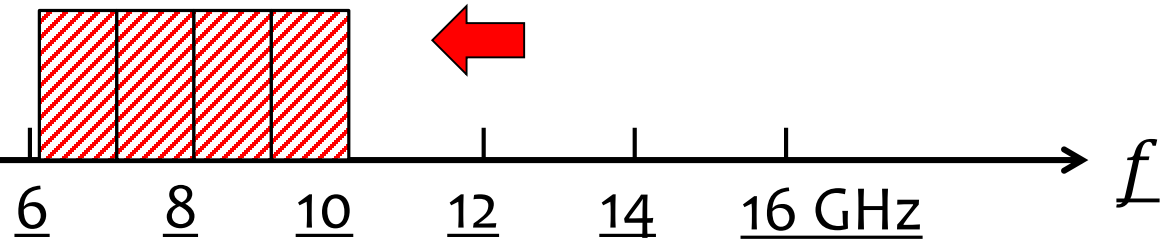
鹿島34-石岡13m 広帯域実験 2015年1月

8GHz広帯域観測の周波数配列

BW 1024MHz each

Direct Sampling (K6 / GALAS)

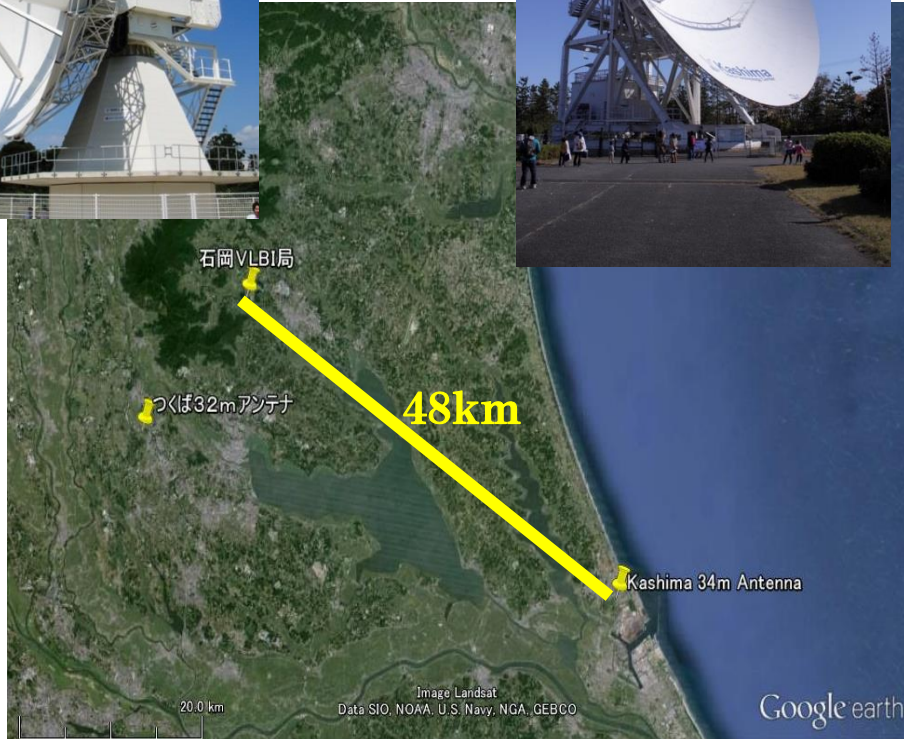
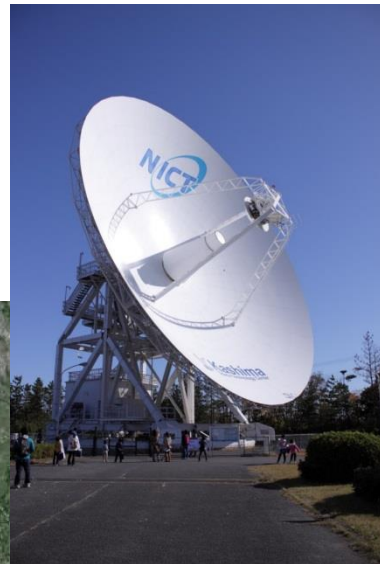
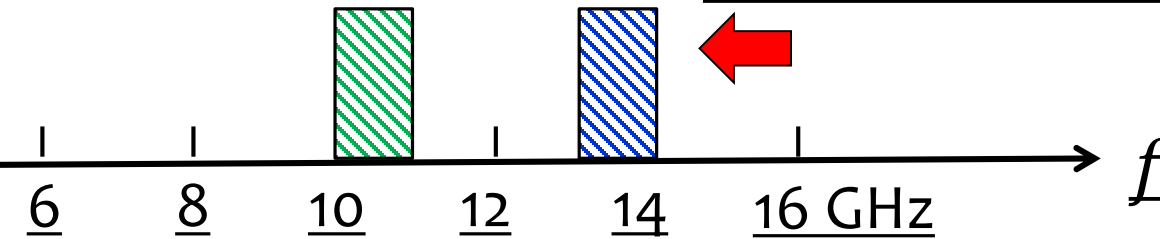
1 2 3 4



Down / Conv. + ADS3000+

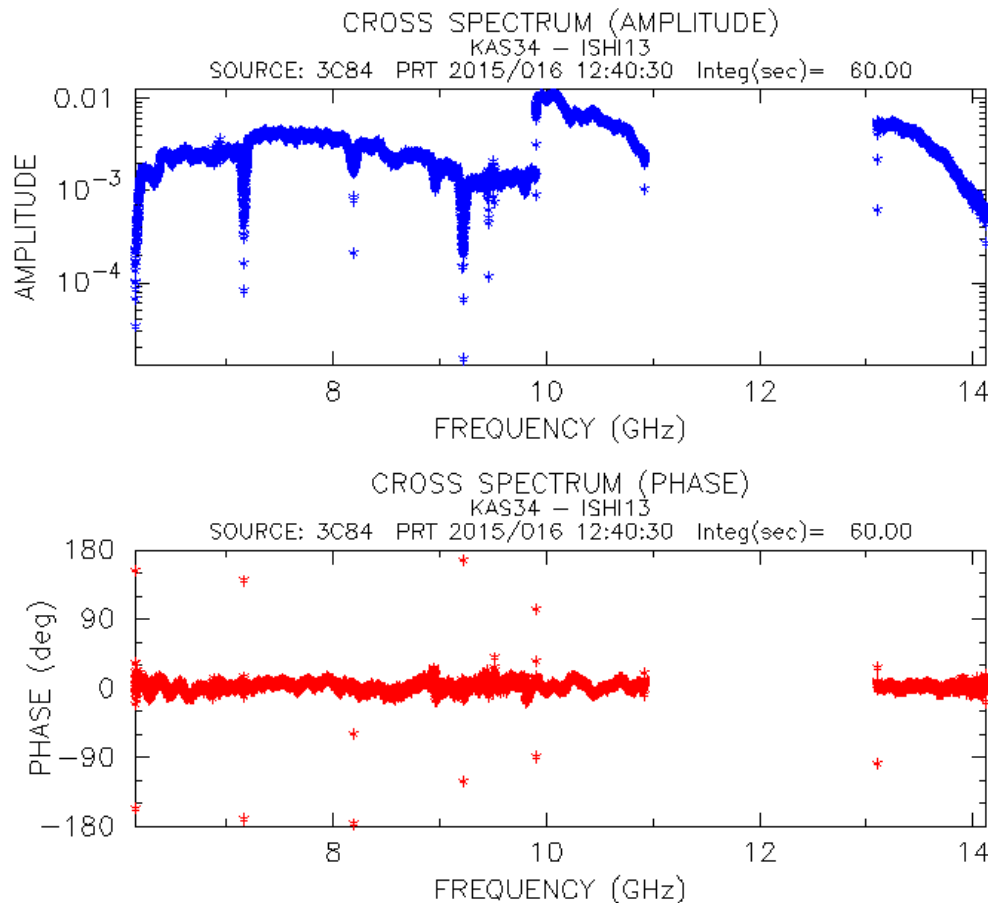
5

6

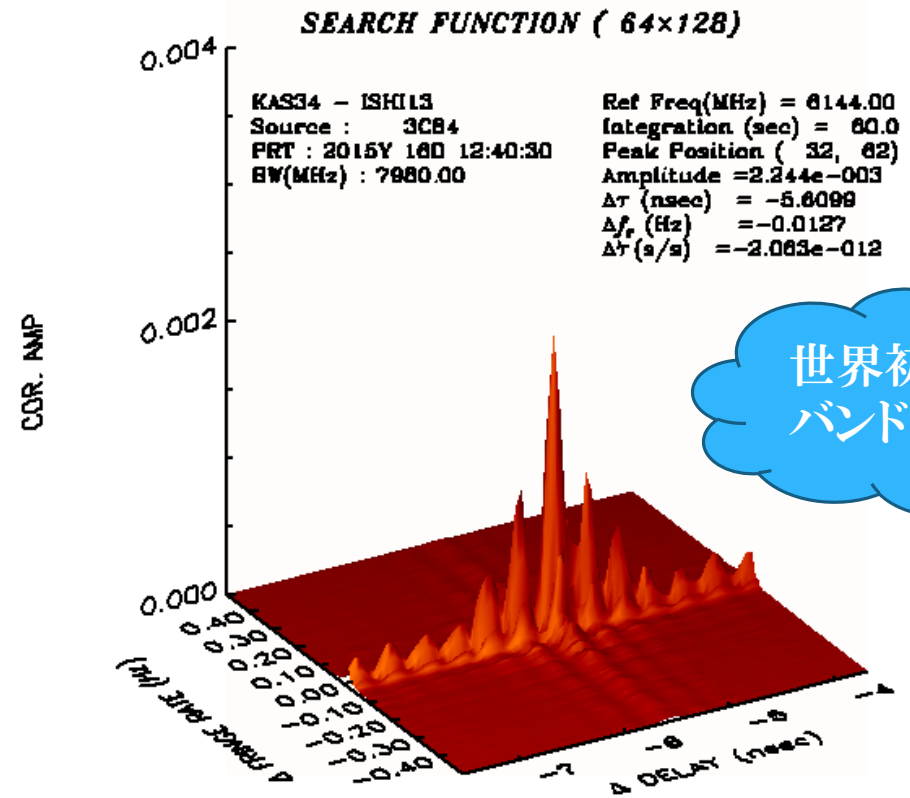


バンド幅合成 #1-#6 (6-14GHz) バンド内, バンド間遅延補正後

Cross Spectrum



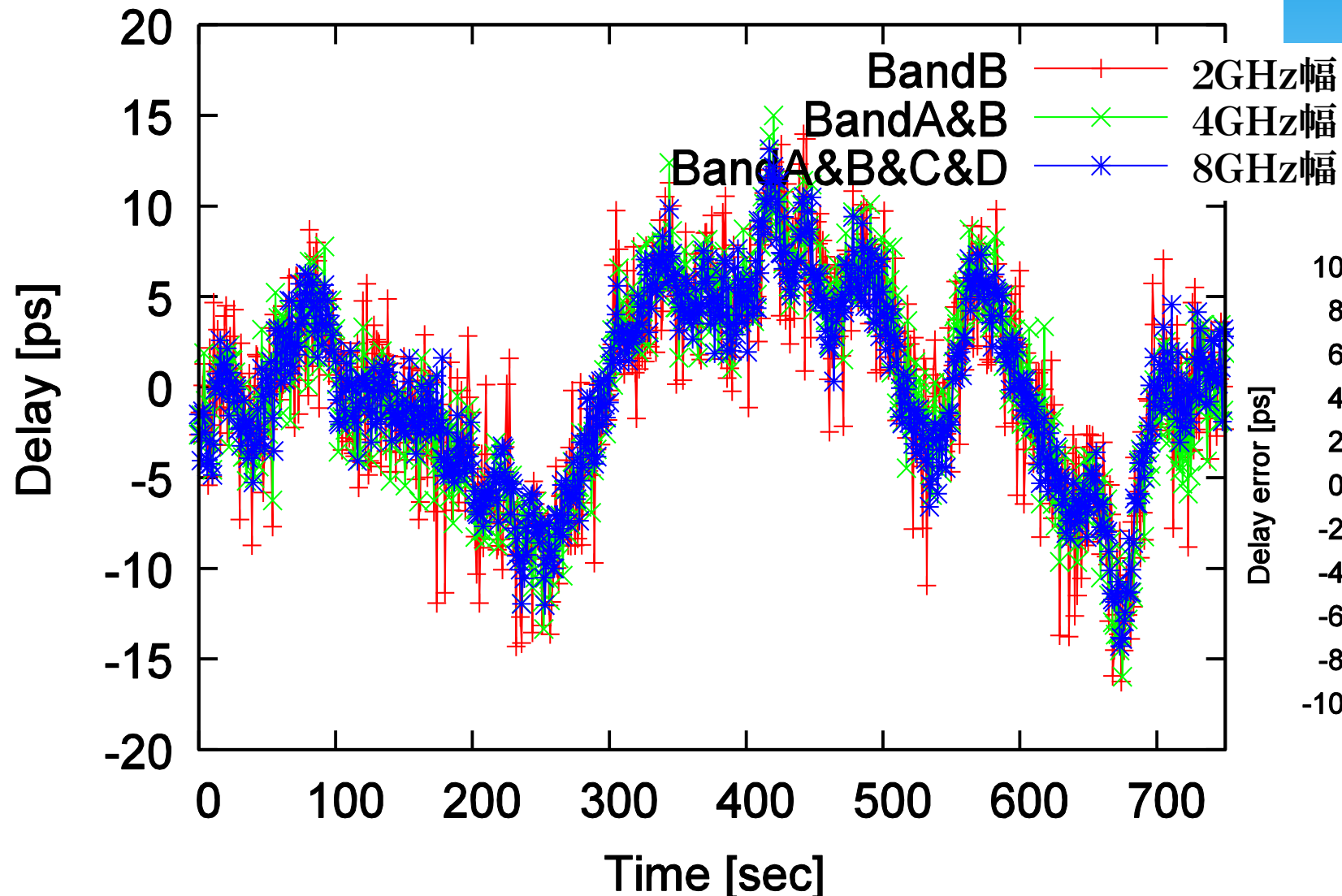
Delay Resolution Function



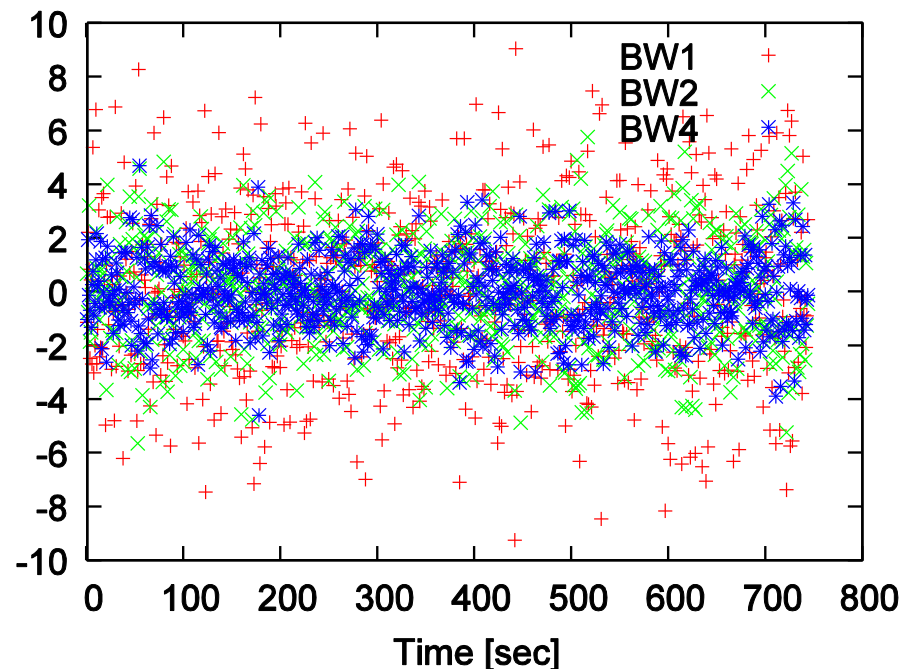
世界初 8GHz
バンド幅合成

Theoretical delay precision is 27 femto sec.

広帯域遅延計測(1秒)で得られた遅延(鹿島一石岡)



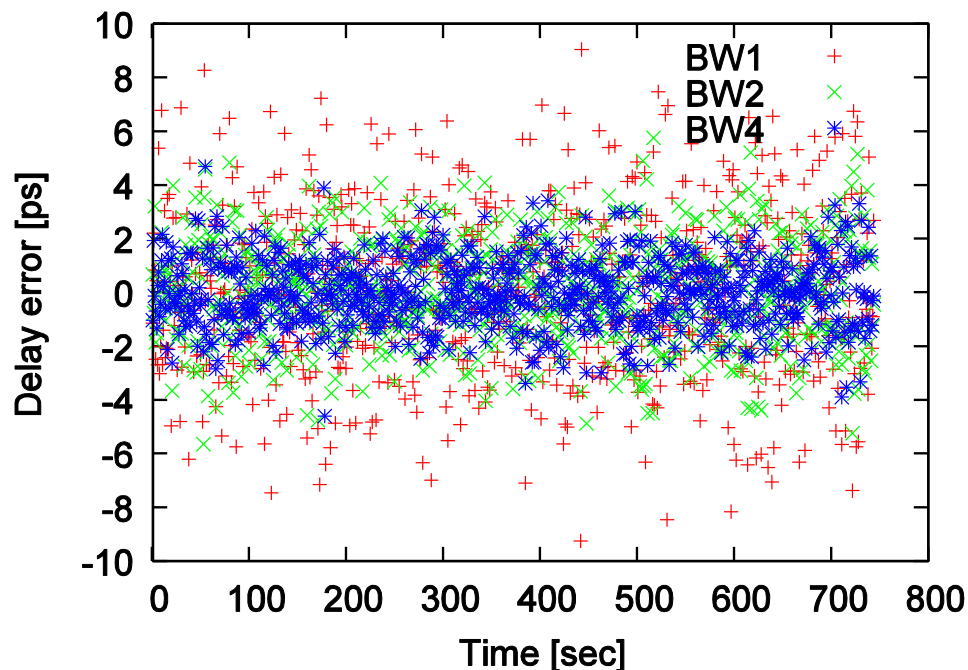
$$\Delta\tau = \tau_{(t+1)} - \tau_{(t)}$$



RMS of the noise in 1sec

$$\tau = s + n_t$$

$$\sigma_y^2 = \langle (\tau_{(t+1)} - \tau_{(t)})^2 \rangle$$
$$\approx \langle (n_{(t+1)} - n_{(t)})^2 \rangle \approx 2\sigma_n^2$$



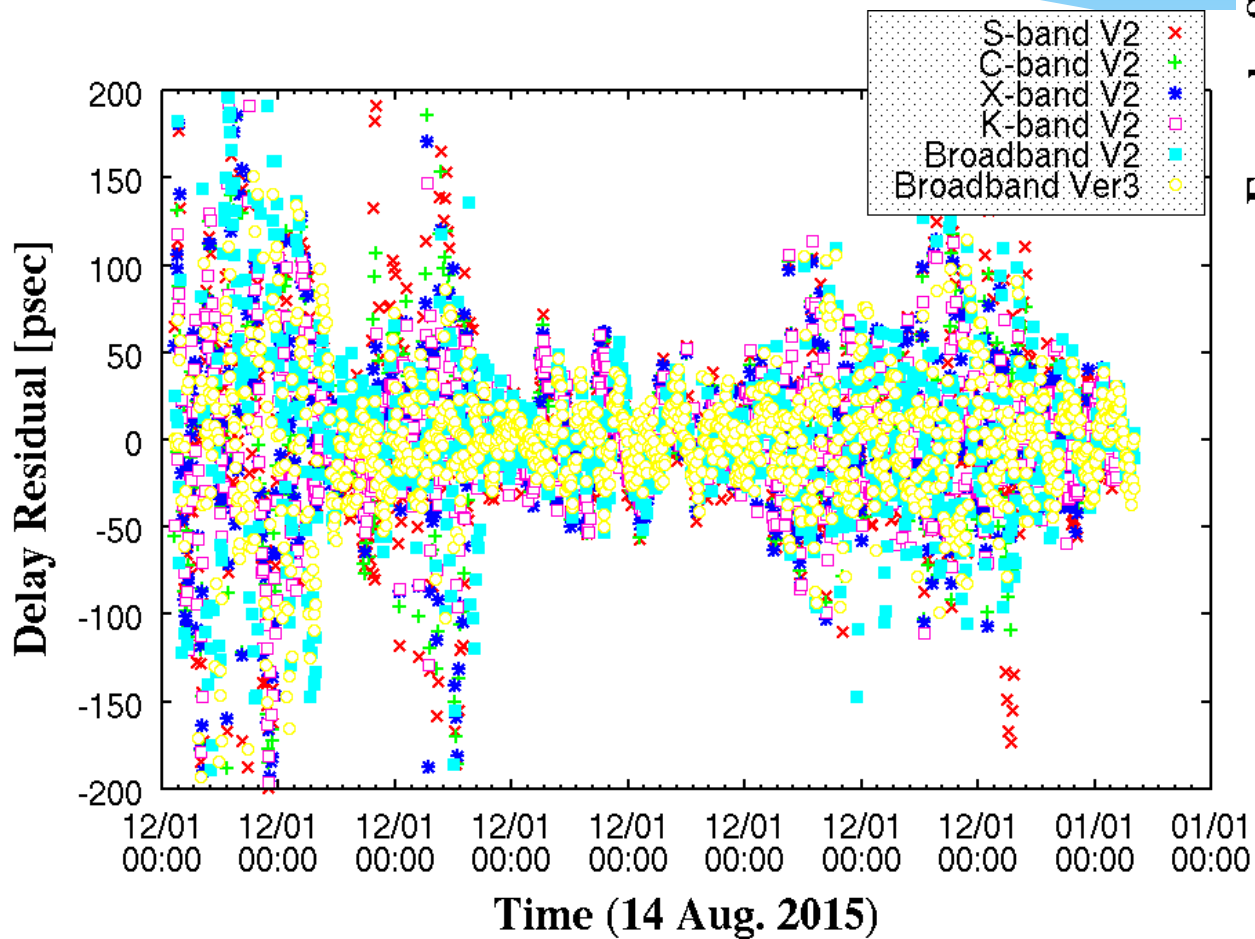
Band width	RMS/sec [ps]	Remark
1GHz	3.08	Band #2
2GHz	2.01	Band #1 and #2
4GHz	1.29	Band #1 to #4
4GHz	0.96	After intra-band correction
8GHz	0.60	All 6 Bands

If we operate 7.5sec integration like VGOS,
RMS will be 200 femto second !

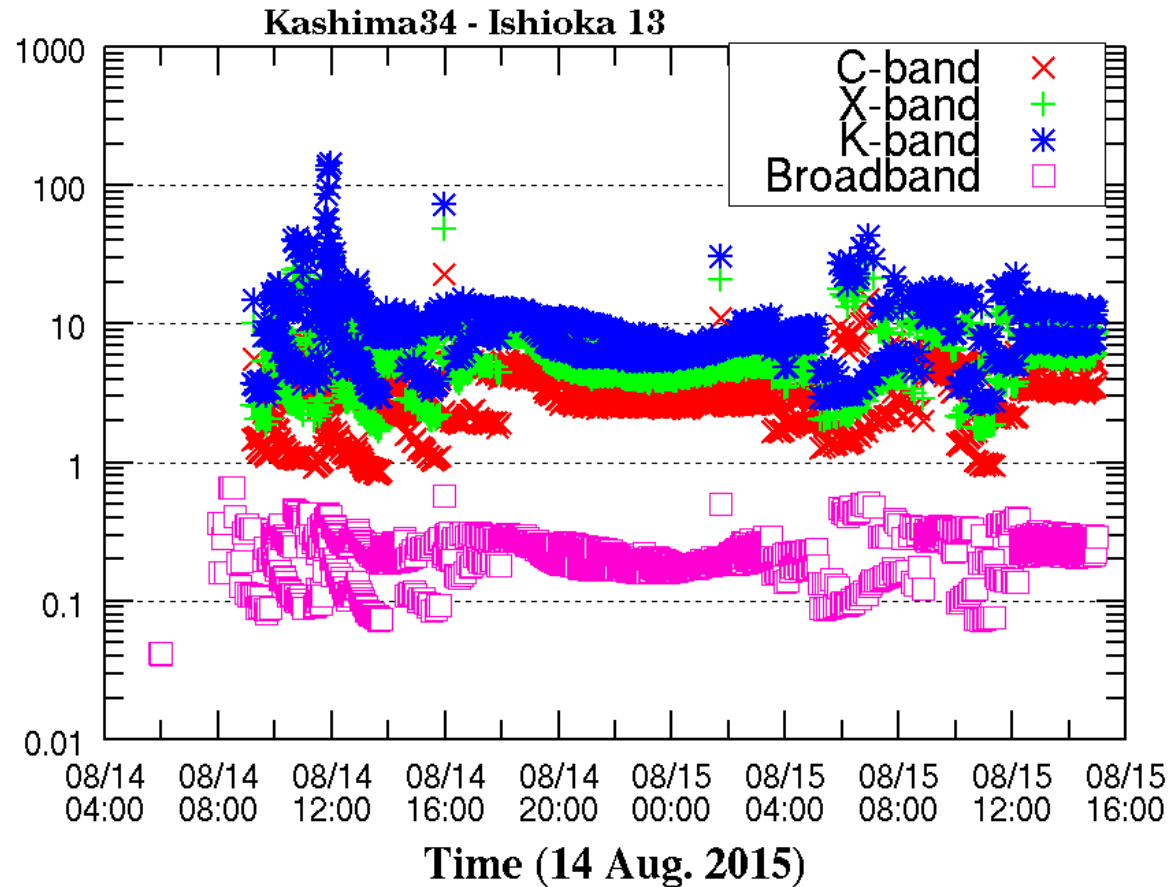
広帯域VLBI実験

実験日	参加局	観測周波数 各1GHz幅
2015/1/30	鹿島34、石岡13	6GHz、7GHz、8GHz、9GHz、10GHz、13GHz
2015/3/12-13	鹿島34、MBL1、MBL2	8GHz
2015/3/20-21	鹿島34、MBL1、MBL2	6GHz
2015/3/30-31	鹿島34、MBL1、MBL2	6GHz
2015/4/4-5	鹿島34、MBL1、MBL2	6GHz、8GHz
2015/6/16-17	鹿島34、MBL1、MBL2	6GHz、8GHz
2015/7/9-10	鹿島34、MBL1、MBL2	6GHz、7GHz、10GHz、12GHz
2015/8/7-8	鹿島34、石岡13	3.2GHz、4.6GHz、8.8GHz、11.6GHz
2015/8/14-15	鹿島34、石岡13	3.2GHz、4.6GHz、8.8GHz、11.6GHz

遅延計測誤差と 解析遅延残差



Error by SNR [psec]



鹿島34-石岡 13m
8月14-15日

まとめ

- 広帯域(3.2–13GHz)フィードを34mアンテナに搭載して観測が可能になった。
- 広帯域VLBI観測により**1秒観測でサブピコ秒(～0.6mm)**の遅延計測精度の測定が可能となった。
- ダイレクトサンプリング法式により、広帯域の位相校正(PCAL)信号なしに合成できるようになった。
- 課題
 - 測地・クロックパラメータ推定は、大気の遅延誤差等により制限されている。
⇒ 今後、速い天体切り替えによる大気推定の精度改善を確認する。
 - 小型アンテナの感度改善
 - 国際基線観測⇒電離層、偏波、電波源構造の影響などを検討する。



謝辞

- 国土地理院の皆様には、石岡局の協同観測等で多大な協力を頂いています。
- 広帯域フィードの開発には、国立天文台の2013-14年度共同開発研究資金(研究代表者:山口大学藤沢健太教授)の協力を受けています。
- 米国と大容量データ交換には、JGN-X、APAN, Internet2の高速ネットワークにサポートいただいています。



Thank you for Attention!