VGOSに対応した広帯域 VLBIシステムGALA-Vの開発

情報通信研究機構　鹿島宇宙技術センター

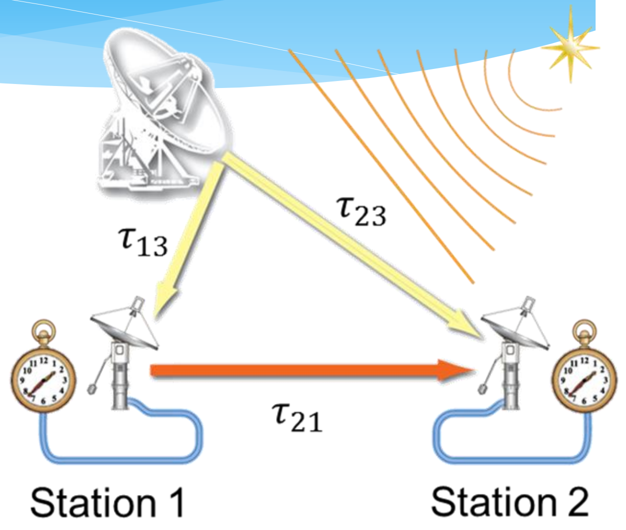
関戸衛、岳藤一宏、氏原秀樹、近藤哲朗、宮内結花、堤正則、川合栄治、長谷川新吾、市川隆一、小山泰弘、花土ゆう子、小室純一、寺田健次郎、難波邦孝、高橋留美、青木哲郎、池田貴俊

産業技術総合研究所　計量標準センター

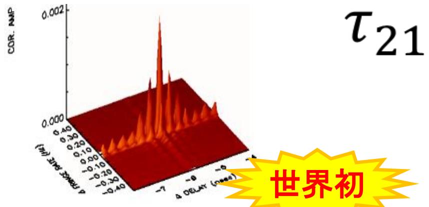
渡部謙一、鈴山智也

Gala－V　Project　概要

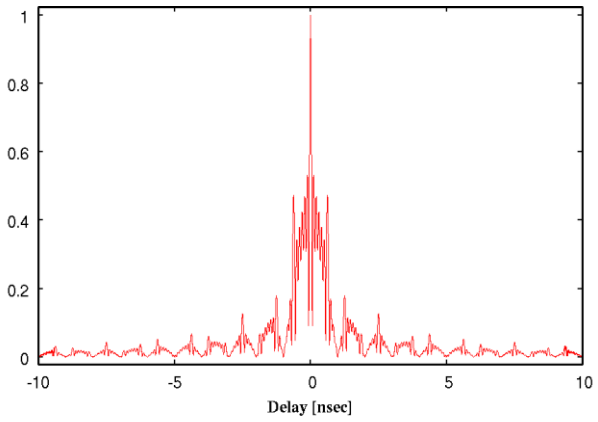
- 小型広帯域のアンテナを原子時計の開発拠点に設置して、原子時計間の周波数比較を行う。
- できるだけ**VGOSと互換性のある広帯域VLBIシステム**
- 独自技術
  - カセグレン用広帯域フィードの設計開発
  - ダイレクトサンプリング法

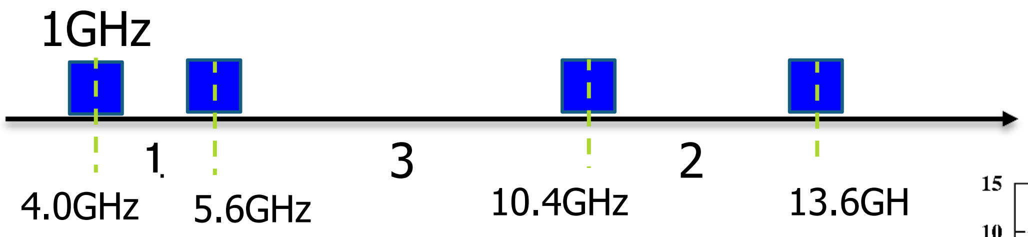


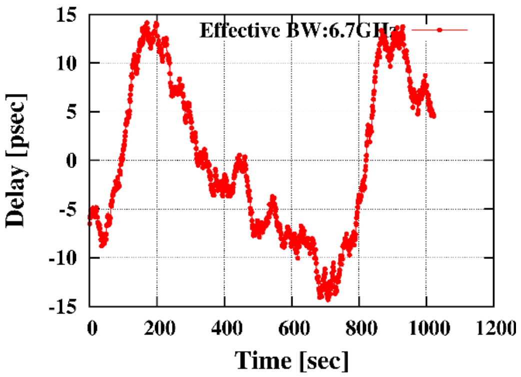
- データ取得：3-15GHzで４バンド（1024MHz幅）
  - Fc＝4．0GHz、5．6GHz、10．4GHz、13．6GHz
  - **有効帯域幅：3．8GHz（従来の10倍）**

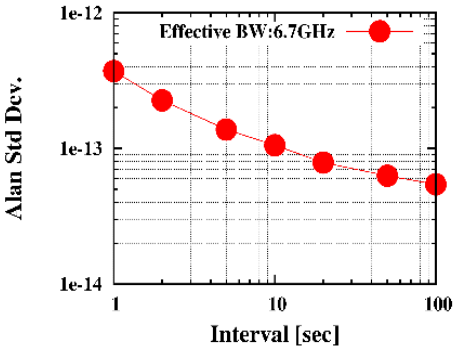


$$\tau_{21} = \tau_{13} - \tau_{23}$$









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。

Topics of our PROJECT

1. カセグレンアンテナ用広帯域フィードの開発(Kashima 34)

   - IGUANA-H: 6.5-15GHz
   - NINJA： 3-14.4GHz

2. ダイレクトサンプリング(16GHz)と広帯域バンド幅合成.

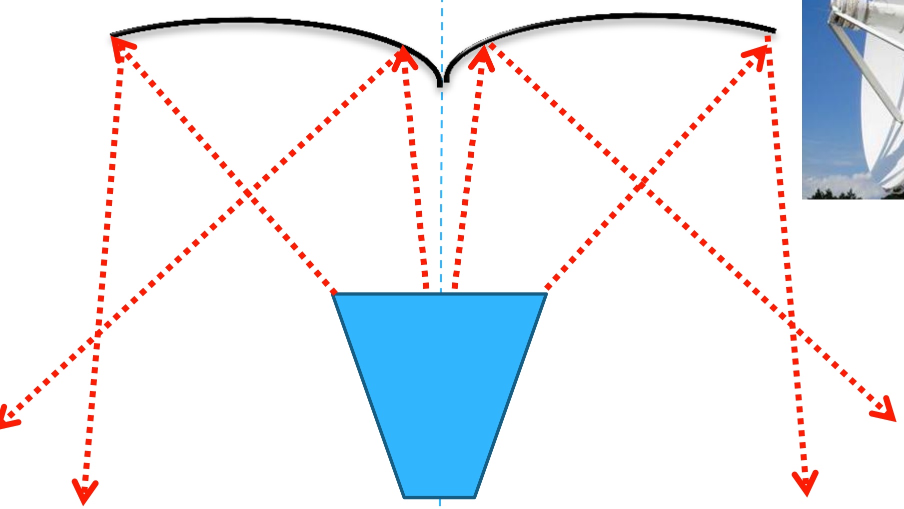
   A) RF信号を周波数変換なしに直接A/D変換.

   B) 広帯域バンド幅合成(位相校正信号PCALを使わず).

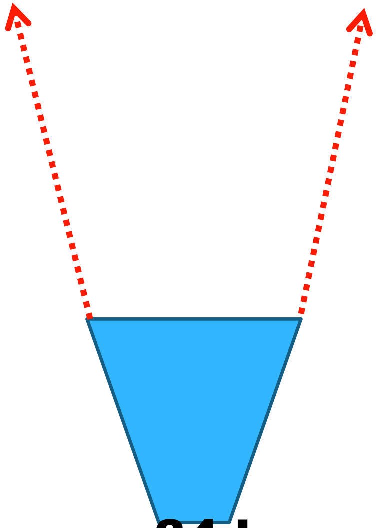
3. 超広帯域(3-12GHz)のVLBI実験の結果、大気遅延が測地精度を制限していること、精度向上のためには高速な天体切り替えが必要であることが確認さつつある。

Reason why NICT Developed Broadband Feeds

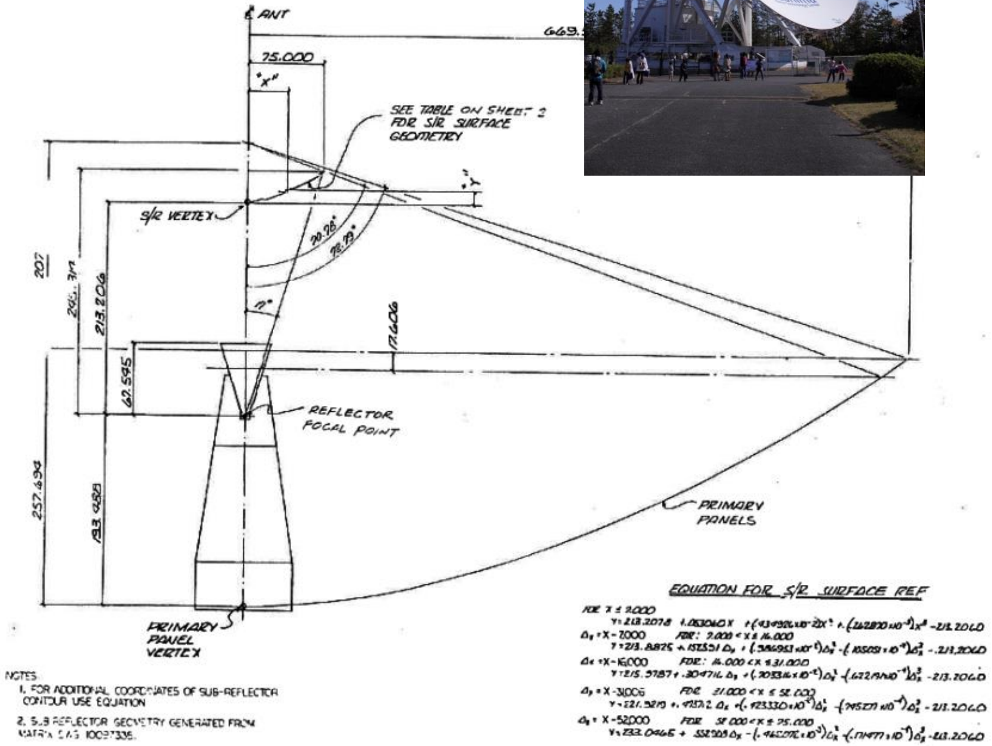
Requirement of **Broadband Frequency** and **Narrow beam width**

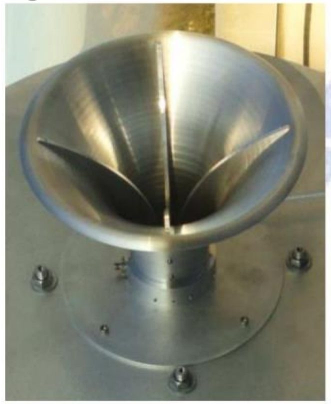


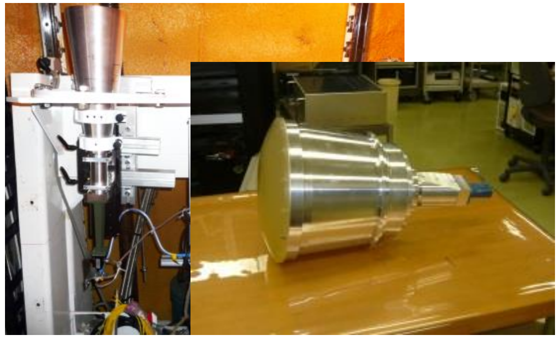
～120deg.



～34deg.

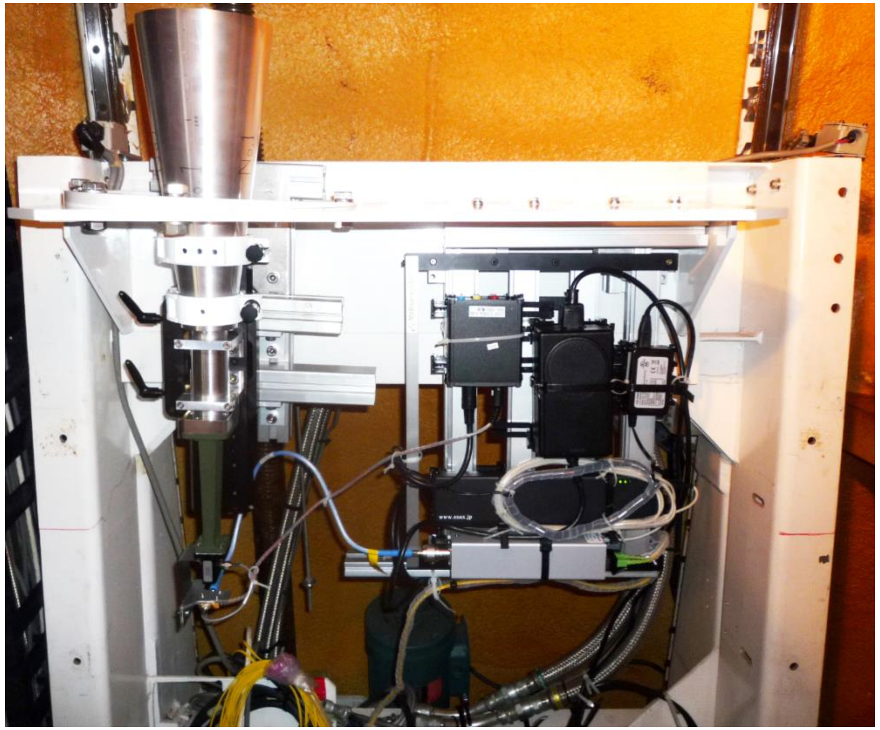






Broadband Feed for Cassegrain optics Kashima 34m antenna

現在は直線偏波1つであるが
今年中に直線両偏波化の予定

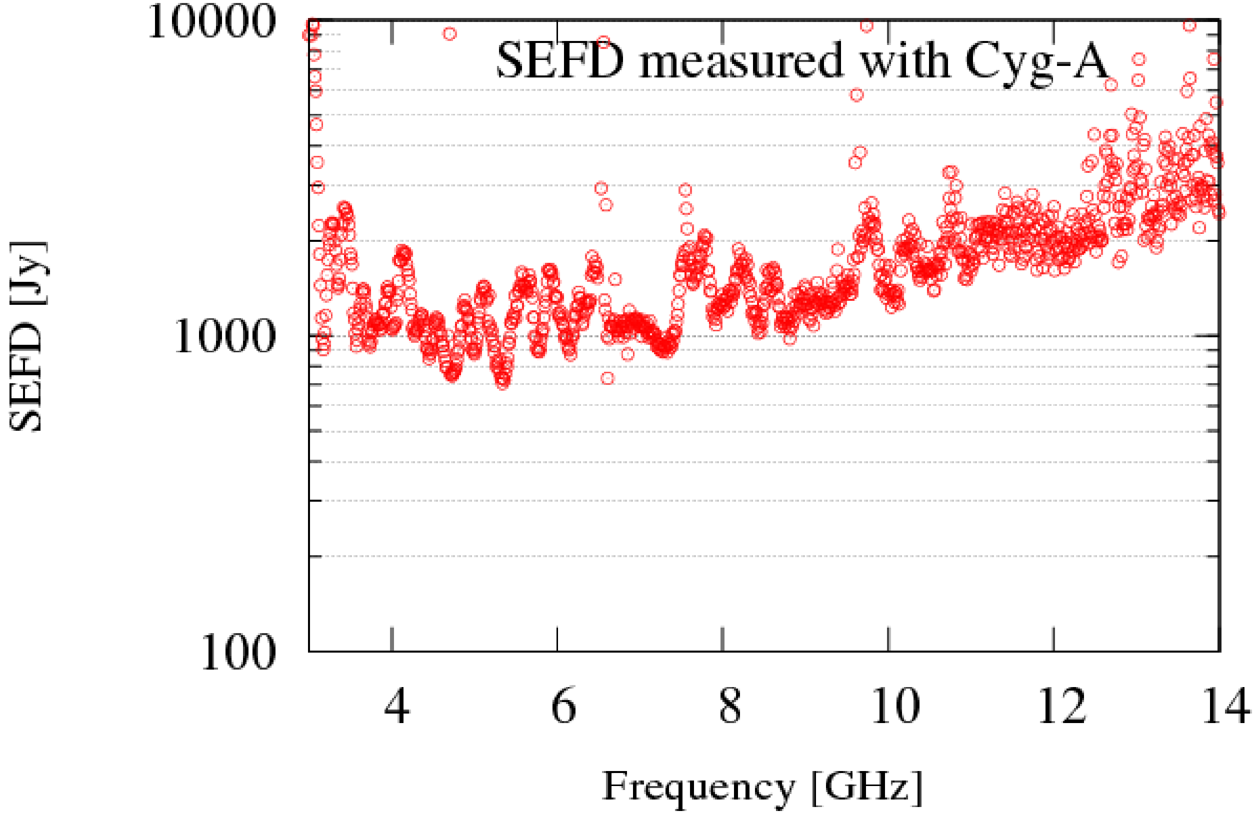


IGUANA-H Feed (6.5-15GHz)

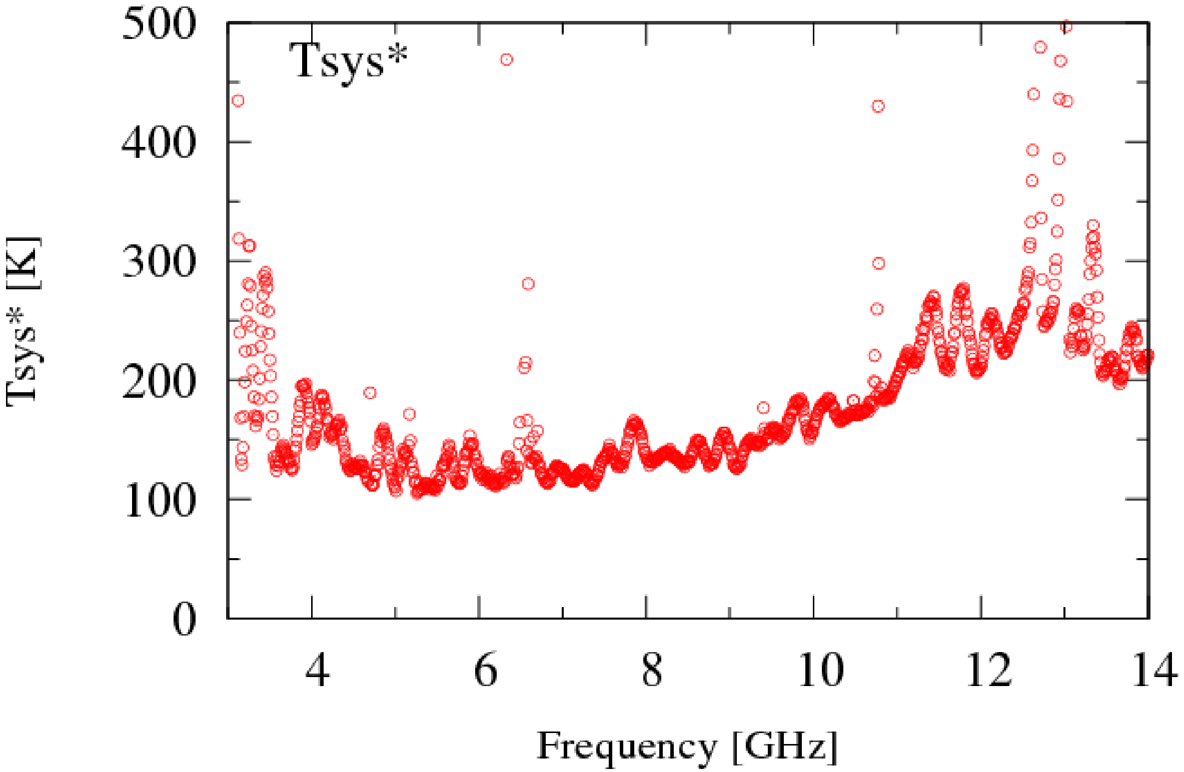
NINJA Feed (3.2-14.4GHz, nominal)

NINJA Broadband Feed on 34m antenna

SEFD of Kashima 34m with NINJA Feed



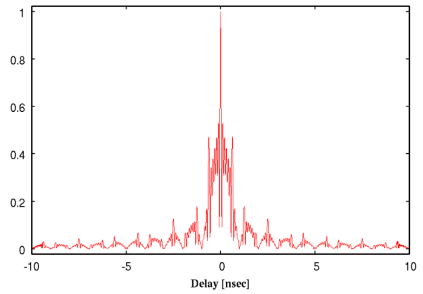
Modified System Temperature with NINJA Feed

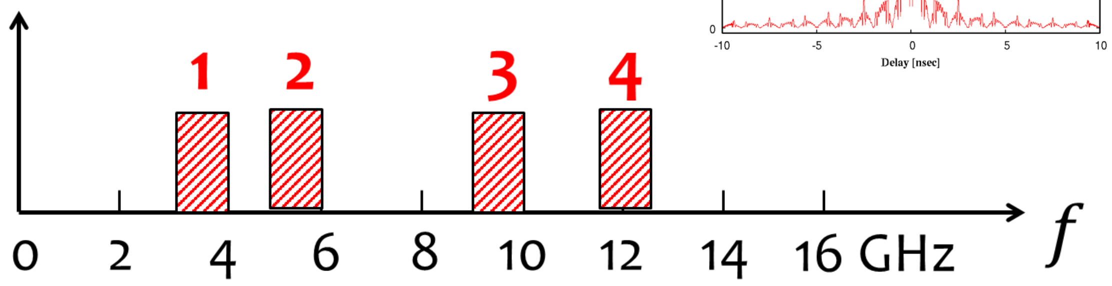


RF信号を直接A/D変換する高速サンプラ

K6/GALAS

国立天文台の開発したサンプラを仕様変更して活用。 共同研究資源の活用

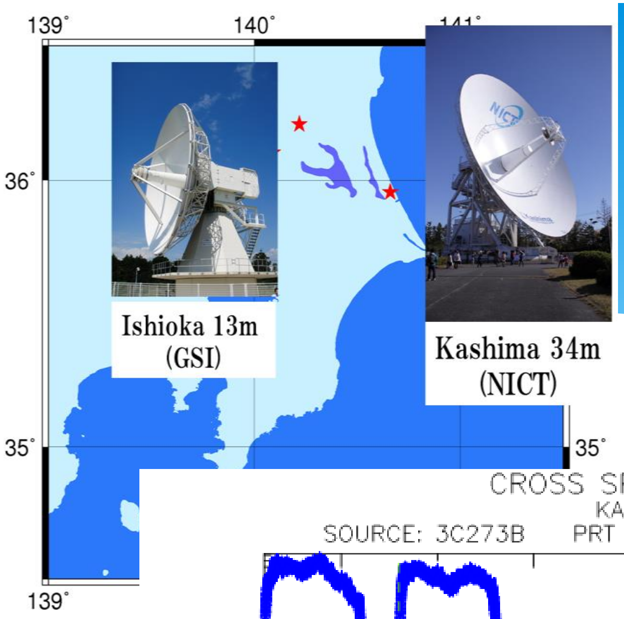




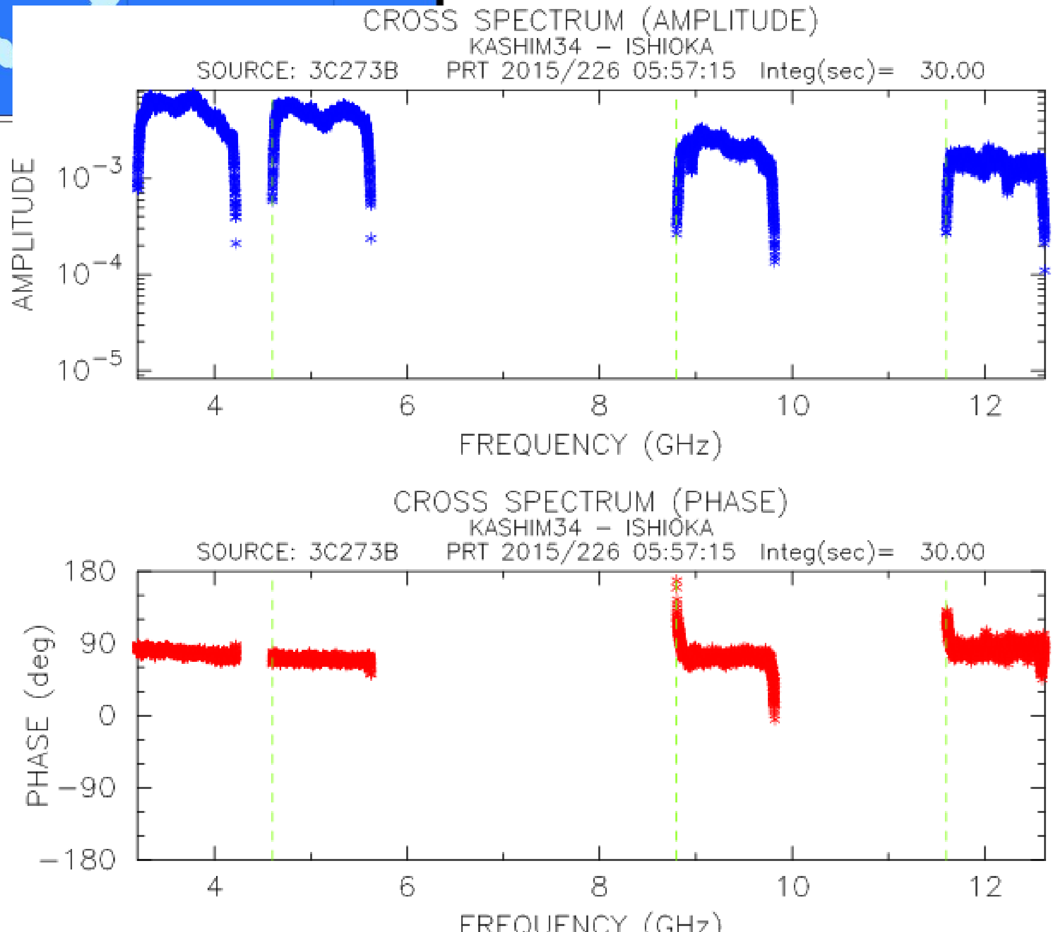
Lower Edge= 3.2, 4.8, 8.8, 11.6GHz

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

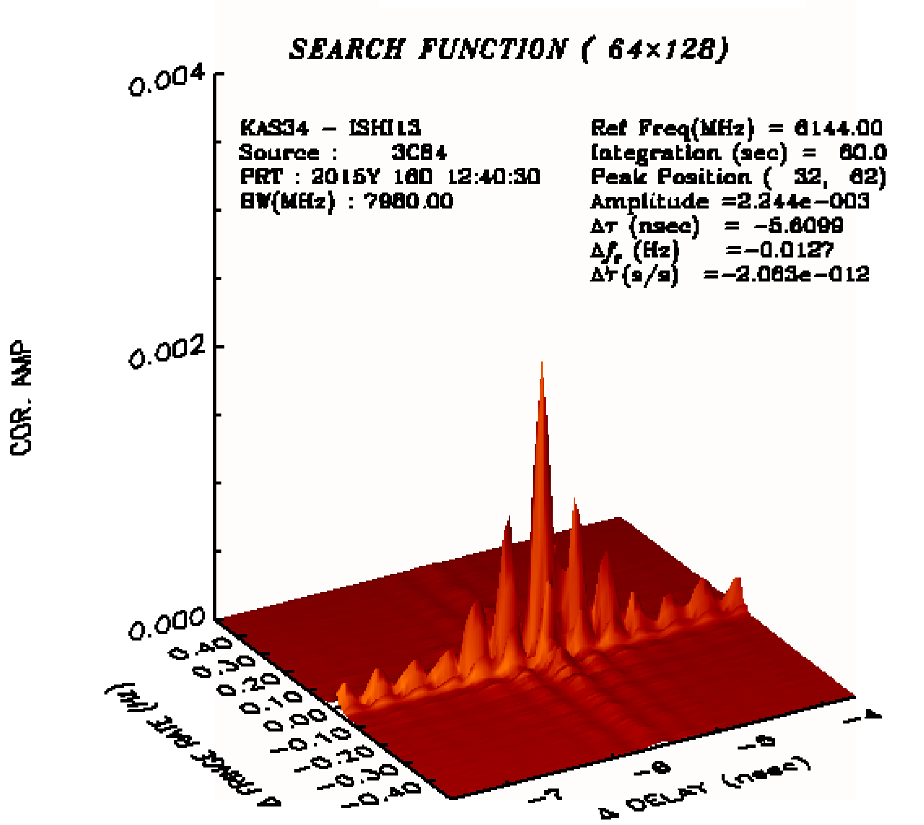
バンド幅合成結果



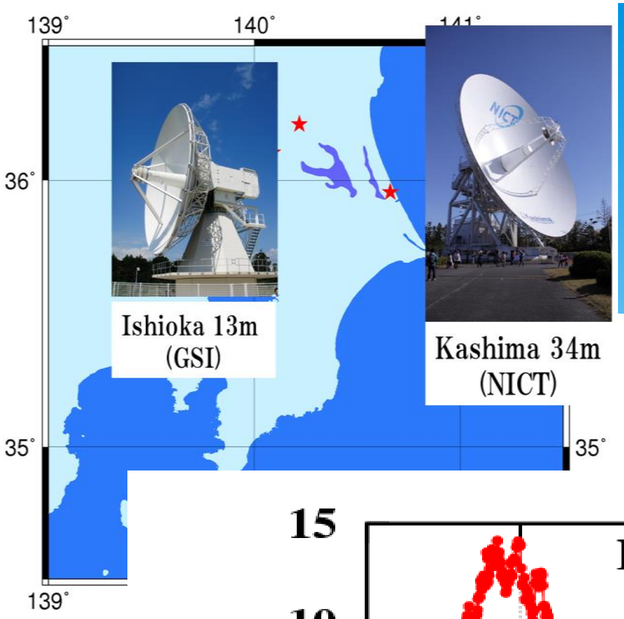
相互相関スペクトル

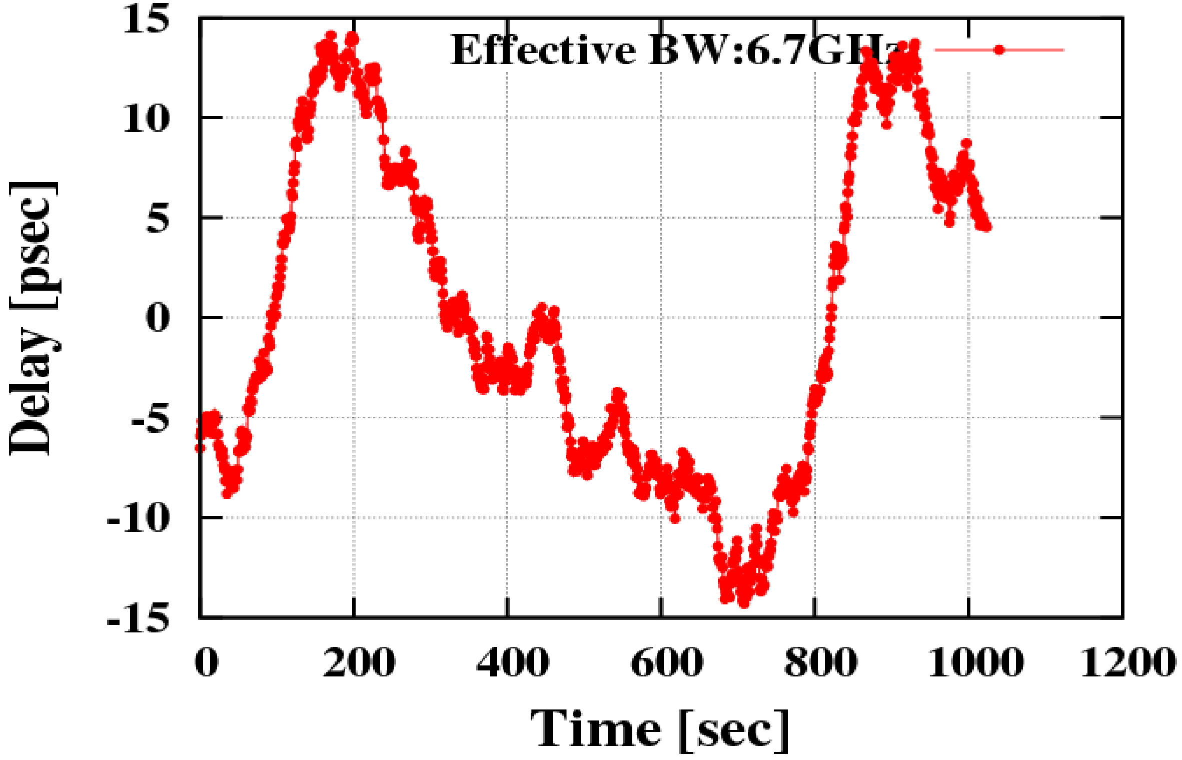


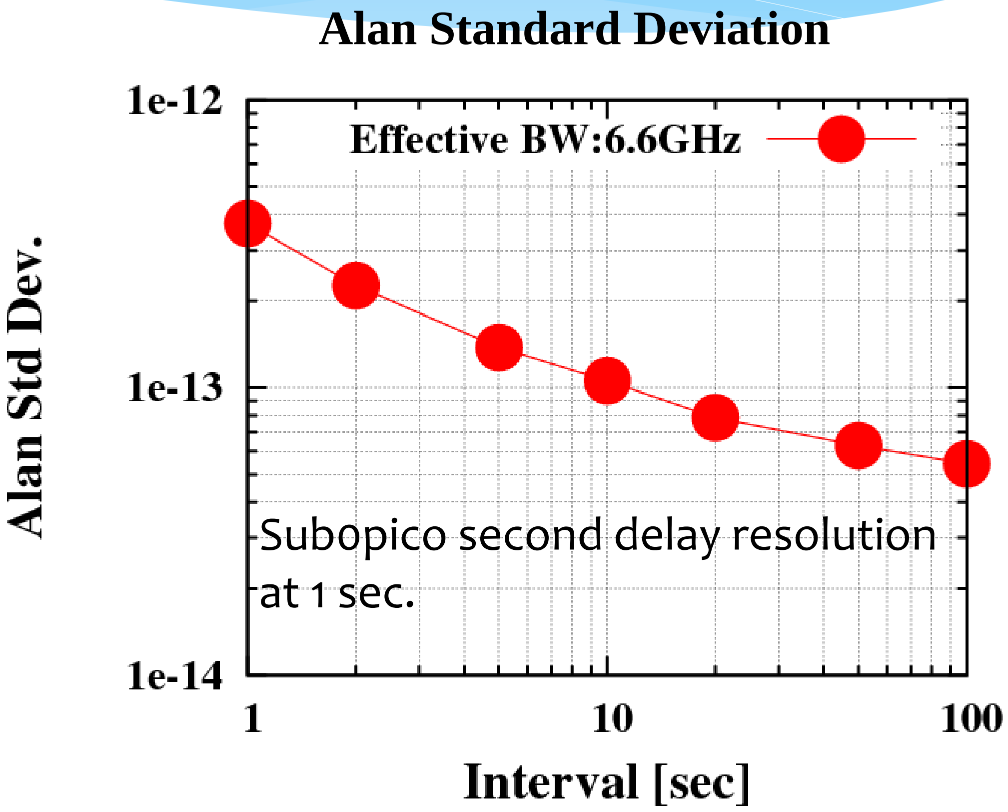
遅延分解関数



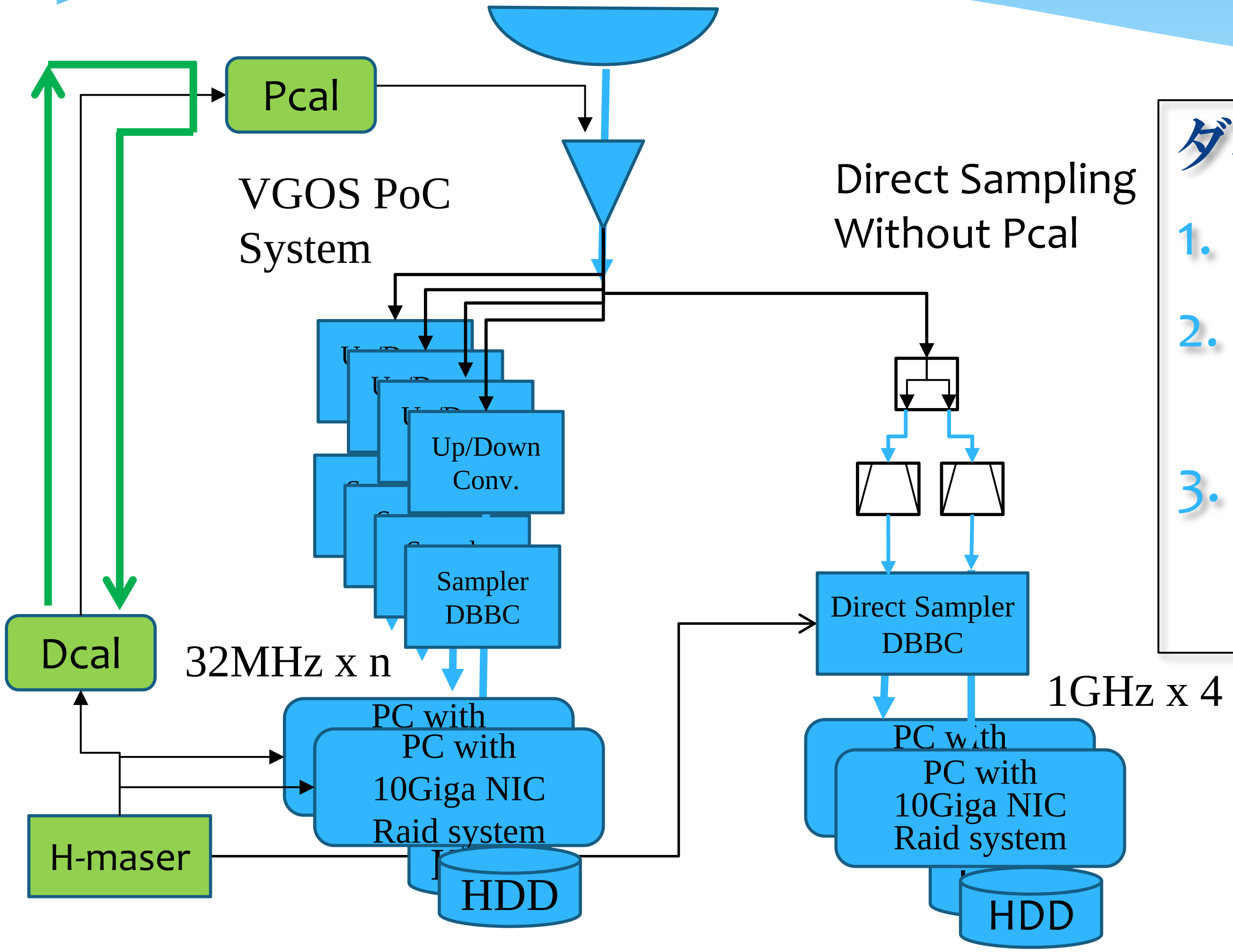
広帯域群遅延量(3.2-12.6GHz)の挙動







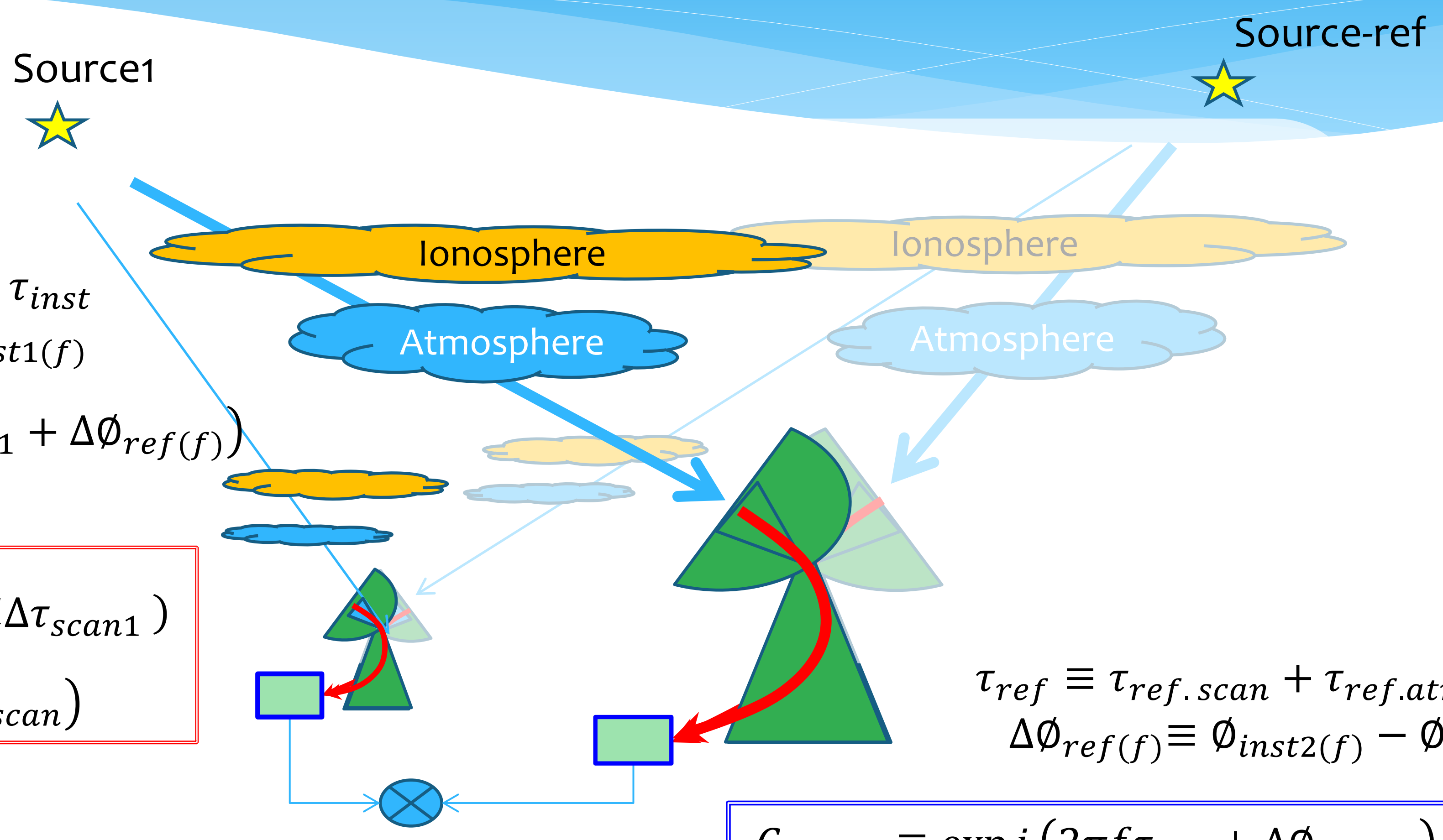
ダイレクトサンプリング方式により
校正系を簡素化したシステムを実現



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となり、PCALが不要に。
3. 検証されれば → 遅延校正系も不要.

Procedure of Broadband Phase Calibration with radio source



$$\tau_{scan1} \equiv \tau_{scan1} + \tau_{atm1} + \tau_{inst}$$
$$\Delta\emptyset_{ref(f)} \equiv \emptyset_{inst2(f)} - \emptyset_{inst1(f)}$$

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

$$\frac{C_{scan1(f)}}{C_{ref(f)}} = A_{scan1(f)} \exp(2\pi f i \Delta\tau_{scan1})$$
$$\Delta\tau_{scan1} \equiv \left(\tau_{scan1} - \tau_{ref.scan}\right)$$

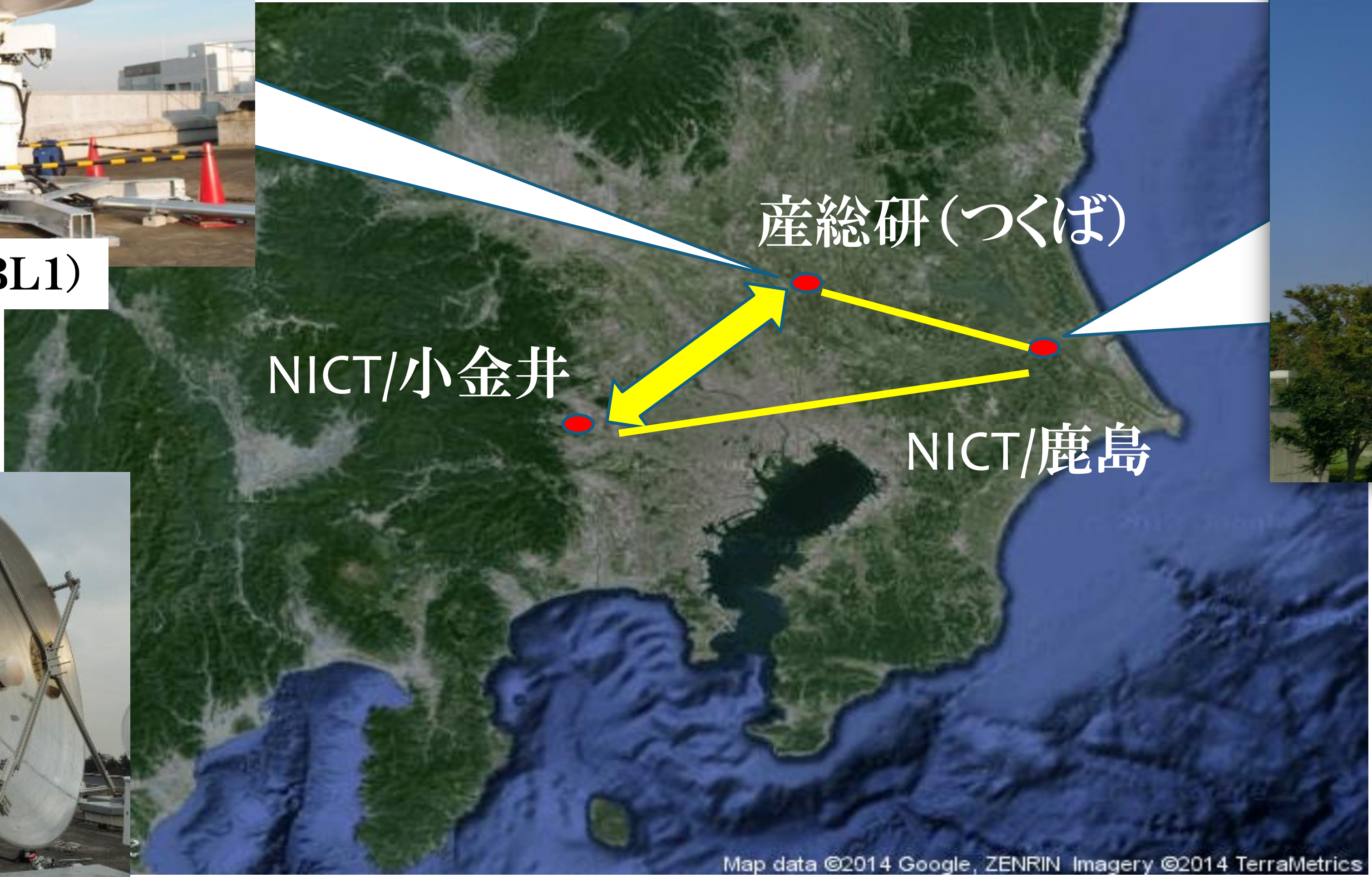
$$\tau_{ref} \equiv \tau_{ref.scan} + \tau_{ref.atm} + \tau_{inst}$$
$$\Delta\emptyset_{ref(f)} \equiv \emptyset_{inst2(f)} - \emptyset_{inst1(f)}$$

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

NICTの周波数比較VLBIシステムGALA－V の開発基線

産総研（MBL1）

NICT（鹿島34m）

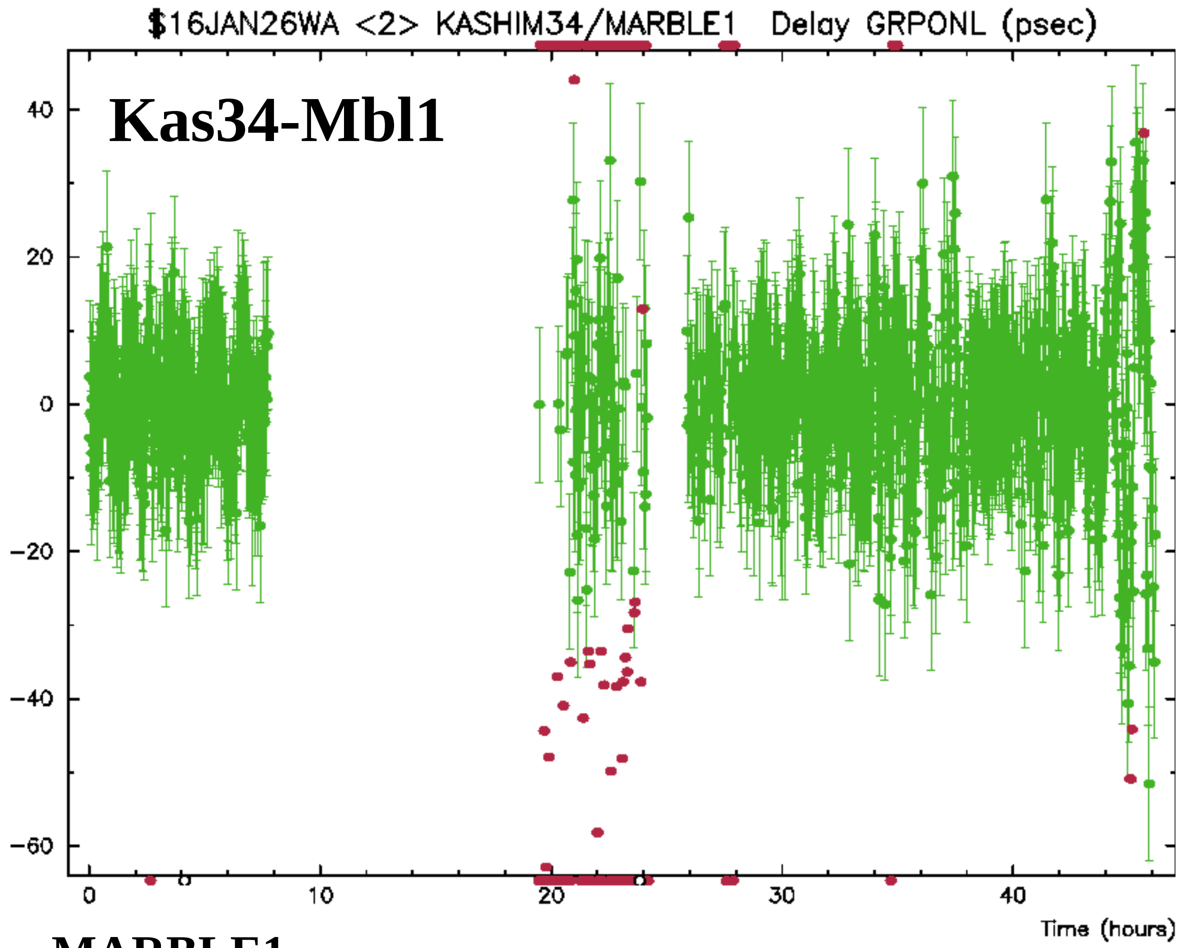


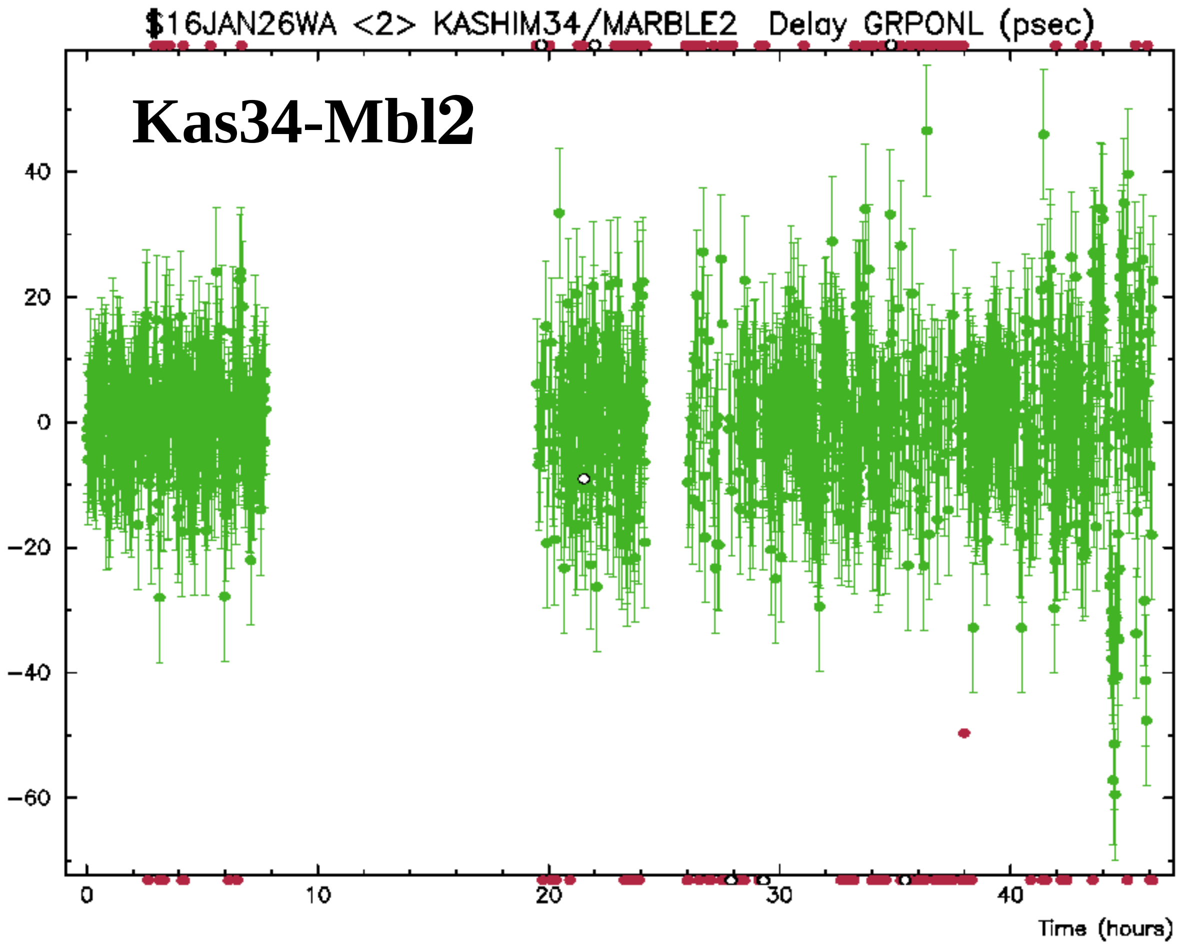
NICT（MBL2）

Baseline Analysis with CALC/SOLVE

Baseline Length

KASHIM34 - MARBLE1： 48716973.54 mm 0.61 mm
KASHIM34 - MARBLE2： 109426298.83 mm 0.79 mm
MARBLE1 - MARBLE2： 70218042.64 mm 0.92 mm





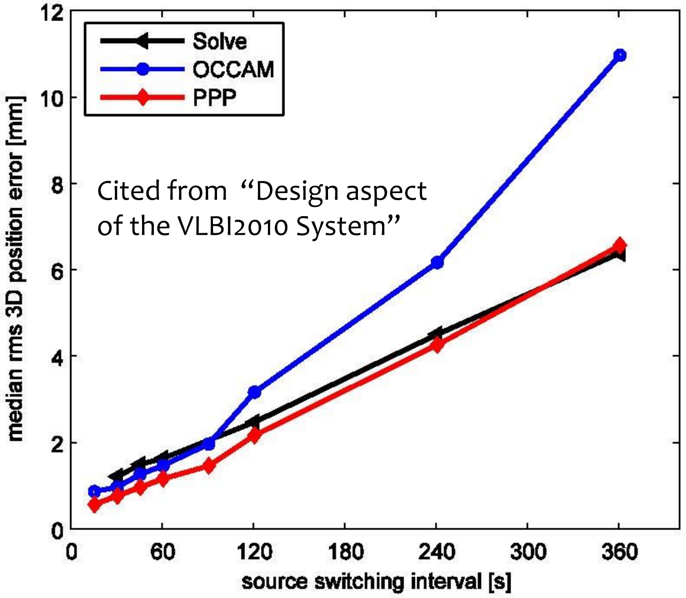
MARBLE1

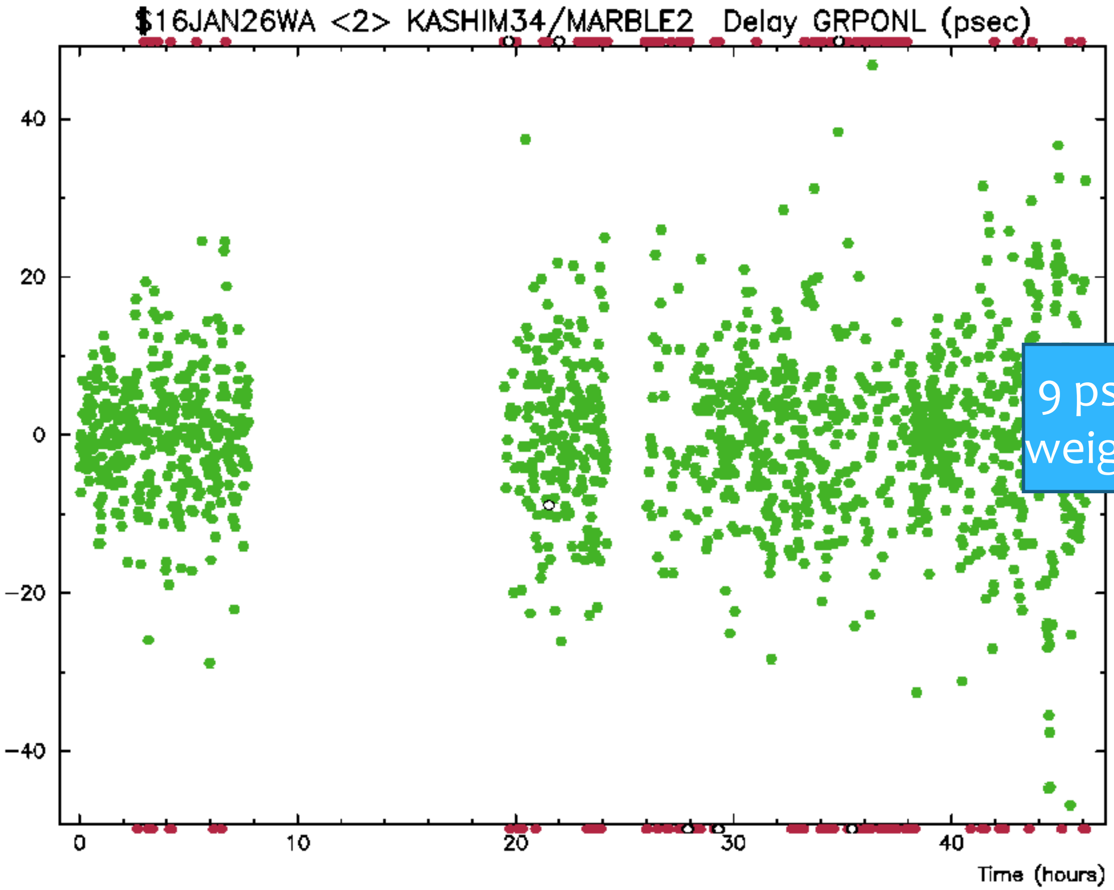
X：-3962279886.80 mm 2.1 mm
Y： 3308885708.02 mm 1.8 mm
Z： 3733537845.50 mm 2.0 mm

MARBLE2

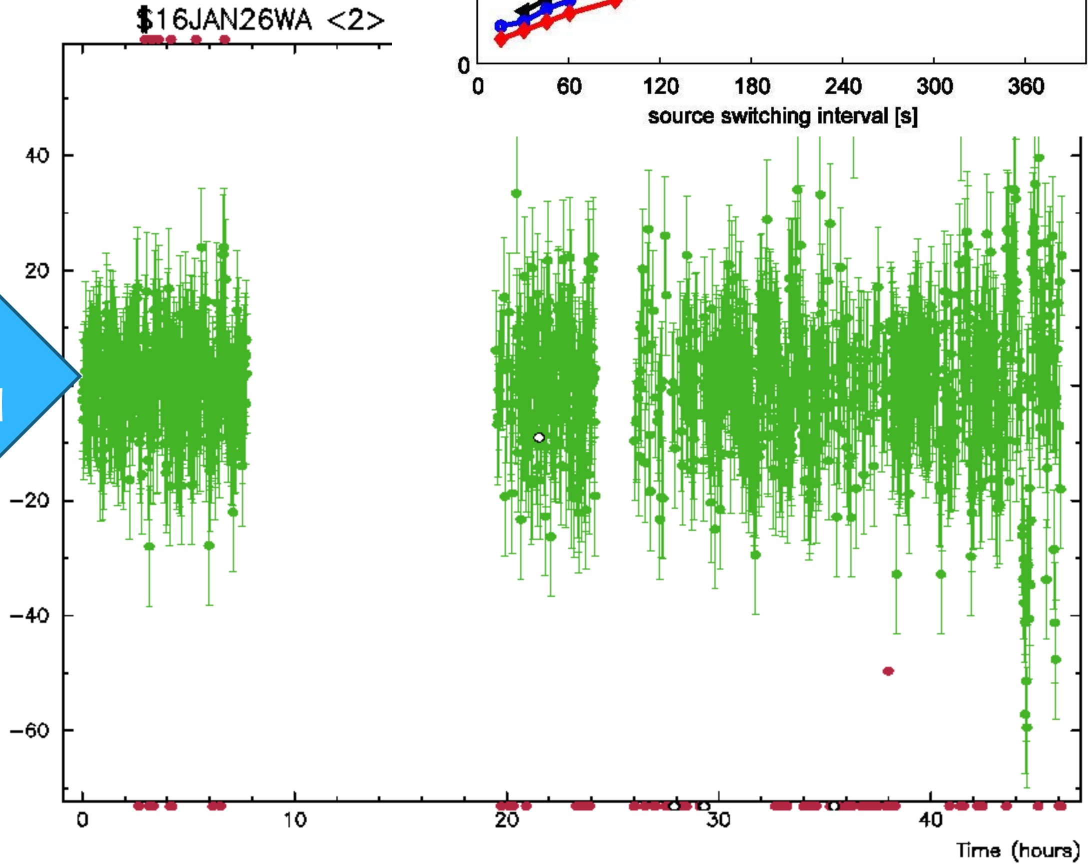
X: -3942069528.88 mm 2.1 mm
Y: 3368280225.42 mm 1.8 mm
Z: 3702003637.91 mm 2.4 mm

VGOSの計画仕様で検討されている通り、大気の遅延誤差が誤差を支配し、高速スリュー観測での改善を目指す。





9 psec. error weight added

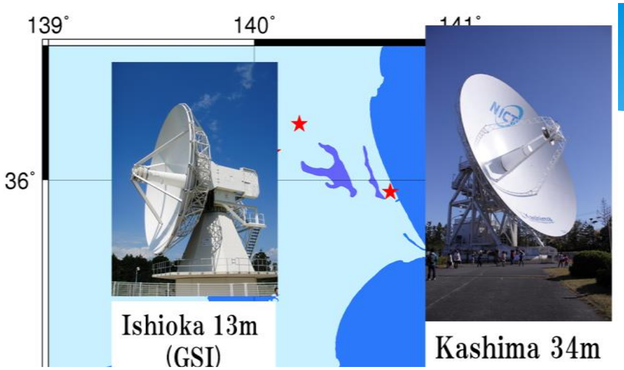


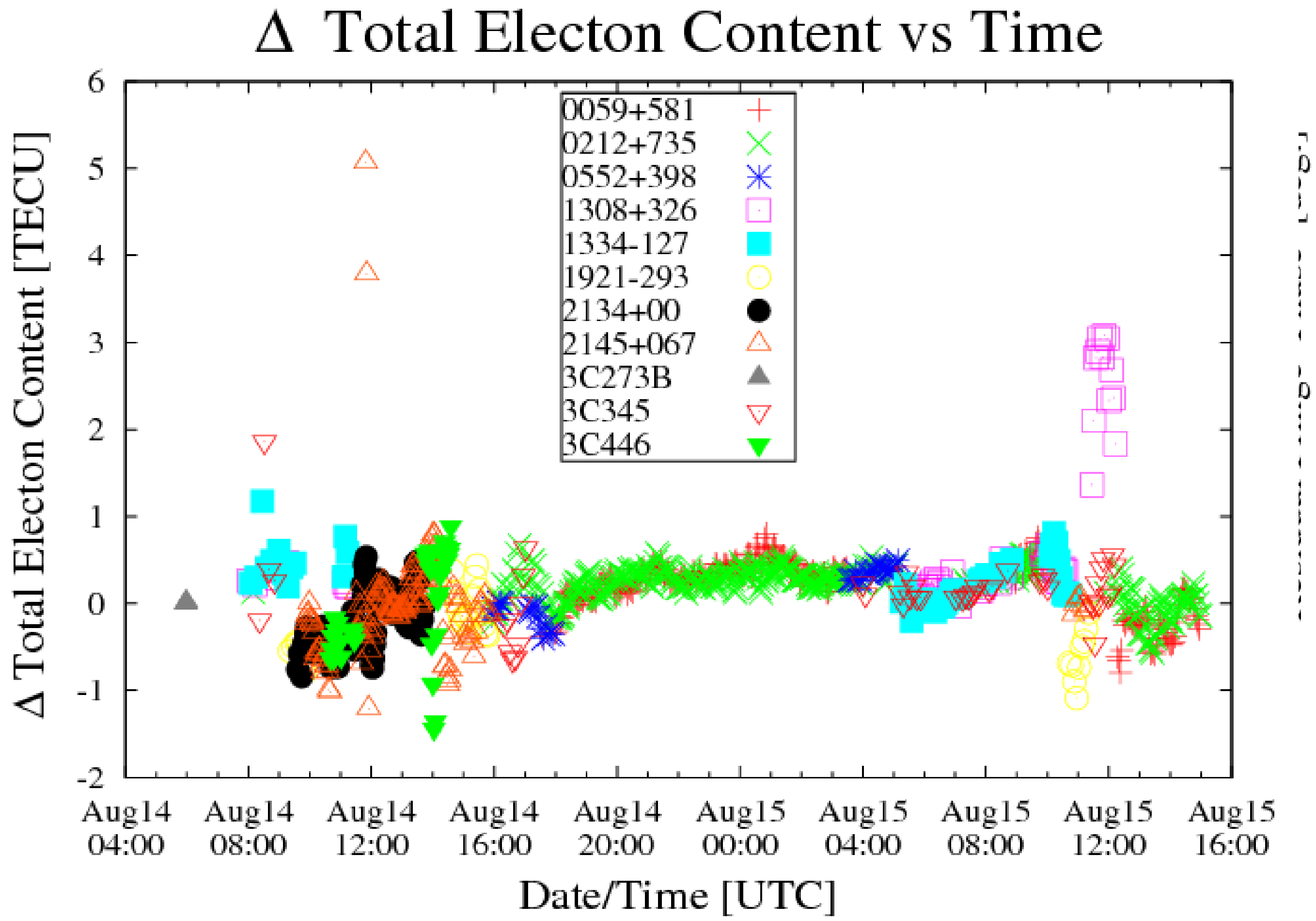
超長基線の広帯域VLBIの開発課題

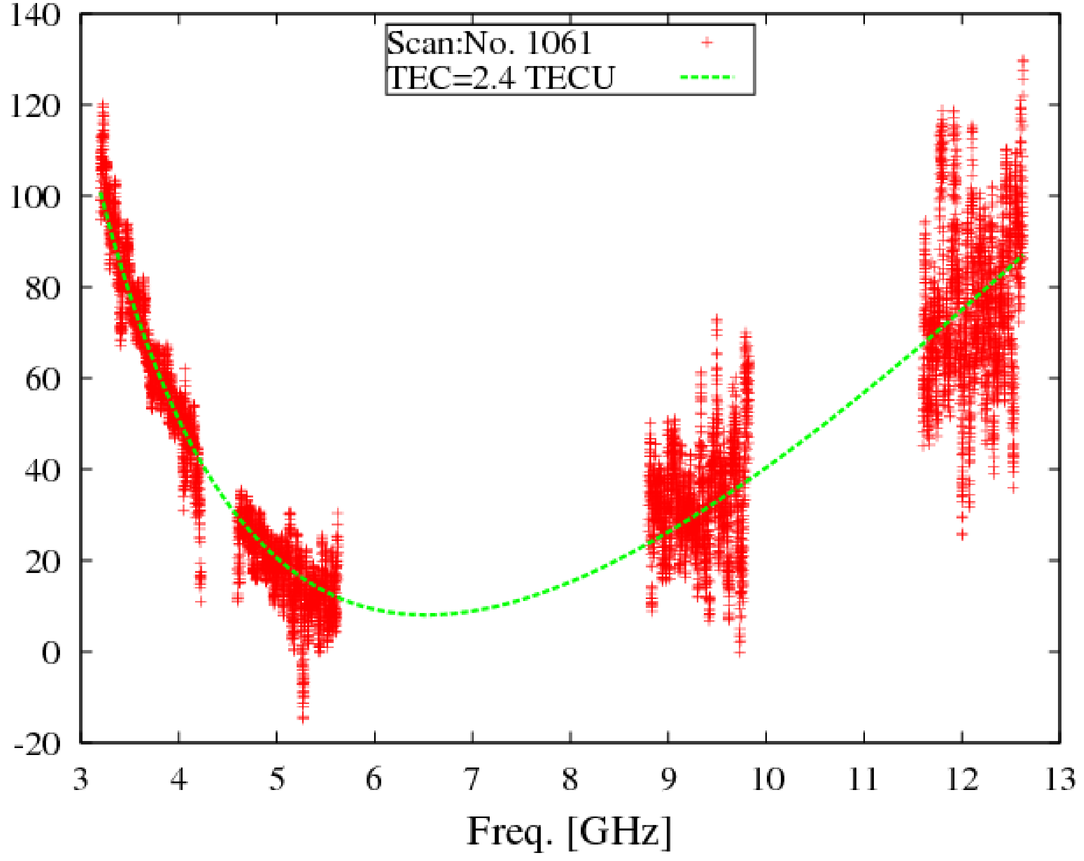
1. 広帯域バンド幅合成技術の開発
   1. 直線偏波2x2の相関処理　合成技術の開発
      * 4つの偏波の相互相関(VV,HH,VH,HV)を合成するアルゴリズム
      * →ストークスパラメータの算出、天文学的成果も。
   2. 大きな電離層遅延の影響を考慮した(同時推定する）バンド幅合成
2. 天体の構造の影響

電離層遅延の影響

$$\emptyset[deg.] = \alpha \frac{\delta TEC}{f} + 360 \times \delta\tau \times f + c$$



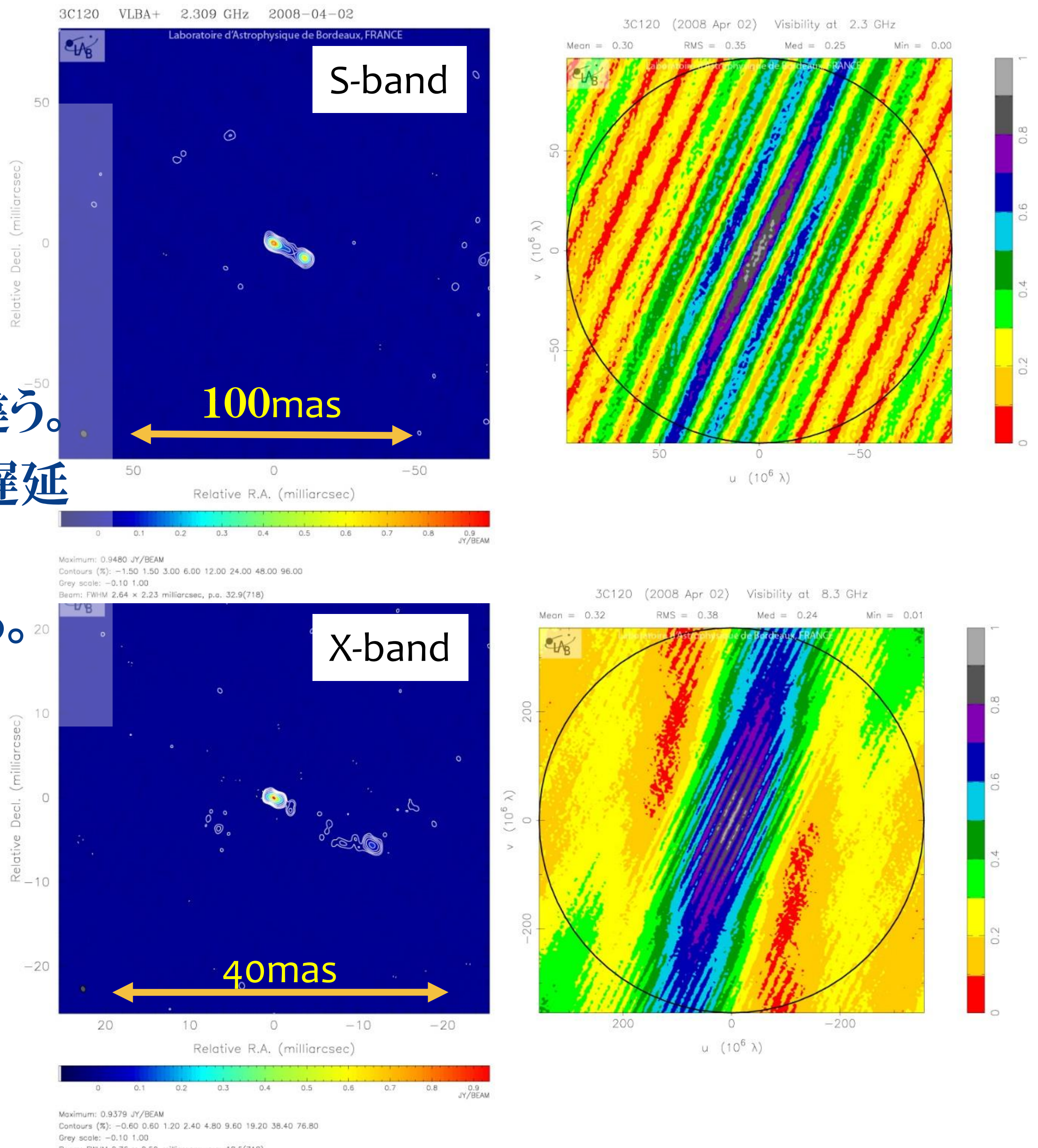




電波源構造の影響

* 群遅延量：$= \frac{\partial \phi}{\partial f}$　帯域幅方向の位相傾斜
* VLBIは空間周波数をサンプリングする。
  * 空間周波数：＝B/λ
  * 同じ基線でもRF周波数によって空間周波数が違う。
  * →天体構造の影響(psオーダ)が観測される群遅延に付加される。
* 見かけの天体構造は周波数に依存して異なる。

ボルドー大学　電波源構造データベースより



ご清聴ありがとうございました

- 小型アンテナの実験は産総研との共同研究に基づいて実施しています。
- 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：山口大学藤沢健太教授）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。
- 石岡局との広帯域VLBI実験では、国土地理院の方々に多大な協力をいただきました。