

VLBI 周波数比較への応用と GALA-V システムの開発(VI)

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

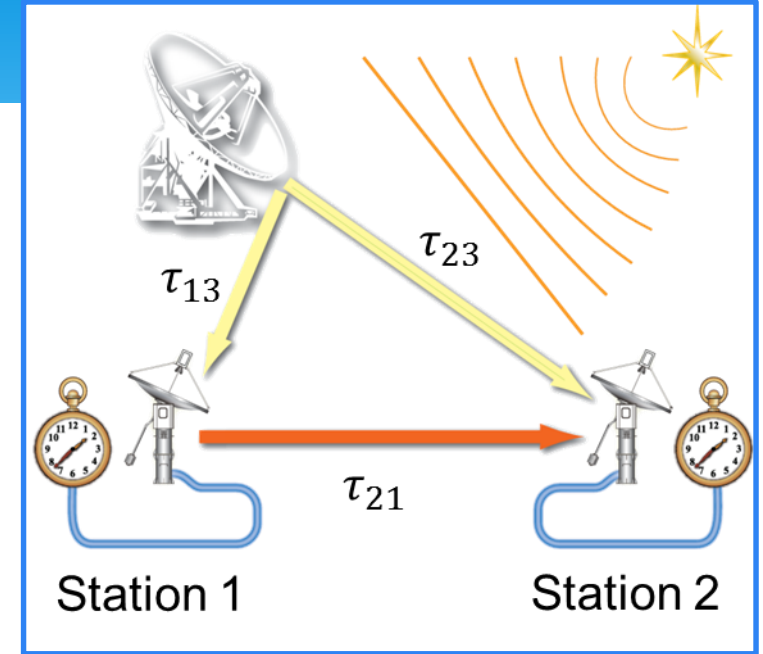
福崎順洋: 国土地理院

主な結論

- カセグレン大型アンテナ用の、広帯域(3.2–13GHz)フィードを独自設計で開発して、34mアンテナに搭載し、GSI石岡13mアンテナとの間でVLBI実験を実施した。
- 広帯域VLBI観測により1秒でサブピコ秒(～0.2mm)の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、広帯域の信号を位相校正(PCAL)信号なしに合成できるようになった。
- しかし、最終的な測地・パラメータ推定精度は、大気の遅延誤差により制限されそうである。

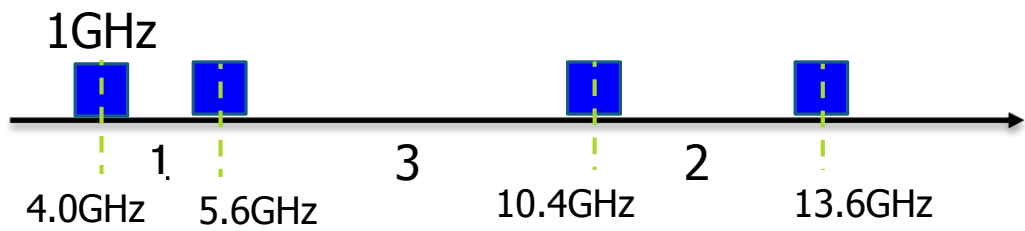
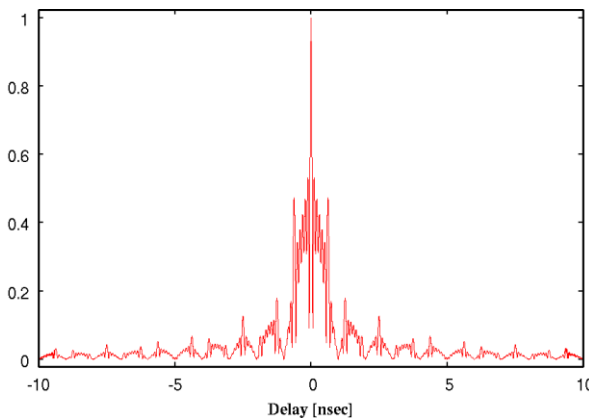
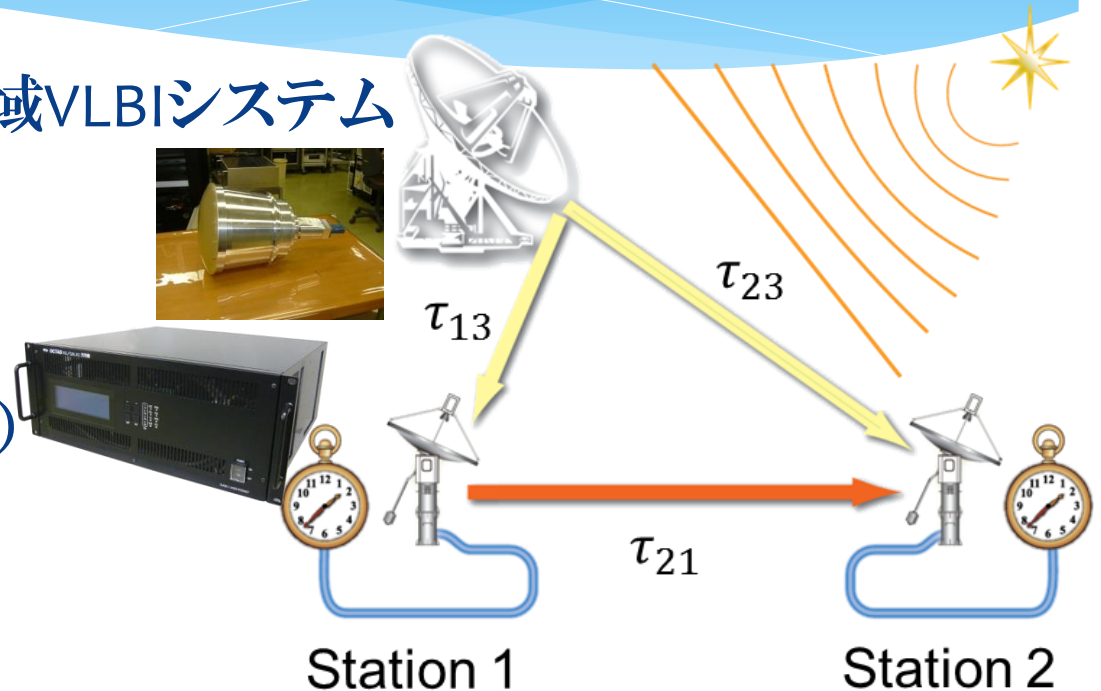
Introduction

- NICTでは遠隔地（大陸間距離）の原子時計間の周波数差精密測定を目的として、新しい広帯域VLBIシステムの開発を進めている。
 - * 主な開発項目: 小型広帯域VLBI局、広帯域フィードの独自開発、高速ダイレクトサンプラ
 - * これまでに、産総研の計量標準センターとNICT小金井間の周波数比較実験、GSI石岡局とのVLBI試験観測を行っている。
- 今回の報告: 広帯域システムを使った実験
 1. 2014・12－2015・1: 鹿島34m－石岡13m、6－14GHz(8GHzバンド幅)
 2. 2015年3-4月: 広帯域フィードを使ったGALGA-V (鹿島34m-小型アンテナ)実験
 3. 2015年8月: 新しい広帯域フィード(NINJA)を使った鹿島34m－石岡13m実験



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

NICTの広帯域観測系 (鹿島34m、MBL1, MBL2)

KASHIMA 34m



34m Antenna NICT Kashima

MARBLE2



**1.5m Antenna
NICT 小金井**

MARBLE1



**1.6m Antenna
産総研 つくば**

NICTの周波数比較VLBIシステムGALA-V の開発基線



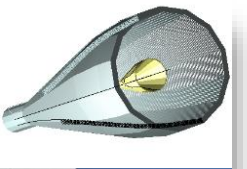
産総研(MBL1)



NICT(MBL2)



NICT(鹿島34m)



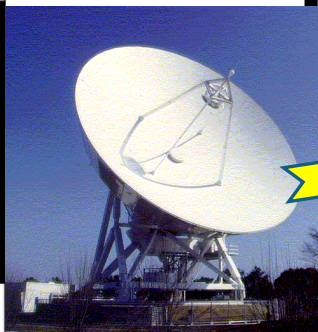
VGOS (VLBI Global Observing System)

* 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34m



Tsukuba 32m
(GSI)

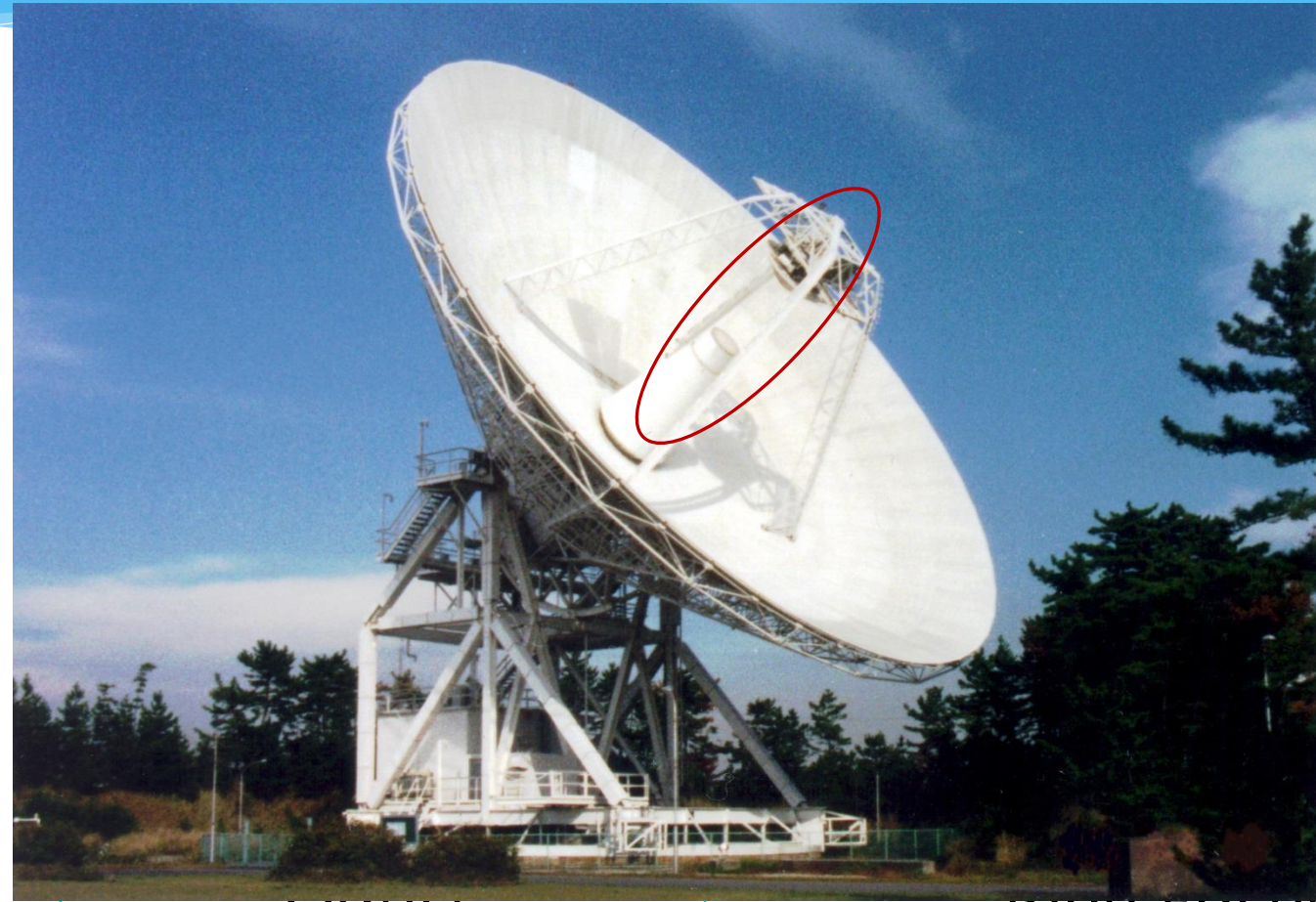


Ishioka 13m
(GSI)



Kashima 34m
(NICT)

Ishioka 13m Station – GSI



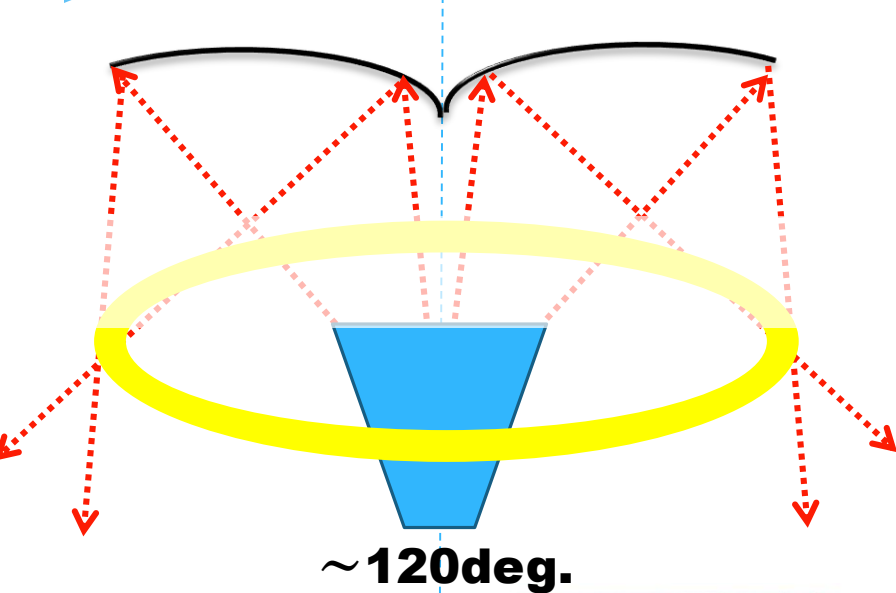
Optics

Ring Focus

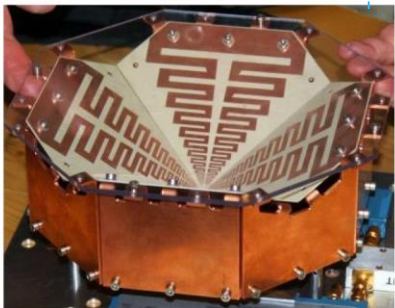
nt
South
.
deg./sec
(4GHz)
(X,Ka)
(Hz)

NICT 広帯域フィードの独自開発

リングフォーカス



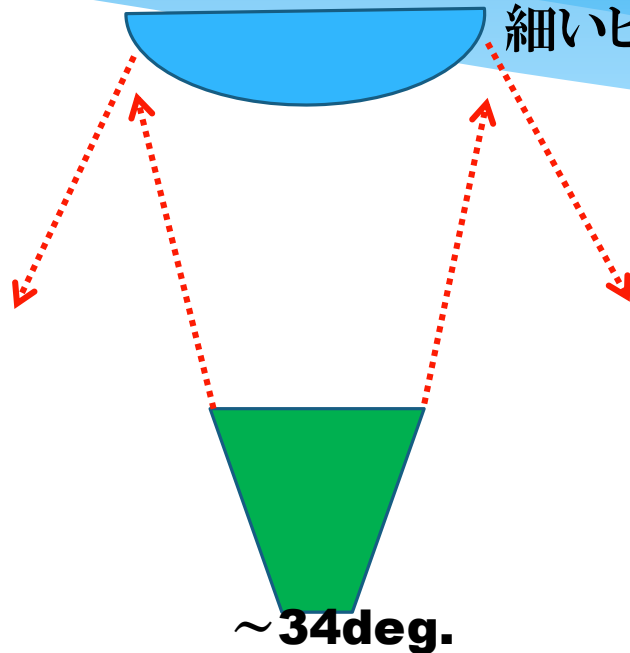
~120deg.



イレブンフィード

カセグレン

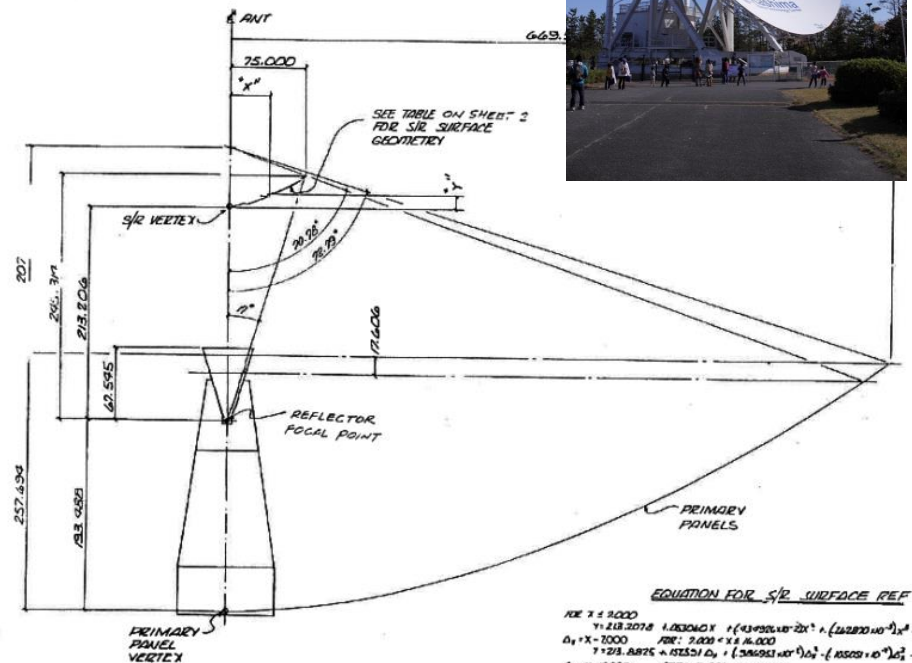
広帯域と
細いビーム幅の両立



~34deg.



QRFH (JPL)



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

EQUATION FOR S/R SURFACE REF

$$\begin{aligned}
 \text{FOR } X = 3000 & \quad Y = 218.2078 + 1.083040X + (-434950140 \times 10^{-20})X^2 + (1242870 \times 10^{-10})X^3 - 214.2060 \\
 \text{FOR } X = 2000 & \quad Y = 218.2078 + 1.083040X + (-434950140 \times 10^{-20})X^2 + (1242870 \times 10^{-10})X^3 - 211.2060 \\
 \text{FOR } X = 1500 & \quad Y = 218.2078 + 1.083040X + (-434950140 \times 10^{-20})X^2 + (1242870 \times 10^{-10})X^3 - 213.2060 \\
 \text{FOR } X = 1000 & \quad Y = 218.2078 + 1.083040X + (-434950140 \times 10^{-20})X^2 + (1242870 \times 10^{-10})X^3 - 215.2060 \\
 \text{FOR } X = 500 & \quad Y = 218.2078 + 1.083040X + (-434950140 \times 10^{-20})X^2 + (1242870 \times 10^{-10})X^3 - 217.2060 \\
 \text{FOR } X = 0 & \quad Y = 218.2078 + 1.083040X + (-434950140 \times 10^{-20})X^2 + (1242870 \times 10^{-10})X^3 - 219.2060
 \end{aligned}$$





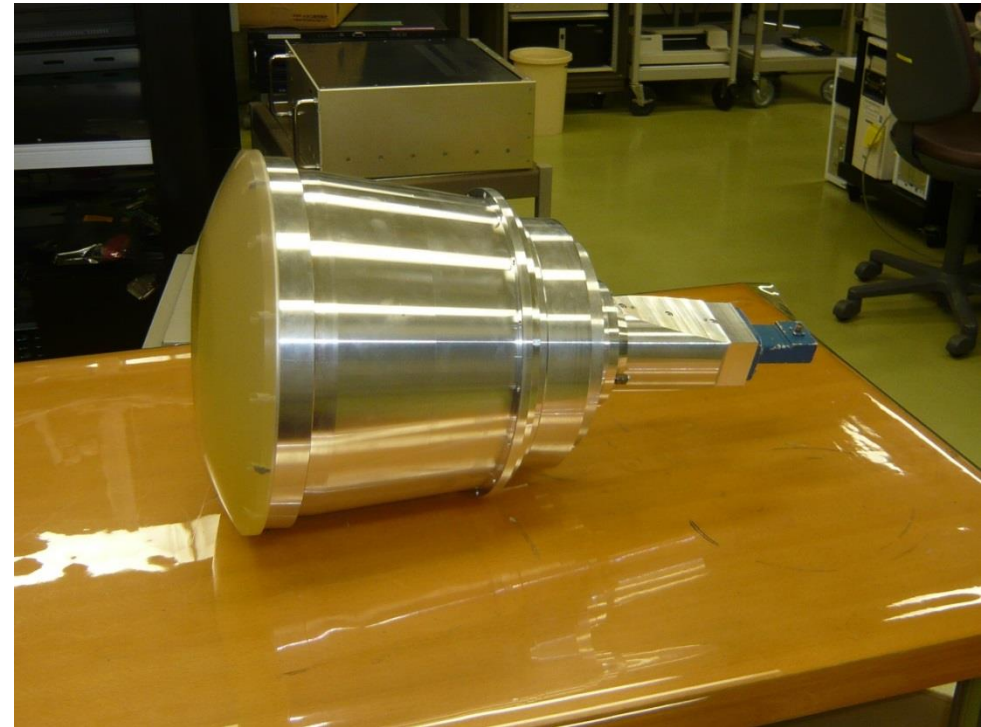
Broadband Feed for Cassegrain optics Kashima 34m antenna

2013年末に設置



IGUANA-H Feed (6.5-15GHz)

2015年春に完成



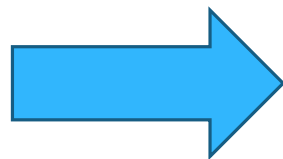
NINJA Feed (3.2-14.4GHz, nominal)



2015年7月 広帯域フィード(NINJA)を搭載



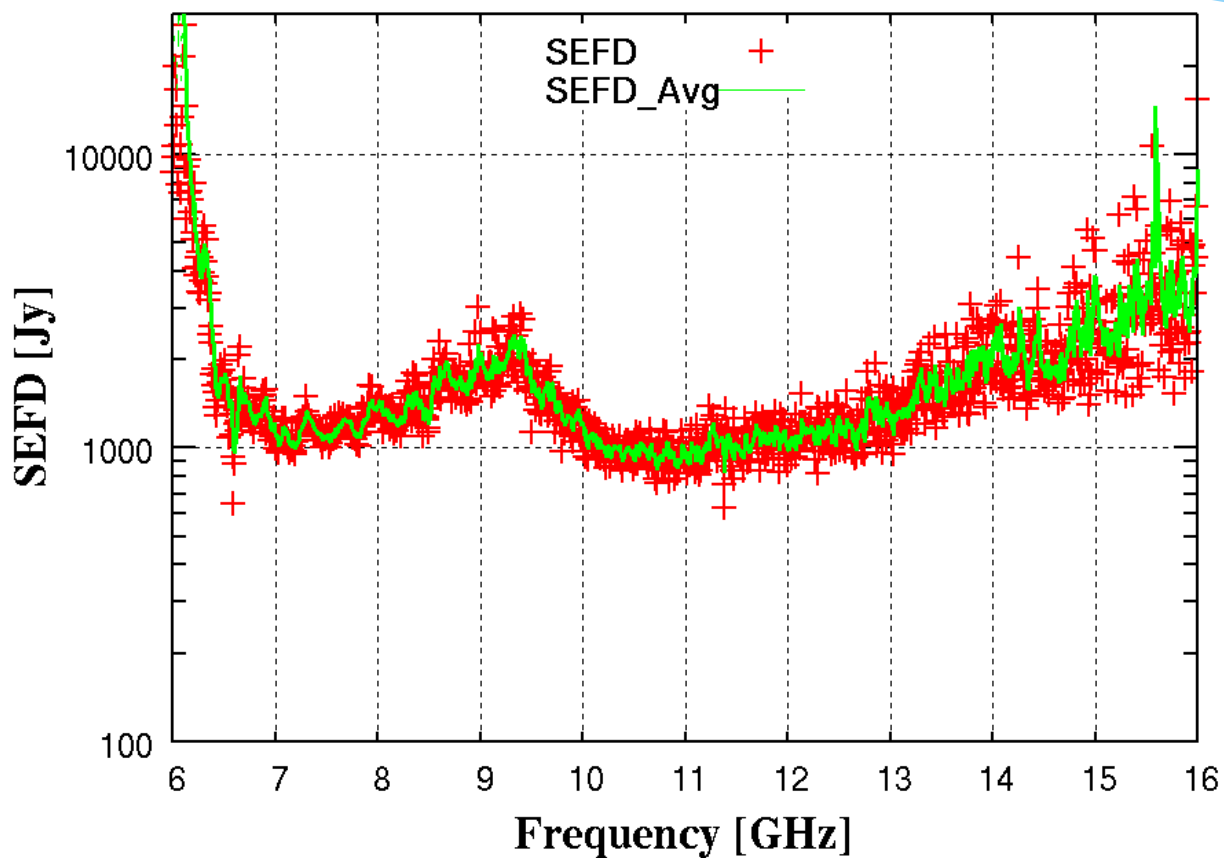
IGUANA-H Feed (6.5-15GHz)



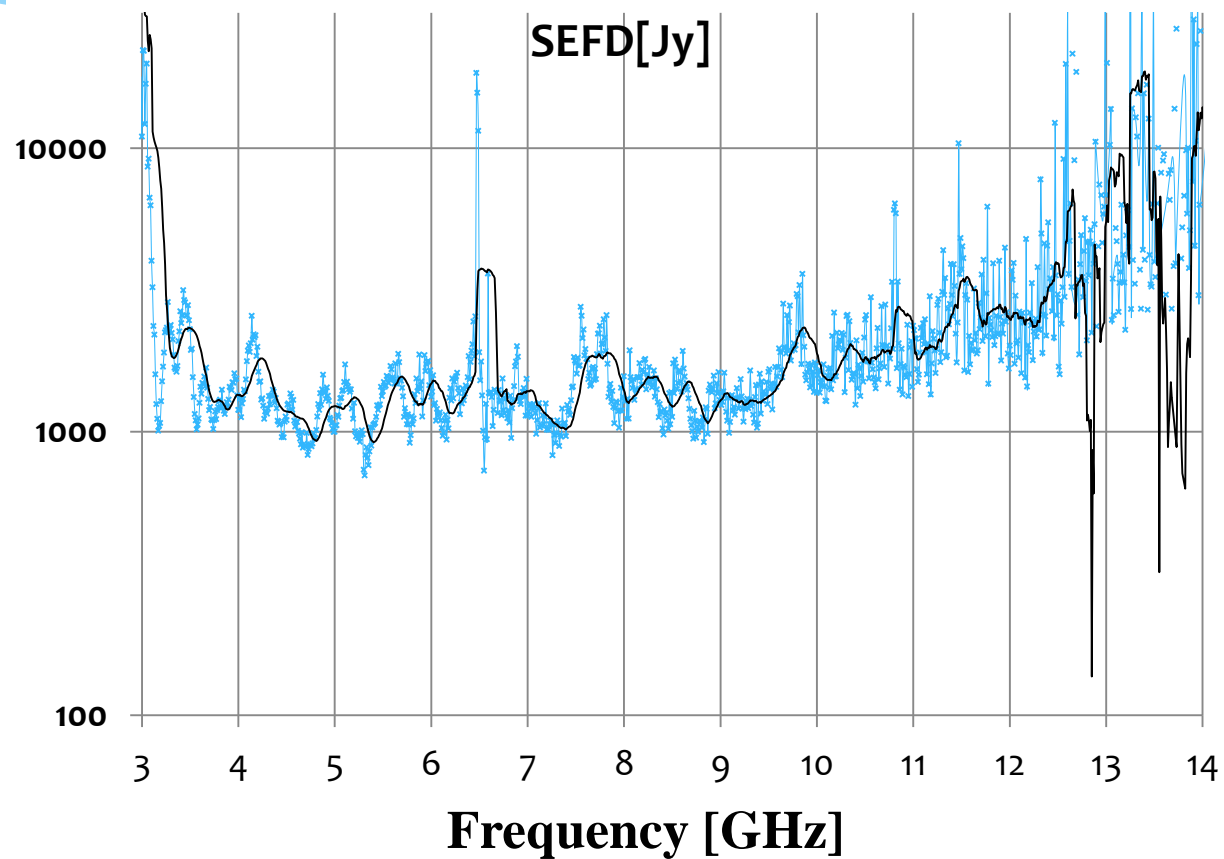
NINJA Feed (3.2-14.4GHz, nominal)



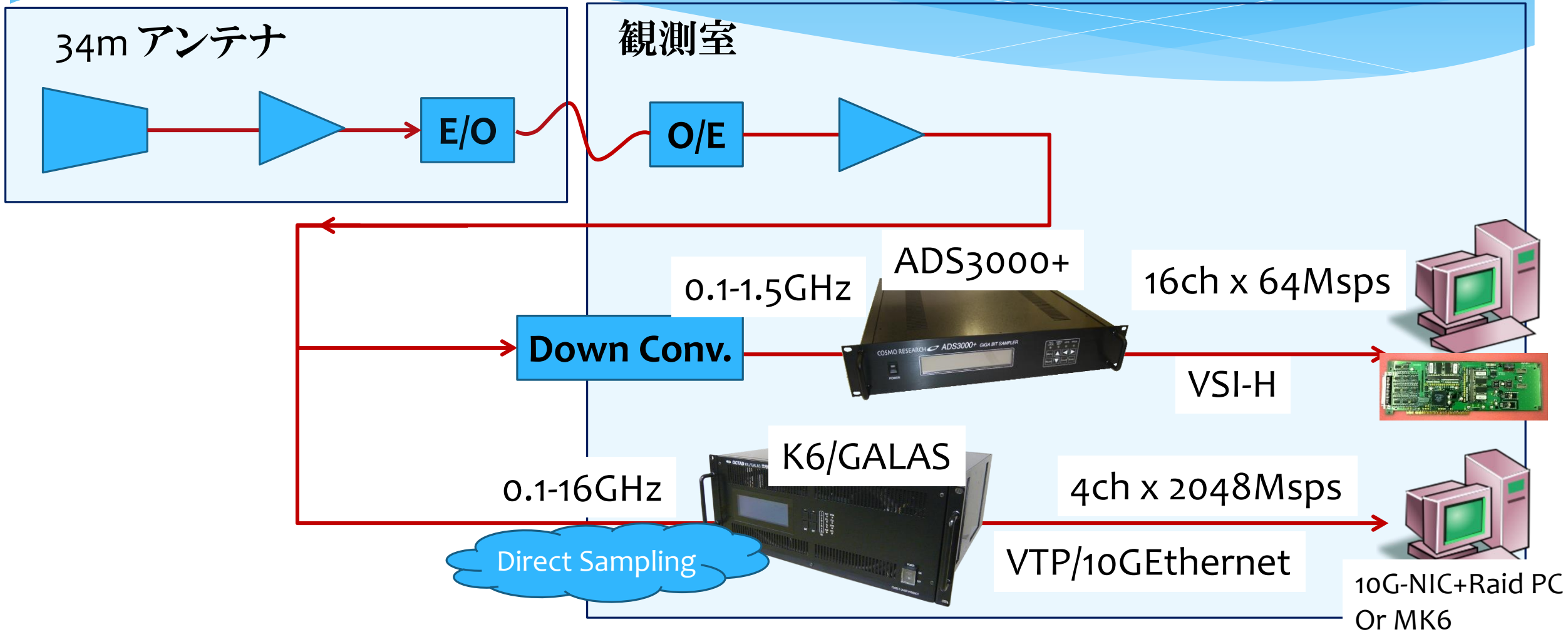
IGUANA-Hフィード



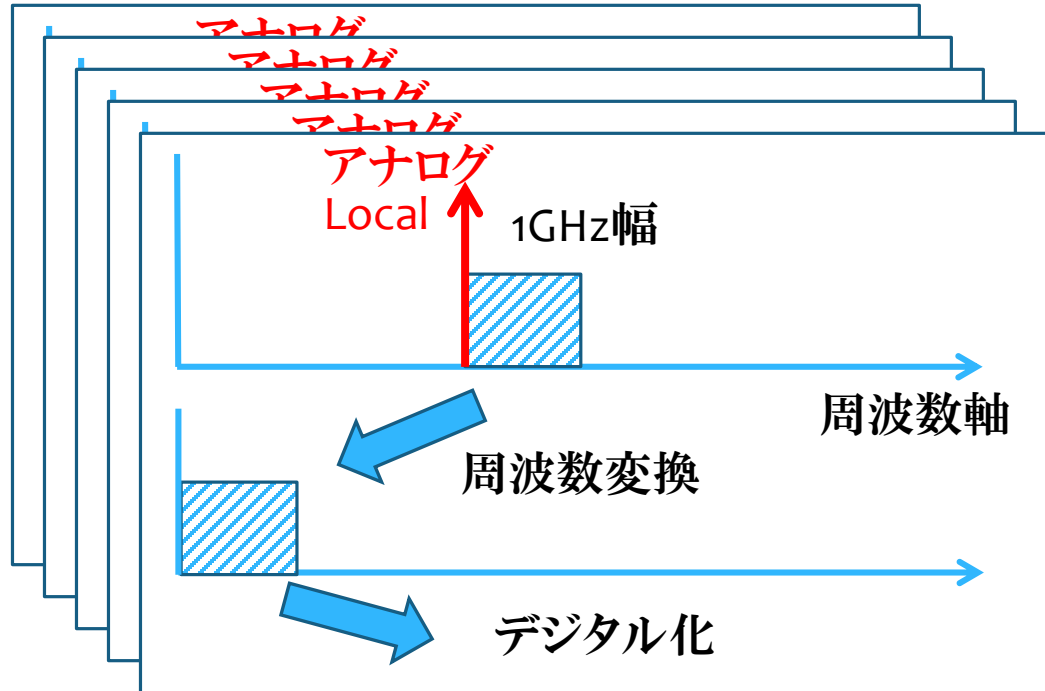
NINJA フィード



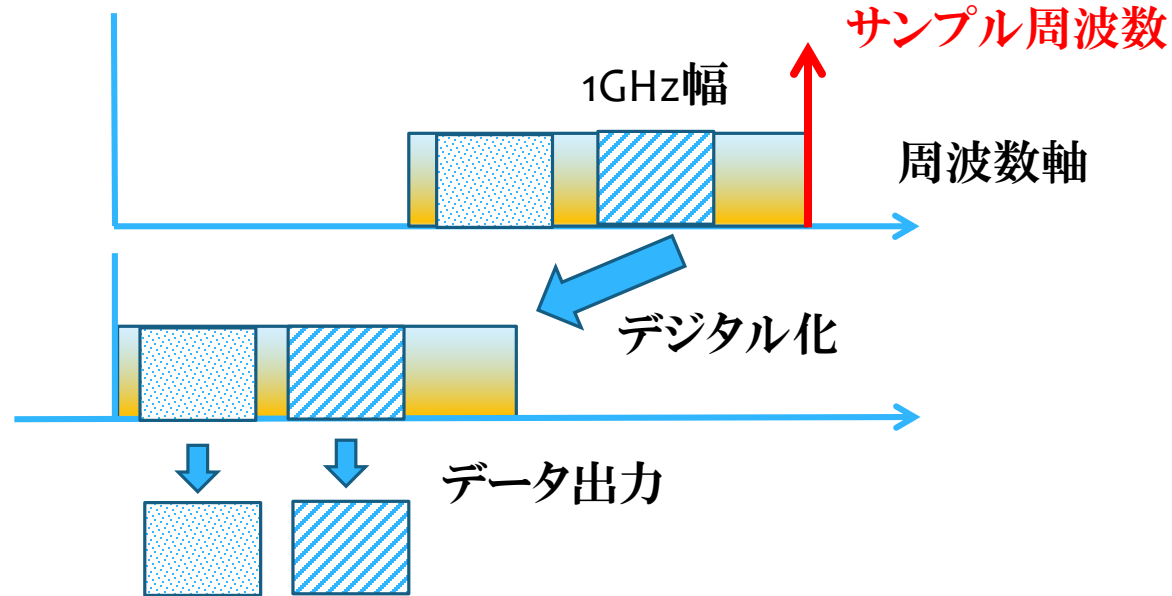
信号のパスと データ収集系



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

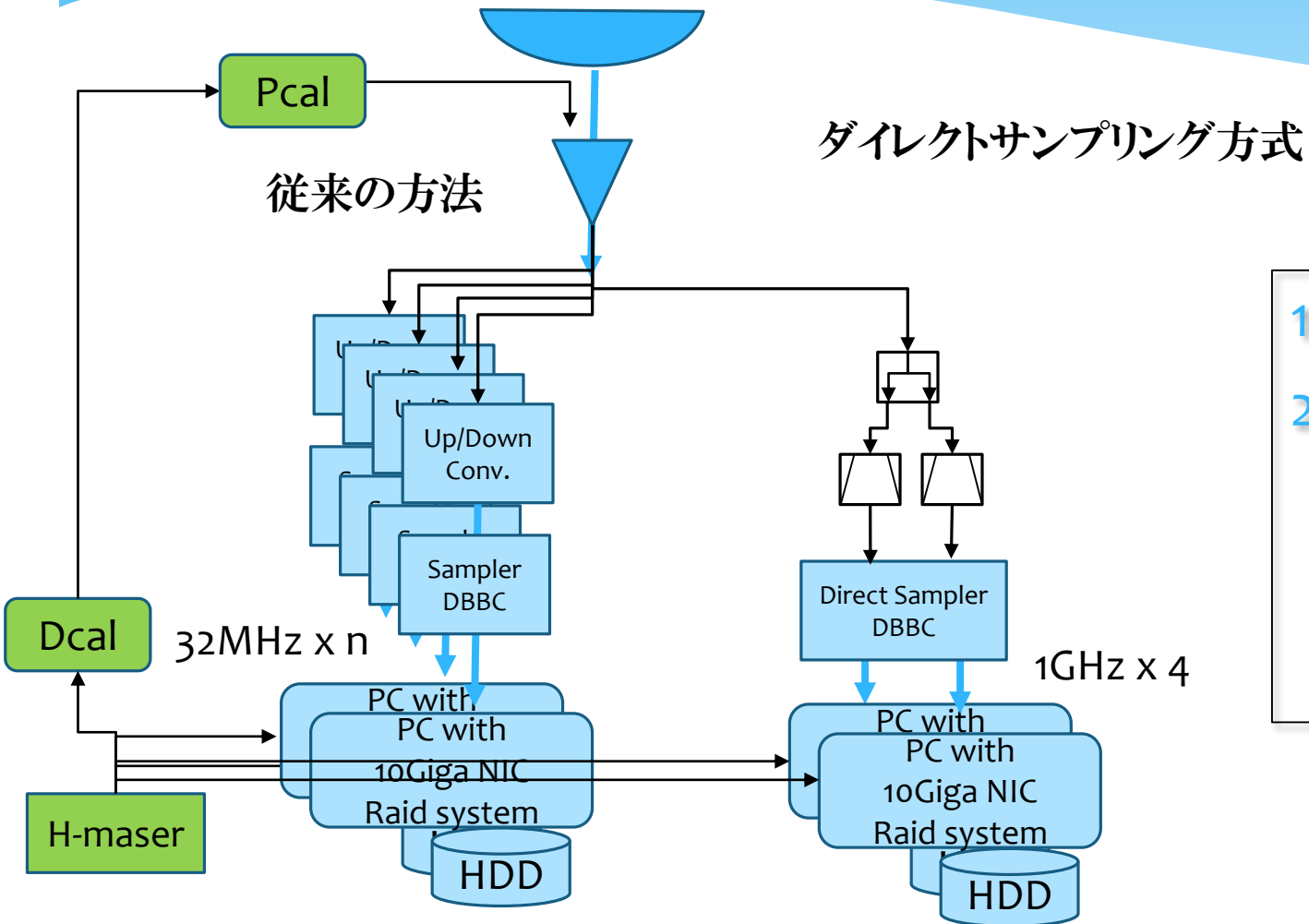


高速サンプラ
K6/GALAS



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

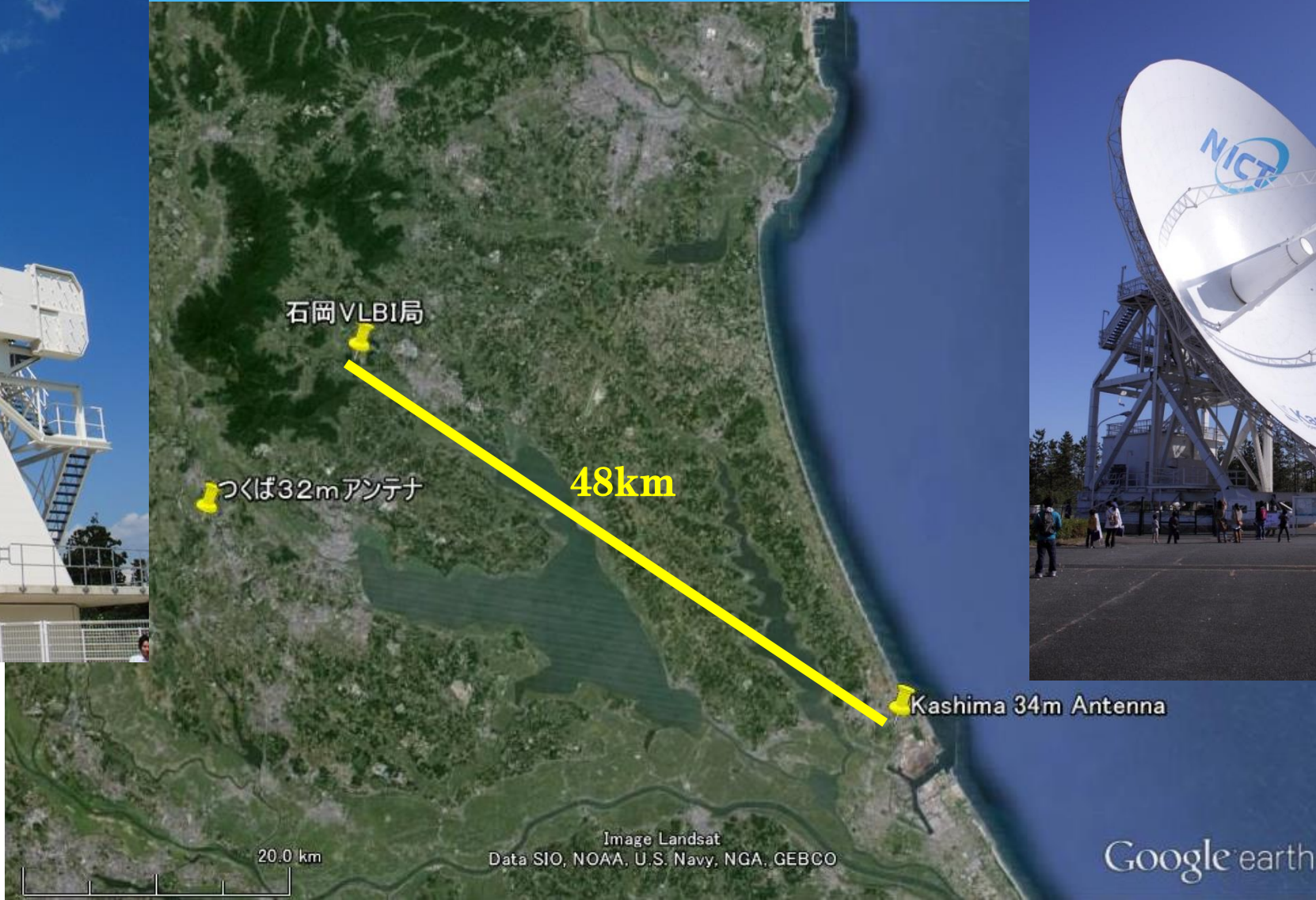
ダイレクトサンプリング法の利点



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?!

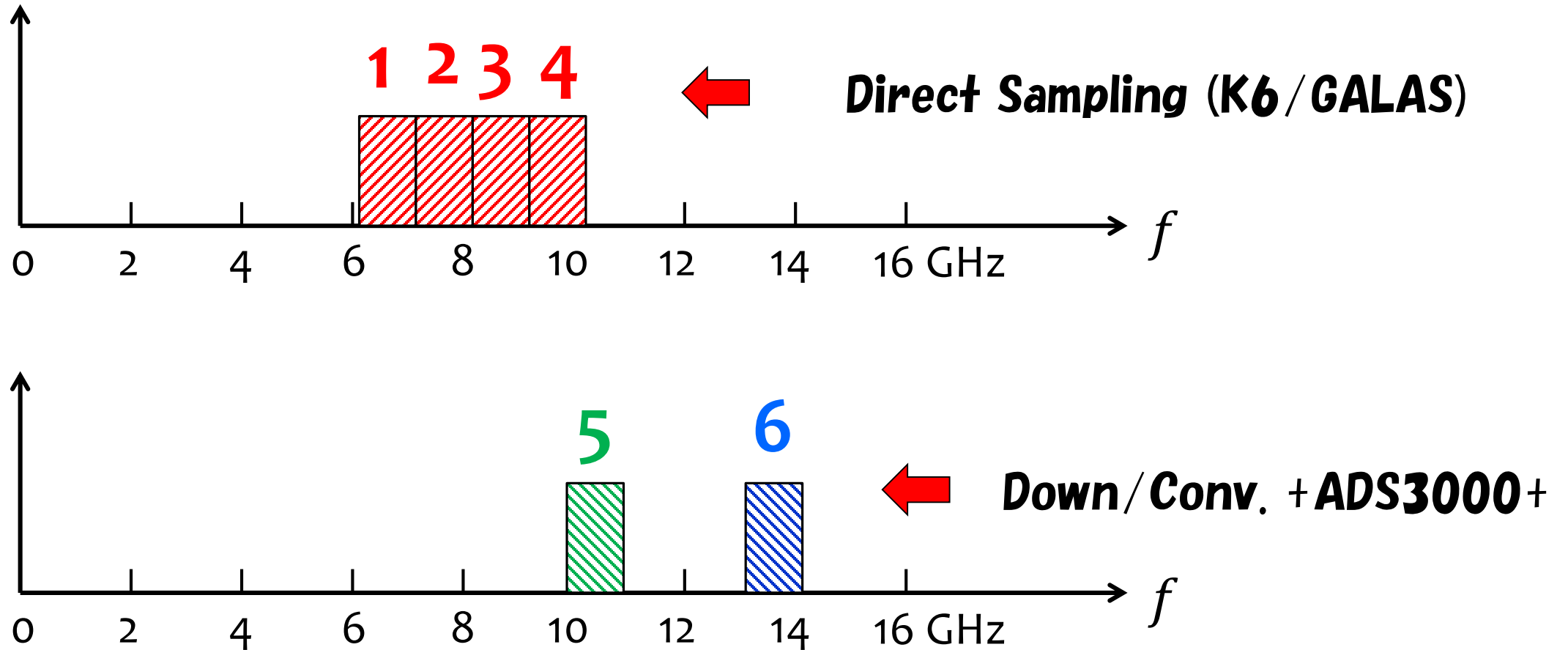
KASHIMA – ISHIOKA Broadband Exp. Jan. 2015

Supported by
Mr. Fukuzaki
and GSI people



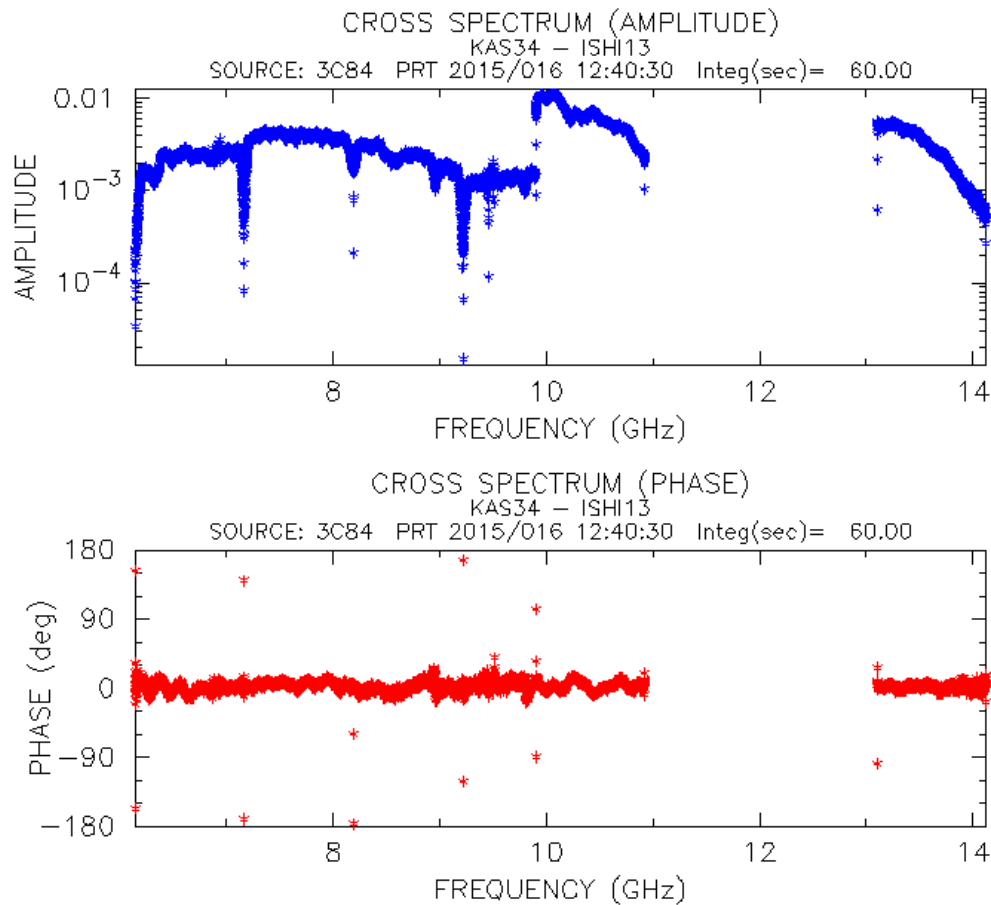
Observation Frequency allocation

BW 1024MHz each

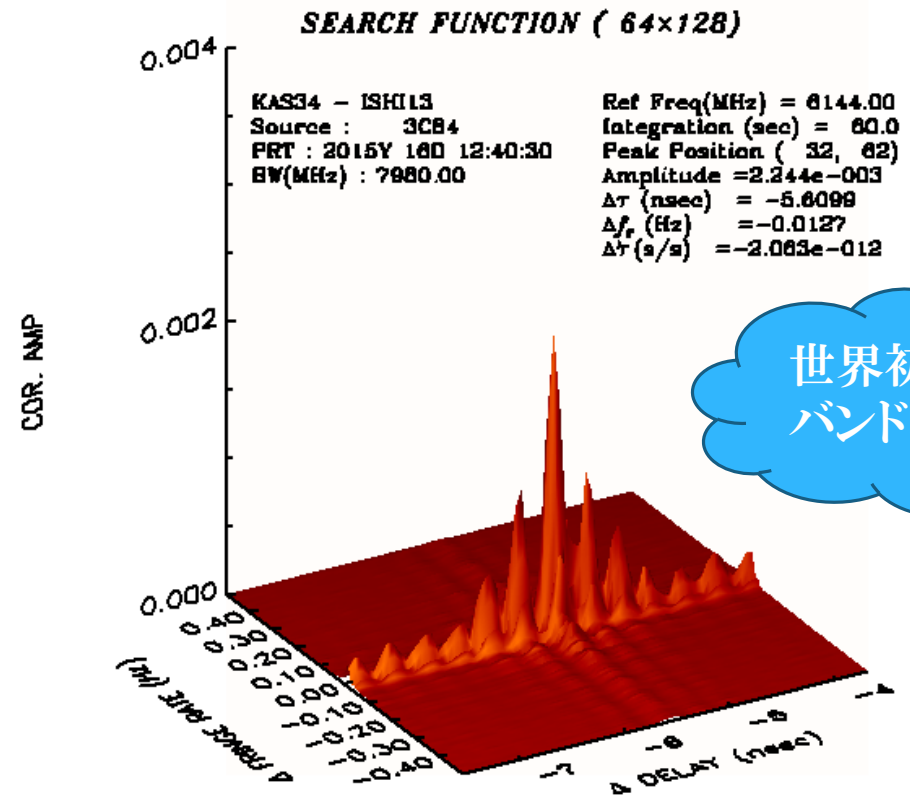


バンド幅合成 #1-#6 (6-14GHz) バンド内, バンド間遅延補正後

Cross Spectrum



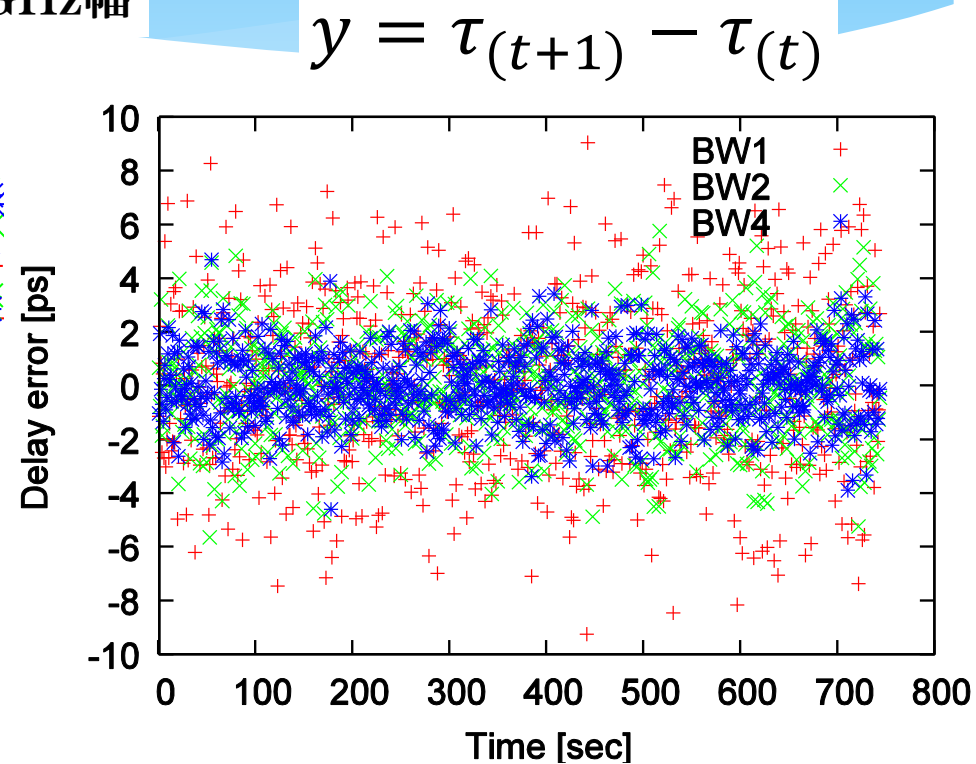
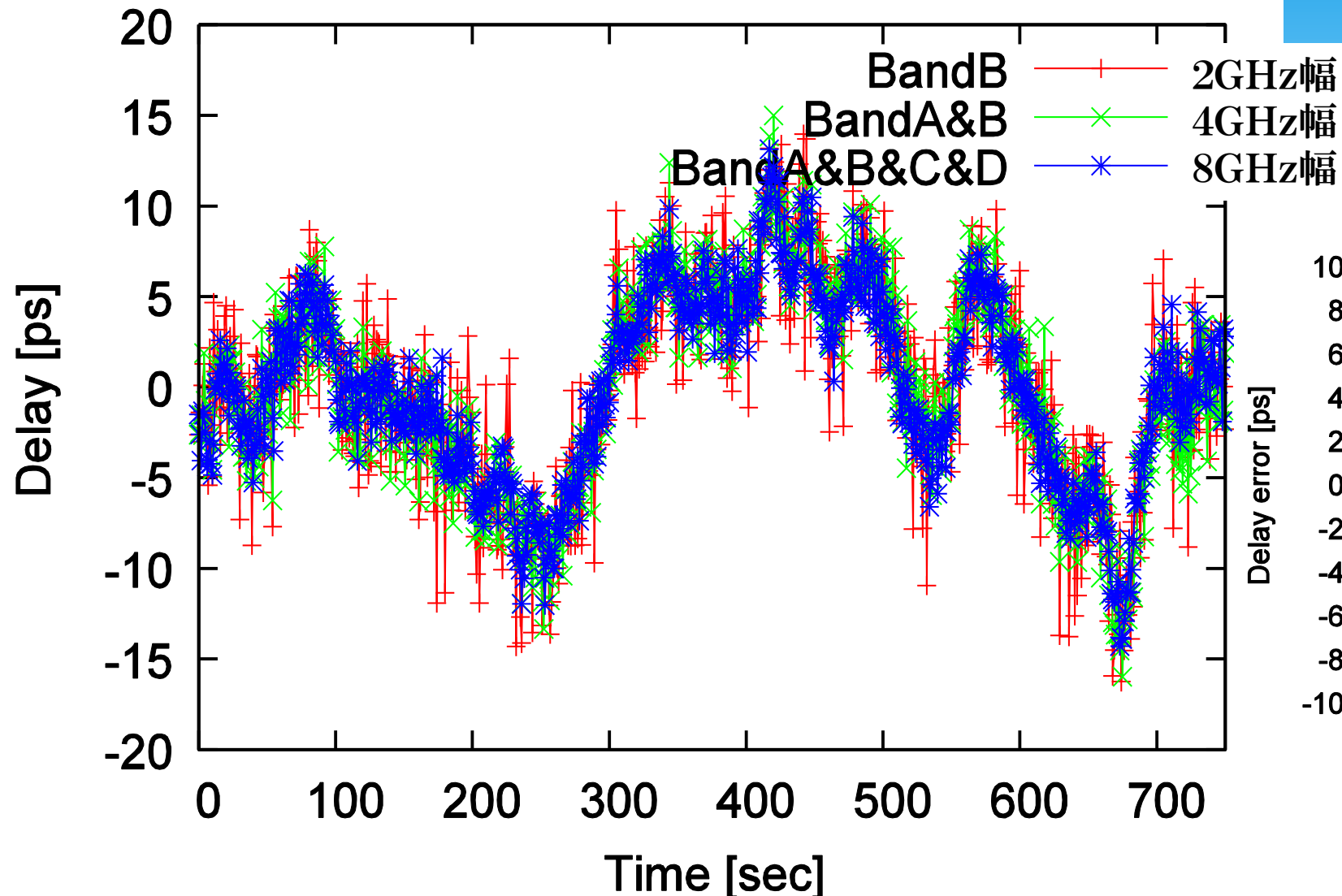
Delay Resolution Function



世界初 8GHz
バンド幅合成

Theoretical delay precision is 27 femto sec.

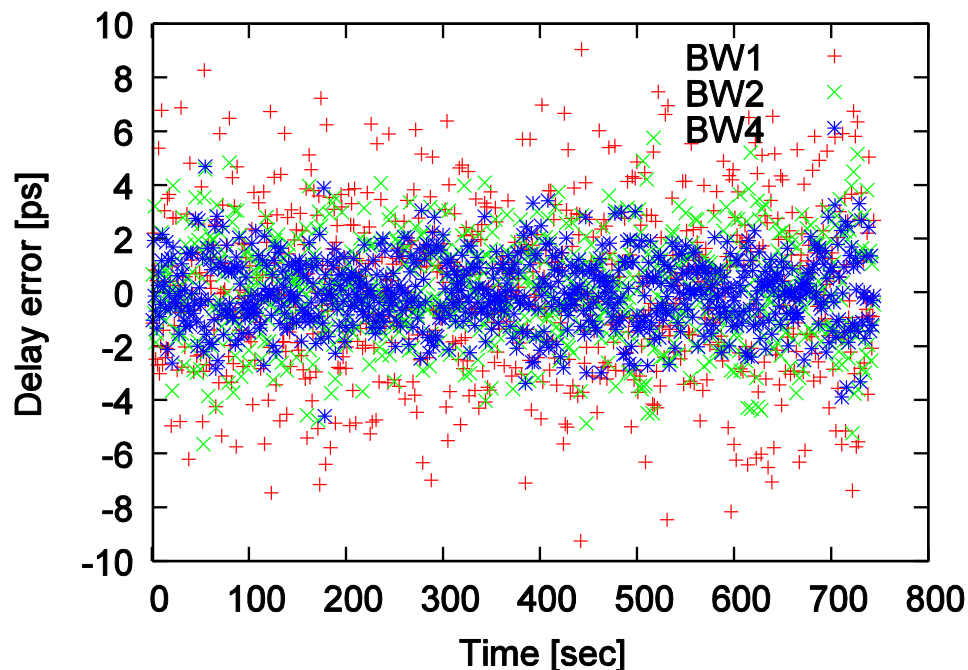
広帯域遅延計測(1秒)で得られた遅延(鹿島一石岡)



RMS of the noise in 1sec

$$\tau = s + n_t$$

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

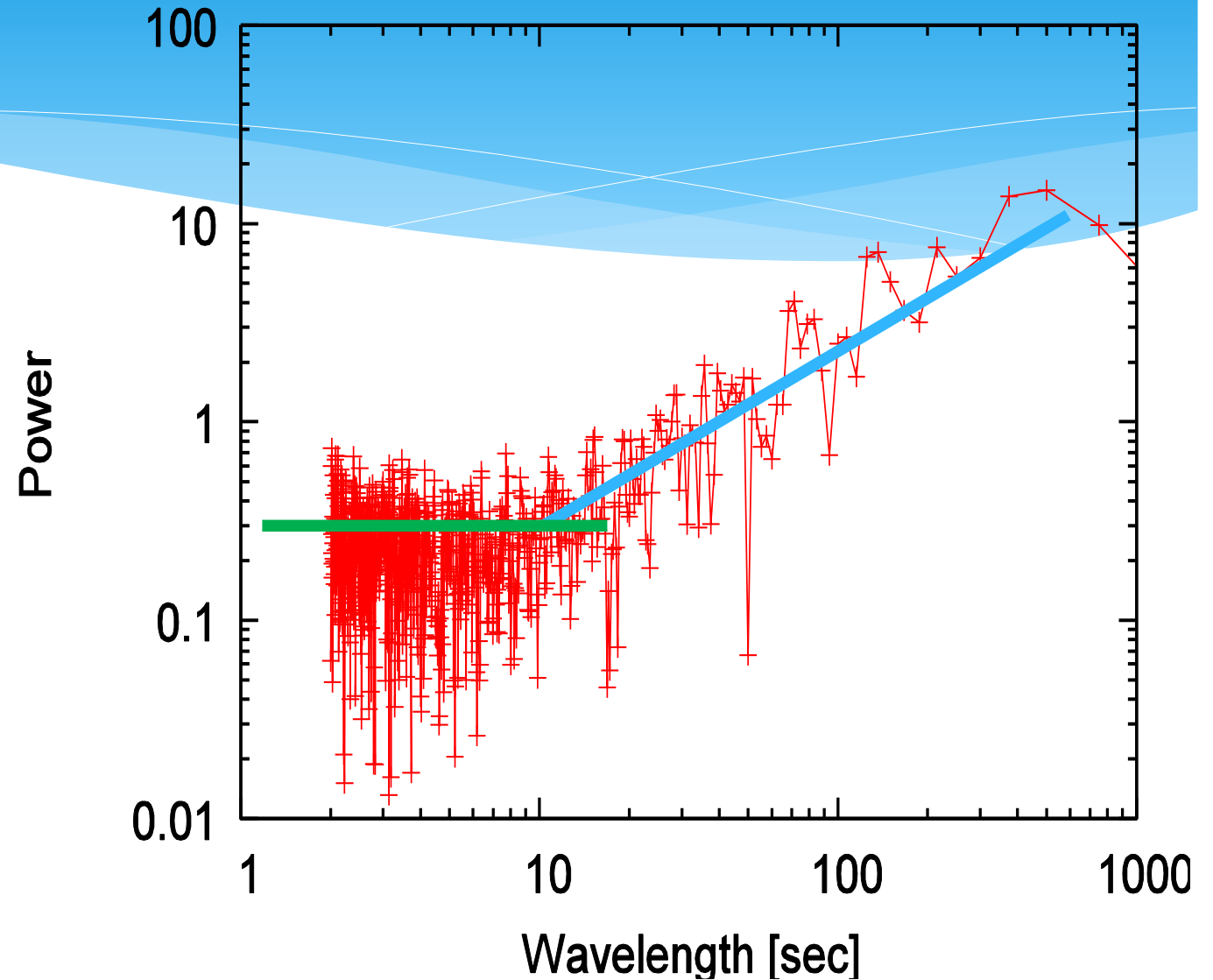
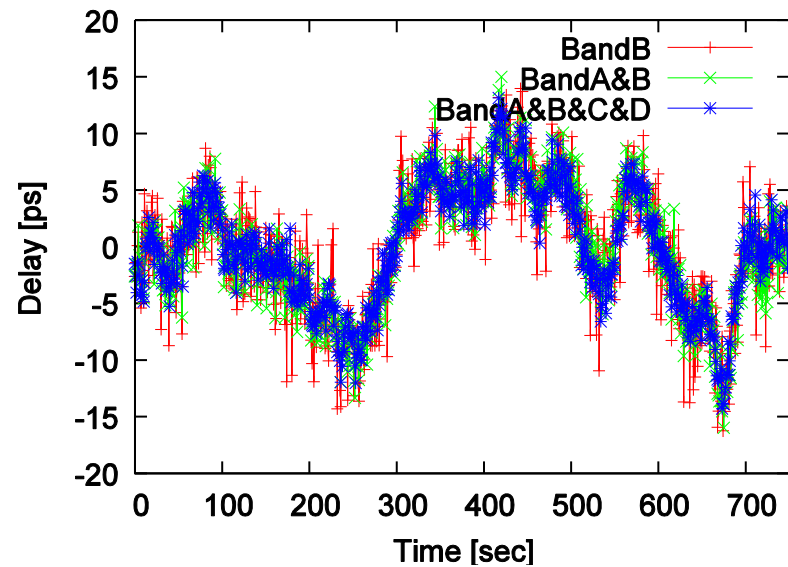


Band width	RMS/sec [ps]	Remark
1GHz	3.08	Band #2
2GHz	2.01	Band #1 and #2
4GHz	1.29	Band #1 to #4
4GHz	0.96	After intra-band correction
8GHz	0.60	All 6 Bands

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

Noise spectrum

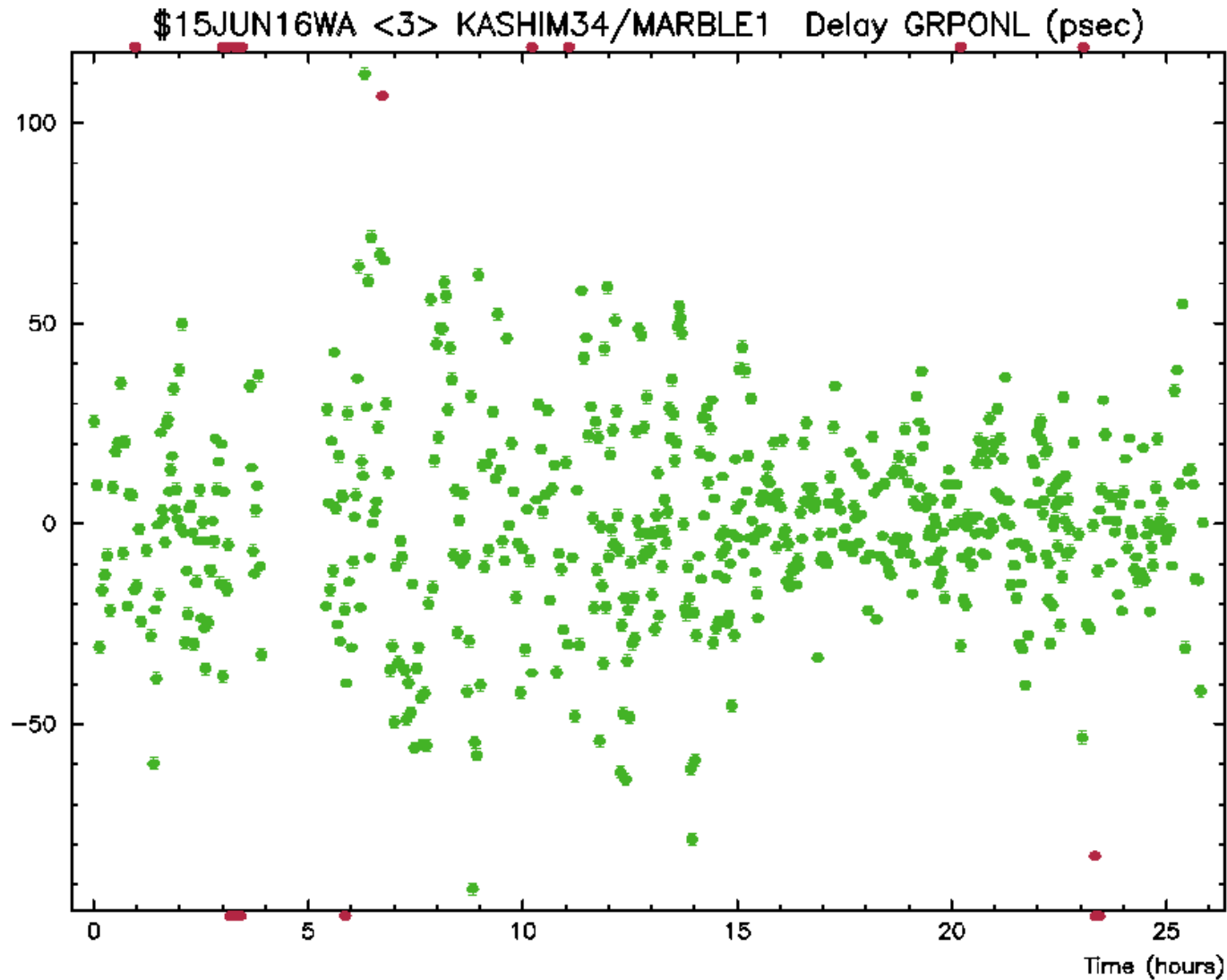
10秒程度までは白色性雑音



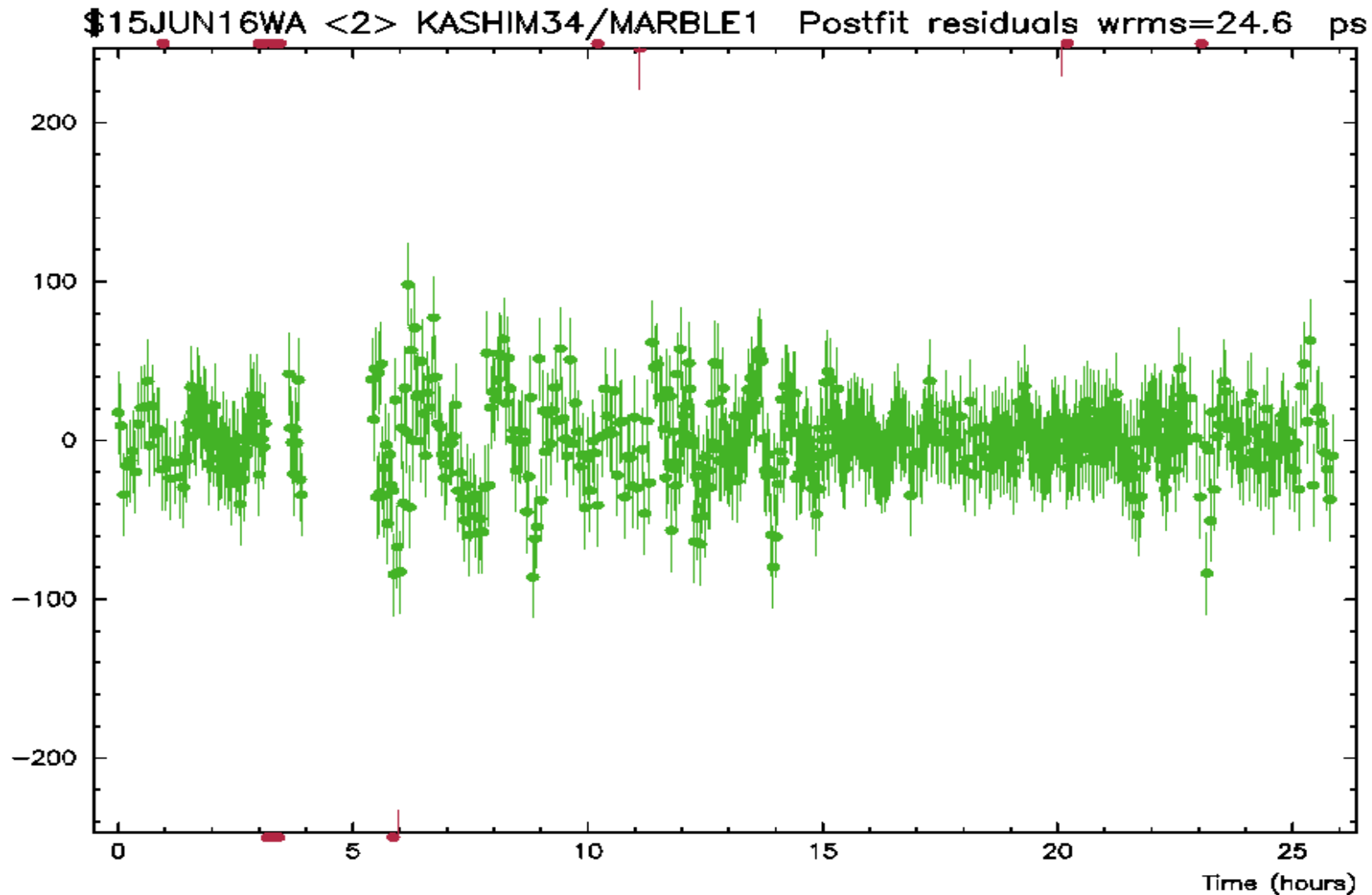
広帯域VLBI実験

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
2015/8/16-17	鹿島34、石岡13	3.2GHz、4.6GHz、8.8GHz、11.6GHz

Freq = 6.7GHz, 8.5GHz, Kas34 – MBL1

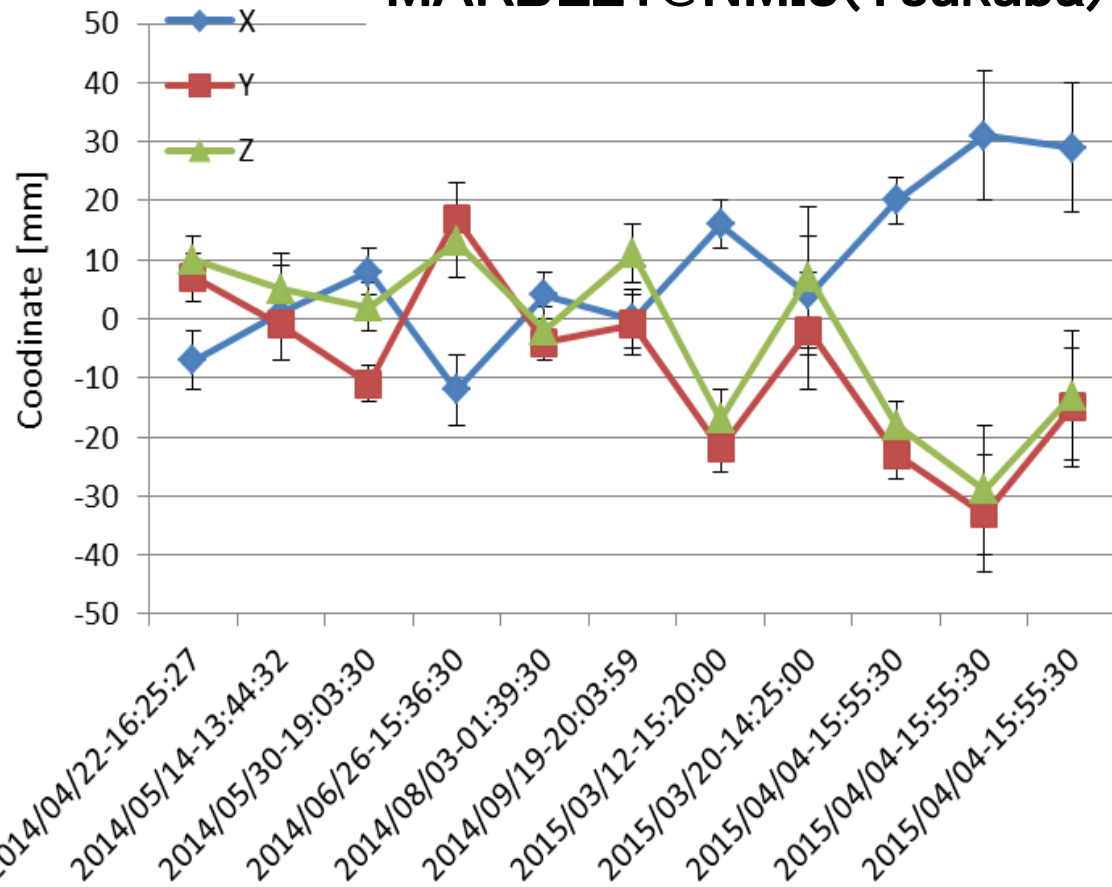


Freq = 6.7GHz, 8.5GHz, Kas34 – MBL1

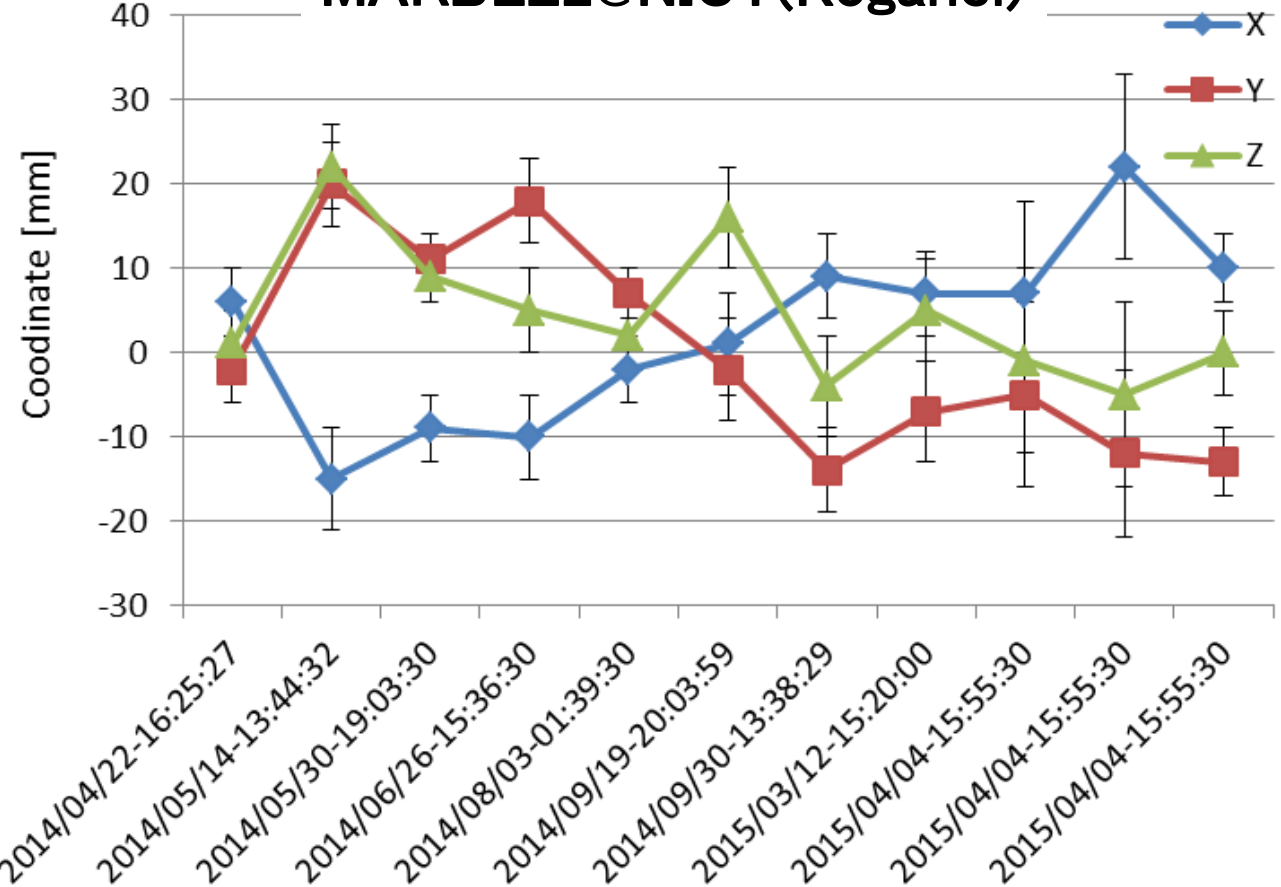


局位置の推定結果 (MARBLE1, MABLE2)

MARBLE1@NMIJ(Tsukuba)



MARBLE2@NICT(Koganei)



まとめ

- カセグレン大型アンテナ用の、広帯域(3.2–13GHz)フィードを独自設計し、3.4m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。
- しかし、測地・パラメータ推定は、大気の遅延誤差により制限される。
- 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ようになった。
- 課題
 - 今後、速い天体切り替えによる大気推定の精度改善を試みる。
 - 国際基線観測による電離層、偏波、電波源構造の影響などを検討する。

謝辞

- 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:山口大学藤沢健太)の提供を受けています。
- 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!



K5/ADS3000+ Sampler



IF Input Port	2
Input Freq. Range	0.01 - 1.5 GHz
Sampling mode	Broadband Sampling Nch/port=1 128 Msps : 8 bit 512 Msps : 2,4 bit 1024 Msps: 2 bit 2048 Msps: 1 bit
	DBBC Mode Nch/unit= 16 4,8,16,32,64 Msps/ch Qbit=1,2, or 4 bit
Output Port	VSI-H, 4port
Max Data rate	2048 Mbps/port

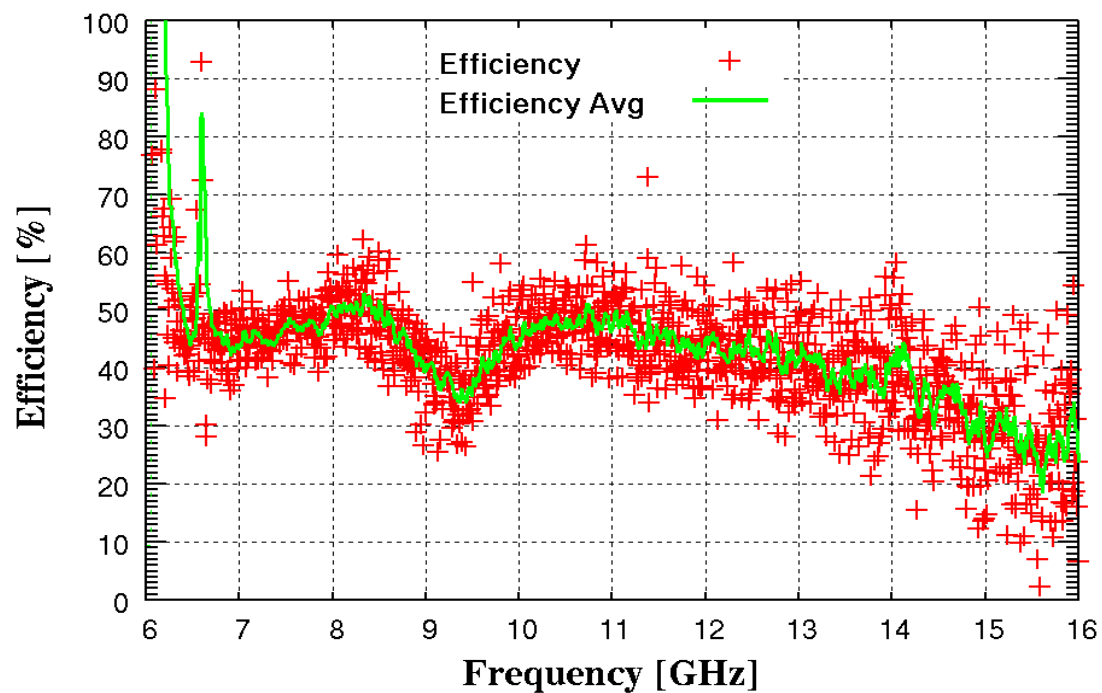
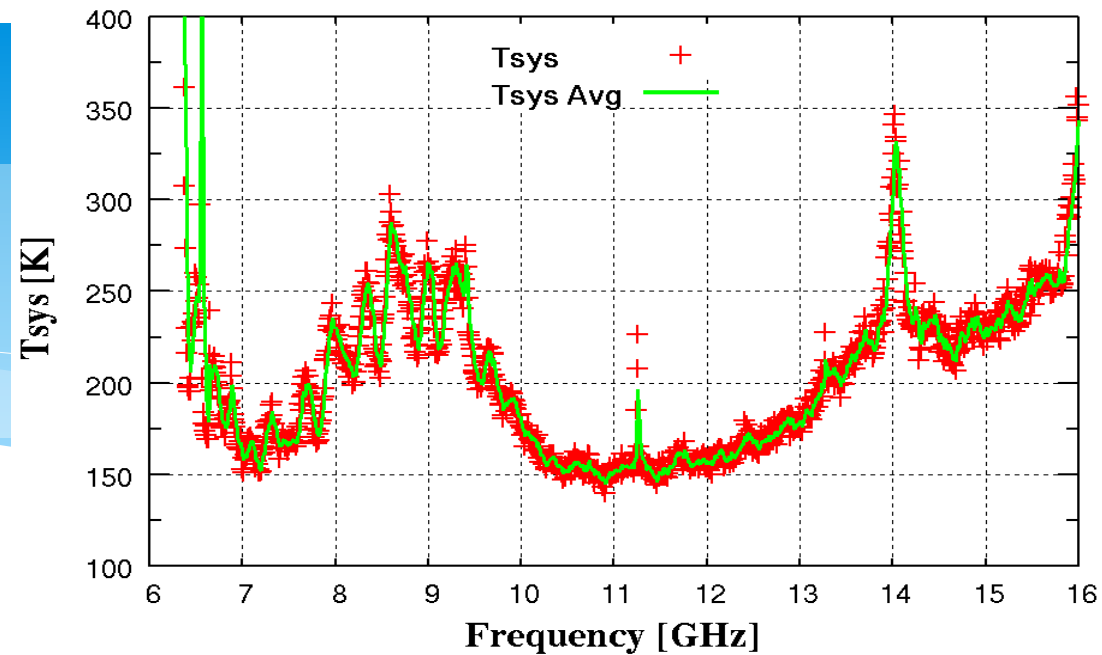
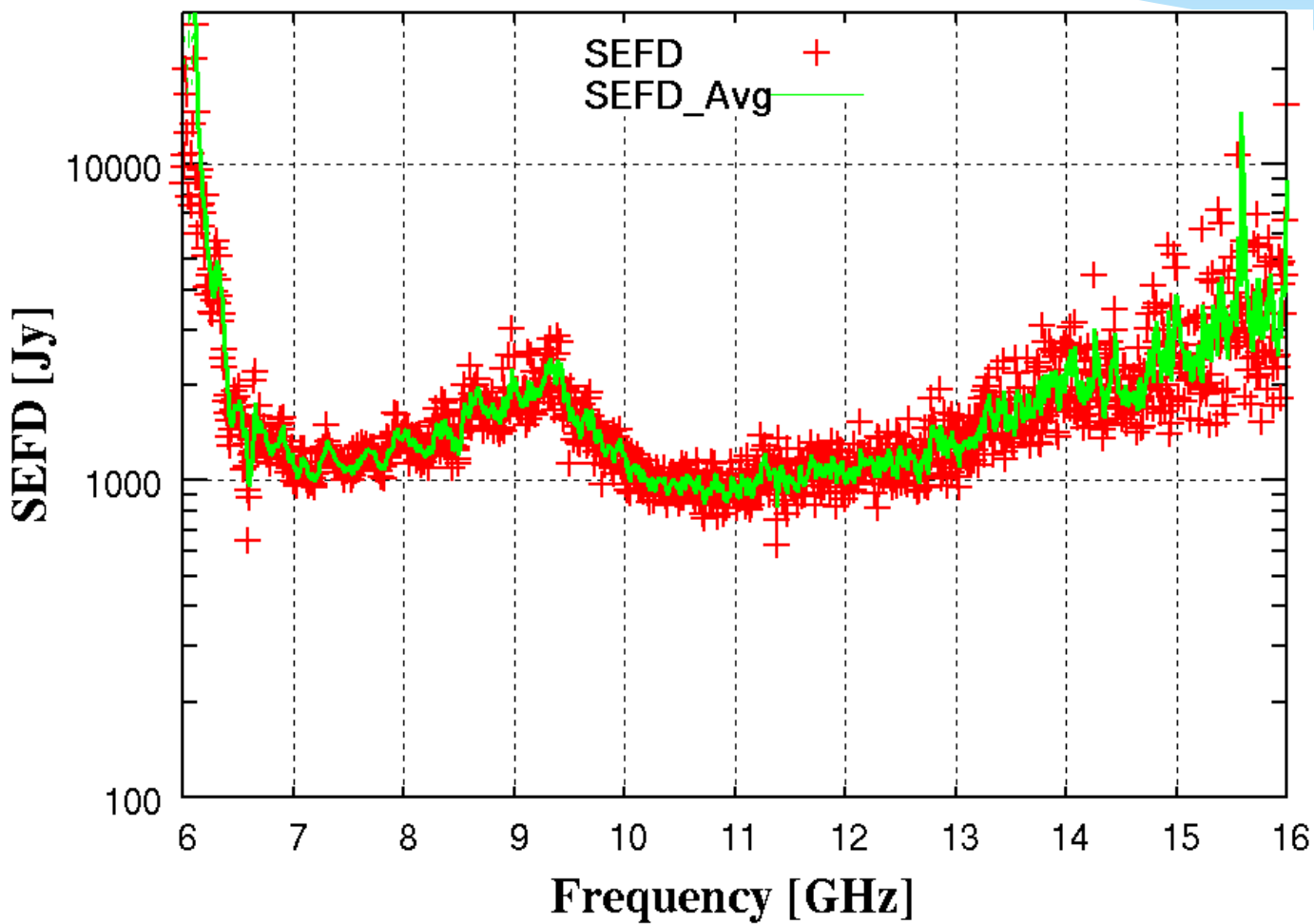
Kashima 34m Station – NICT



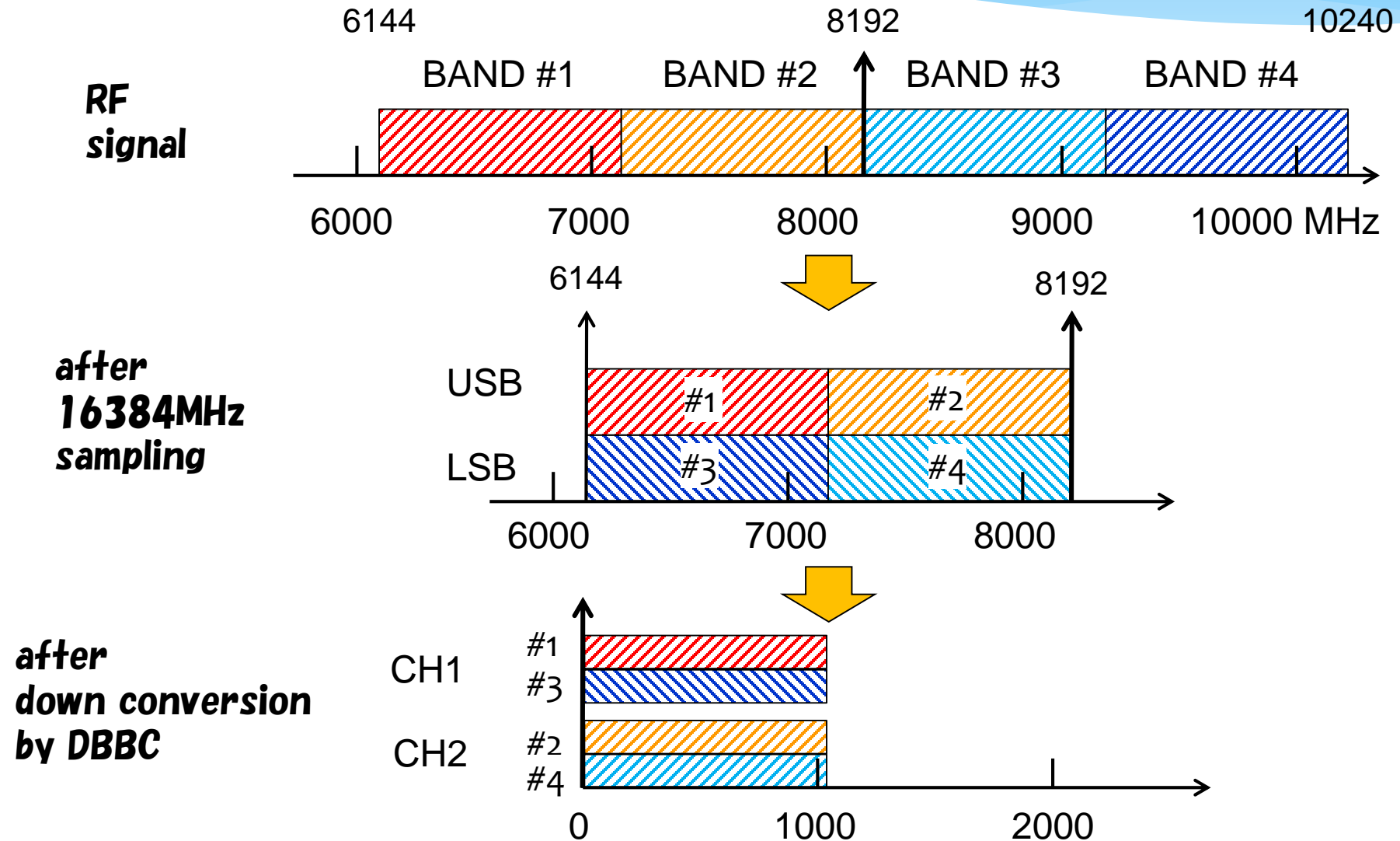
Diameter	34 m
Mount Type	AZ-EL mount
Azimuth Range	+/- 270 deg. From North
Elevation Range	7 – 90 deg.
Slew Rate	Az:0.8deg./sec, EL: 0.6deg./sec
Feed System	IGUANA-H (6.5-15GHz) NINJA (3.2-14.4GHz)
Optics	Cassegrain Focus



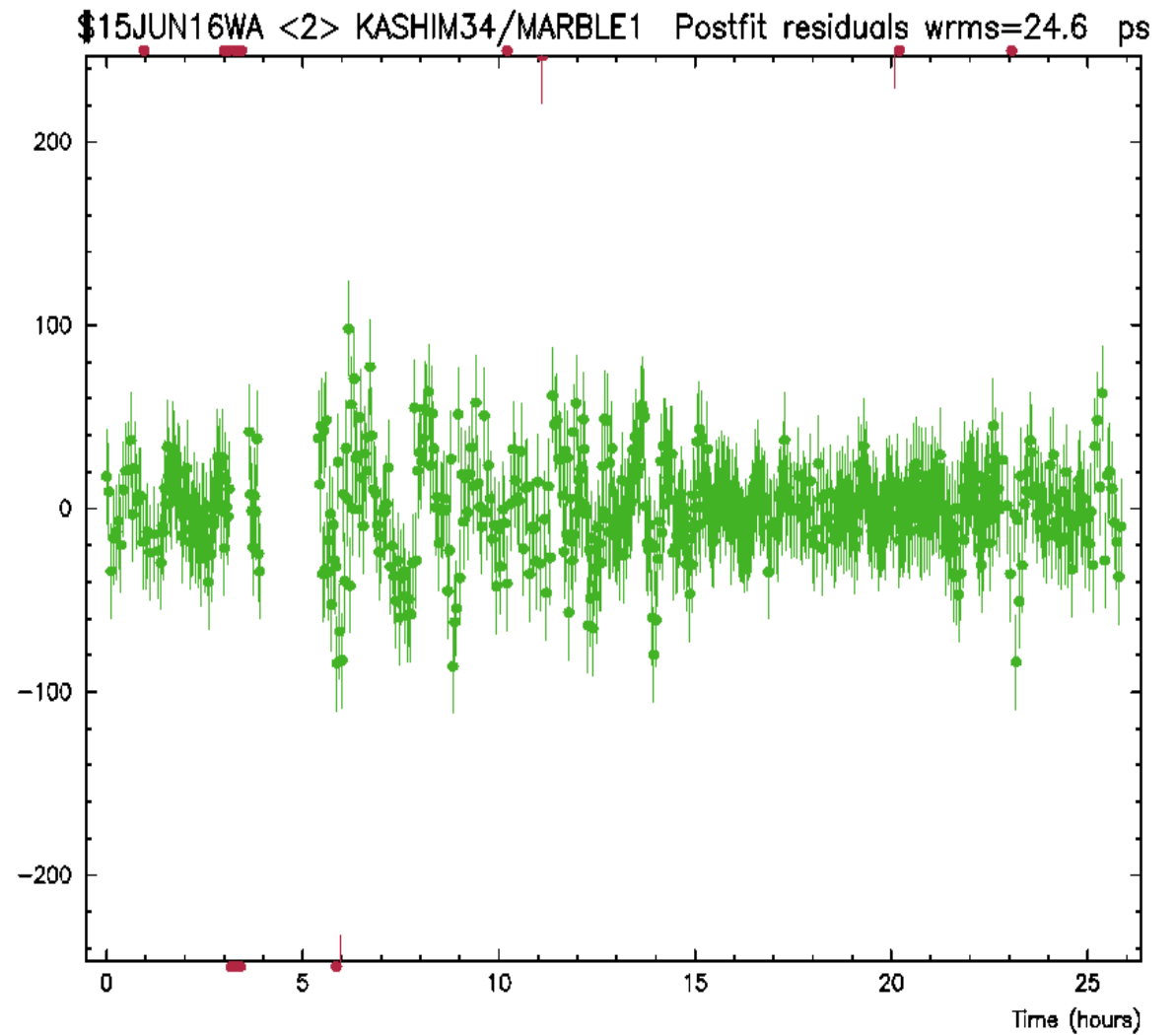
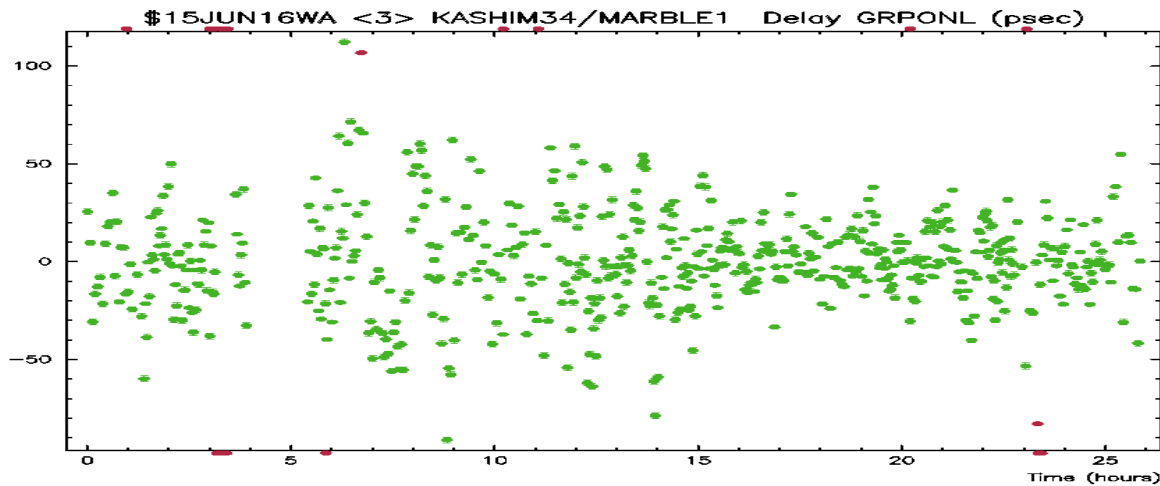
IGUANA-H Broadband Feed on 34m antenna



Direct Sampling with K6 / GALAS



Freq = 6.7, 8.5GHz



広帯域フィードを使った 世界初の国際基線観測 20 Jan. 2015

Collaboration with
MIT Haystack and
NASA/GAFC



120° 150° 180°

-90° -60°

**Kashima
34m (NICT)**

**Westford 18m
(MIT)**

Baseline Length~9500km

40°
20°
0°

60°
40°
20°
0°

120° 150° 180°




-60°



**GGAO 13m
(NASA/GSFC)**

実験の目的

- * 広帯域フィードを使った国際基線のフリンジ検出、異なるDASの互換性確認
 - * 直線偏波、天体に対する偏波角が観測局ごとに異なる
 - * 米国の観測システム(RDBE+MK6)と日本(ADS3000+, PC-VSI)の互換性確認
- * 観測周波数: 10.2–10.7GHz

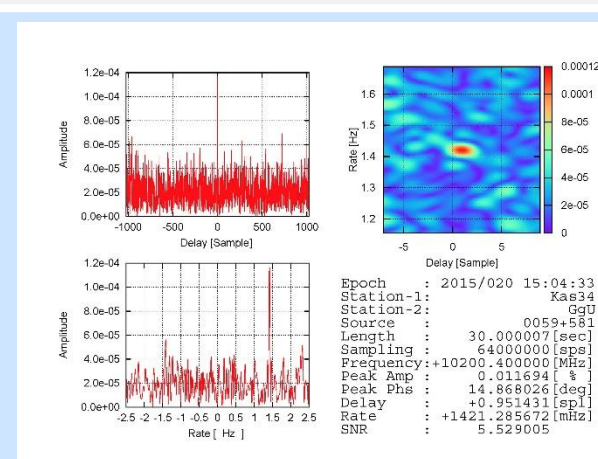
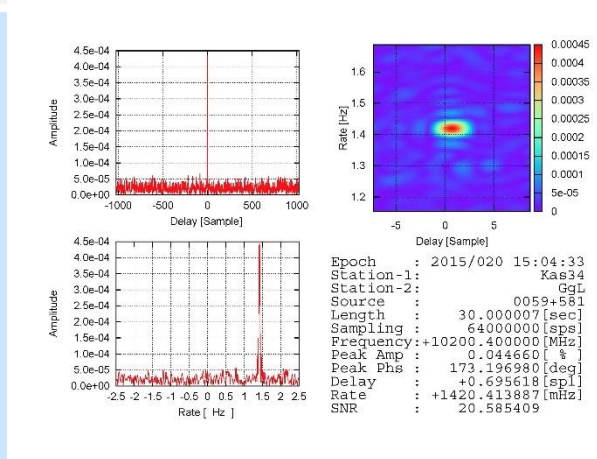
	Westford, GGAO	Kashima34
Observation	RDBE and Mark6 →VDIF 	K5/ADS3000+ And PC-VSI →VDIF  
Correlation Processing	DiFX Software Correlator Fourfit: Multiband Delay	GICO3 Software Correlator – for each Single channel

相関処理： 日本側：ソフトウェア相関器GICO3 単チャンネル /8ch

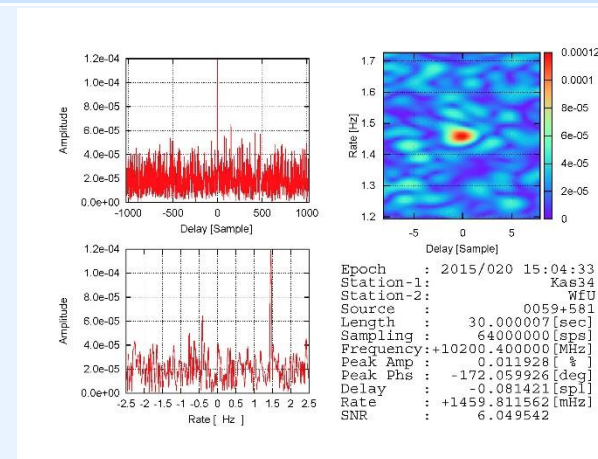
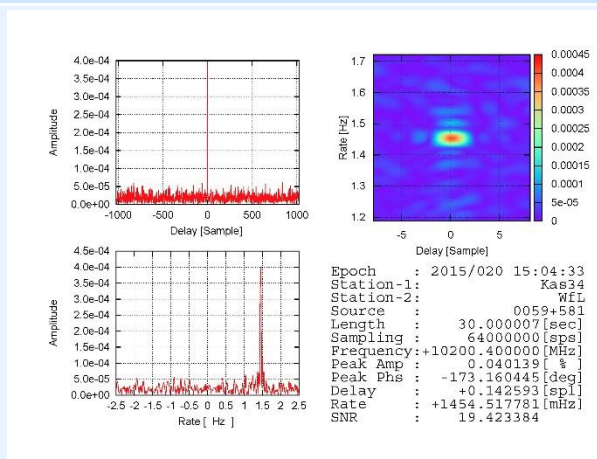
偏波 V-V

偏波 V-H

鹿島34m —
NASA/GGAO



鹿島34m —
MIT/Westford



相関処理：米国側：ソフトウェア相関器DiFX 8チャンネルバンド幅合成

GGAO12m - Kashim34

Kashim34 - Westford

GGAO12m - Westford

