

# 月周回衛星SMART-1のVLBI観測 ～相関処理結果および軌道推定結果～

Fuyuhiko Kikuchi\*, Qinghui Liu, Sander Goossens,  
Koji Mastumoto, Jinsong Ping, Hong Xiaoyu, Yusup Aili,  
Hideo Hanada, and Nobuyuki Kawano, RISE Group.

# 発表の概要

## 1. 背景

- ・VLBI観測および遅延時間推定の原理
- ・月探査計画SELENE(2007)への応用
- ・同一ビームVLBI観測による相対位相遅延推定

## 2. VRADシステム

- ・狭帯域VLBI記録システム
- ・相関処理ソフトウェア

## 3. 月周回衛星SMART-1のVLBI観測

## 4. 月周回衛星SMART-1の軌道推定

## 5. まとめ

# VLBI観測および遅延時間推定の原理

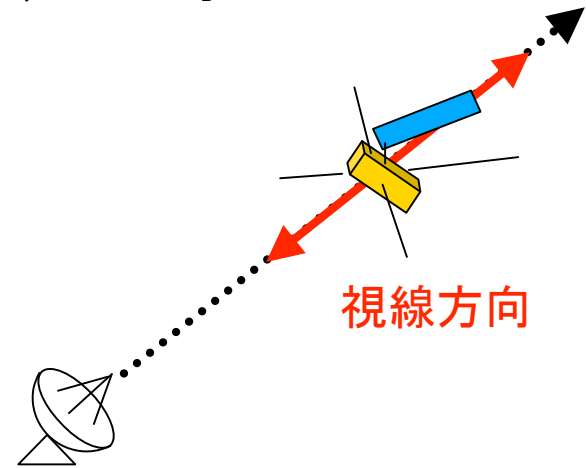
## レンジ&ドップラ観測 [従来の軌道決定手法]

観測量・・・視線方向 距離 距離変化率

視線方向への衛星の位置変化に感度

$$f_{\text{doppler}} = -2k \left( \frac{v_{\text{los}}}{c} \right) \cdot f_0$$

$f_0$  : 送信周波数     $c$  : 光速  
 $f_d$  : ドップラーシフト     $k$  : transponding ratio

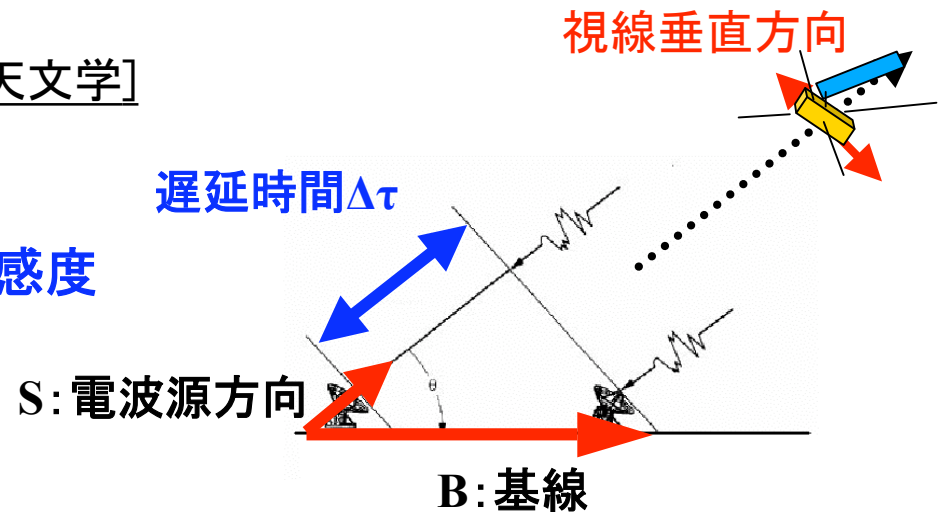


## VLBI観測 (超長基線電波干渉計)[位置天文学]

観測量・・・遅延時間

視線垂直方向への衛星の位置変化に感度

$$\Delta\tau = \frac{\mathbf{B} \cdot \mathbf{S}}{c}$$



“ドップラ観測” + “VLBI観測” ⇒ **3次元での高精度位置決定が可能**

# 現在のVLBI観測手法 大気、電離層変動の除去

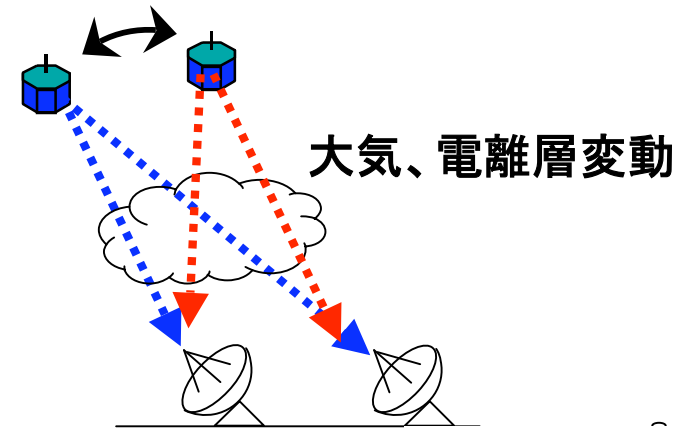
## Switching VLBI 2機の衛星を交互に観測

JPL/NASA衛星VLBI, 測地VLBI

誤差要因: スイッチング周期以下の変動

遅延時間精度... **数10ps**

(位相誤差... 数十度)

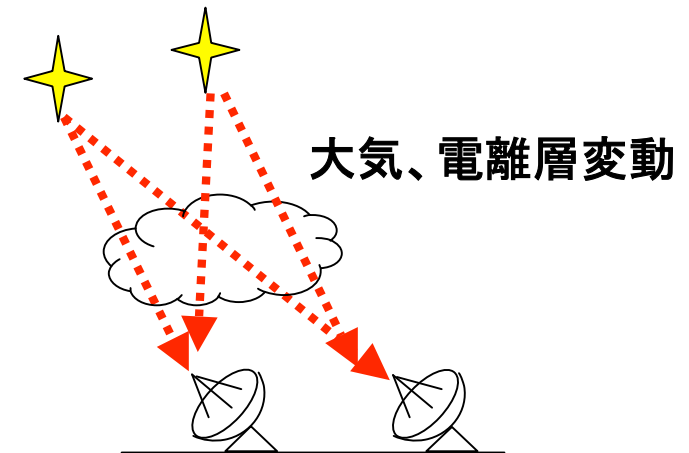


## 2 Beam VLBI 2つの電波源を同時に観測

VERA、電波天文学

遅延時間精度... **数ps**

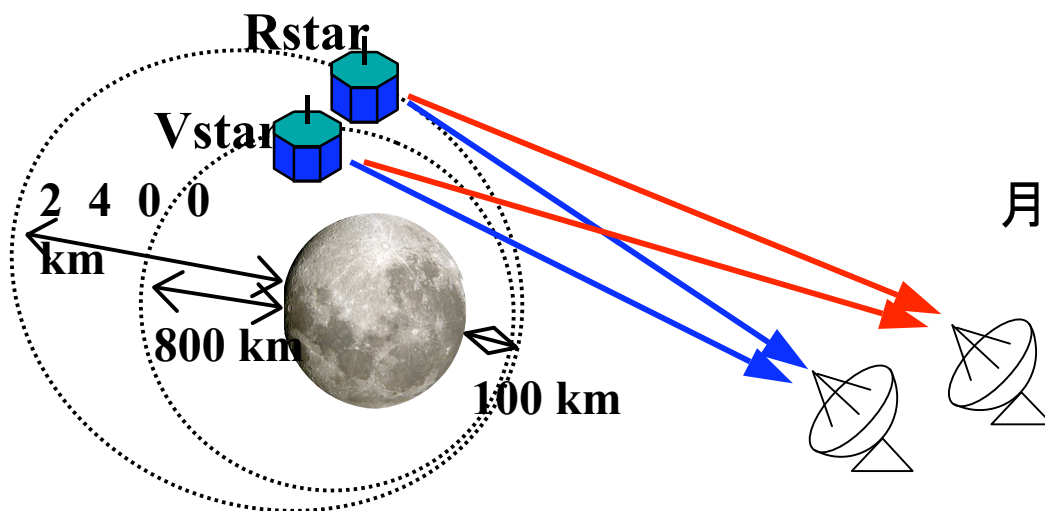
(位相誤差... 数度)



VERAの2beamシステムはSELENEの通信周波数(S/X帯)に非対応

⇒ 位相遅延推定のためには新たな代わる高精度VLBI観測法が必要

# 月探査計画SELENE(2007)への応用



## VRAD Mission

同一ビームVLBI観測による  
月周回2衛星の精密相対位置決定

⇒ 高精度重力場推定

### VERA20mアンテナ

### 月周回 2衛星の最大離角 0.9 度

X帯ビーム幅 0.1度 > 2衛星の離角 ~ S/X帯ともに同一ビームVLBI観測

S帯ビーム幅 0.37度 > 2衛星の離角 ~ S帯同一ビーム/X帯スイッチング観測

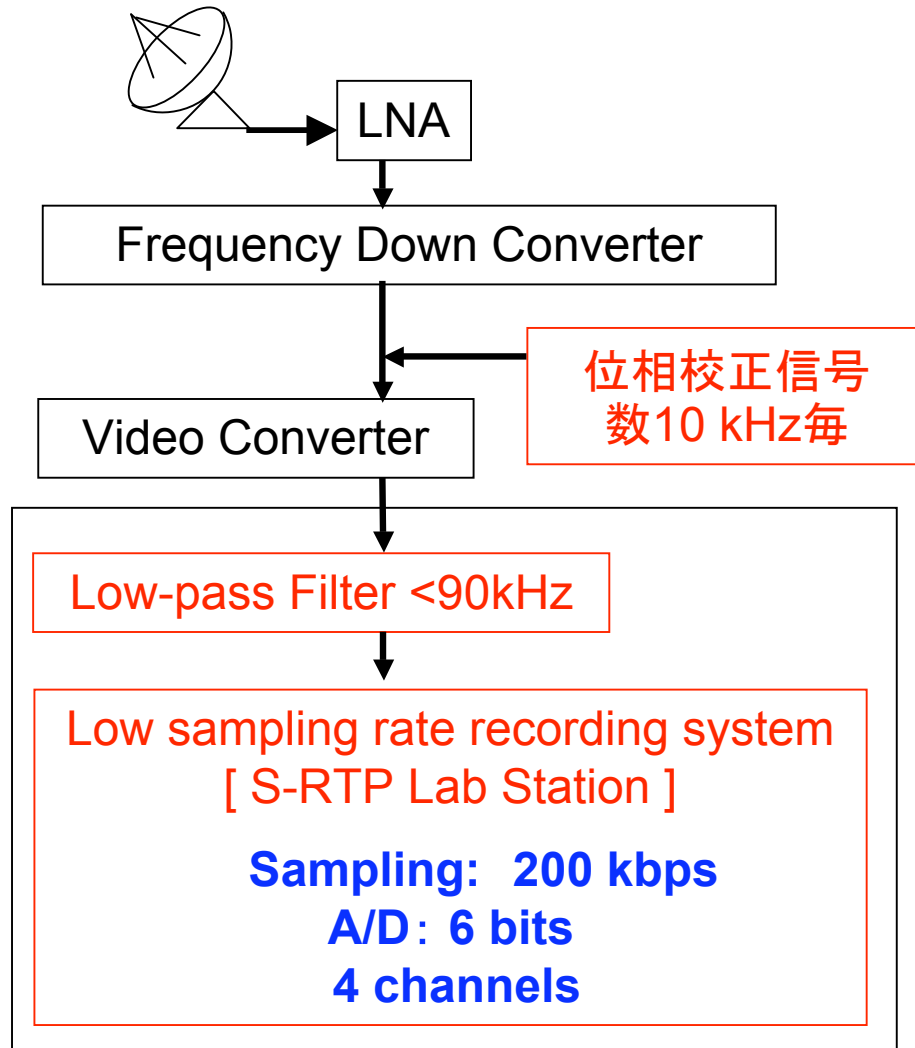
### SELENEにおける同一ビームVLBI観測頻度の見積もり

“2衛星を連続追尾できる期間”を一つのパスと定義

⇒ **90%のパス**で“**最低数分／最長1時間**”の同一ビーム観測が可能

パス中に**最低数分間**の同一ビーム観測 ⇒ パスすべてで位相遅延推定可能

# VRADシステム —狭帯域記録システム—



## 【特徴】 狭帯域記録: **100 kHz**

測地・電波天文の広帯域システムに比べ

⇒ 大幅なデータ量の削減

**1/20 以下 (例: 4Mbps ⇒ 200kbps)**

⇒ データ転送・処理解析時間の短縮

準実時間データ解析

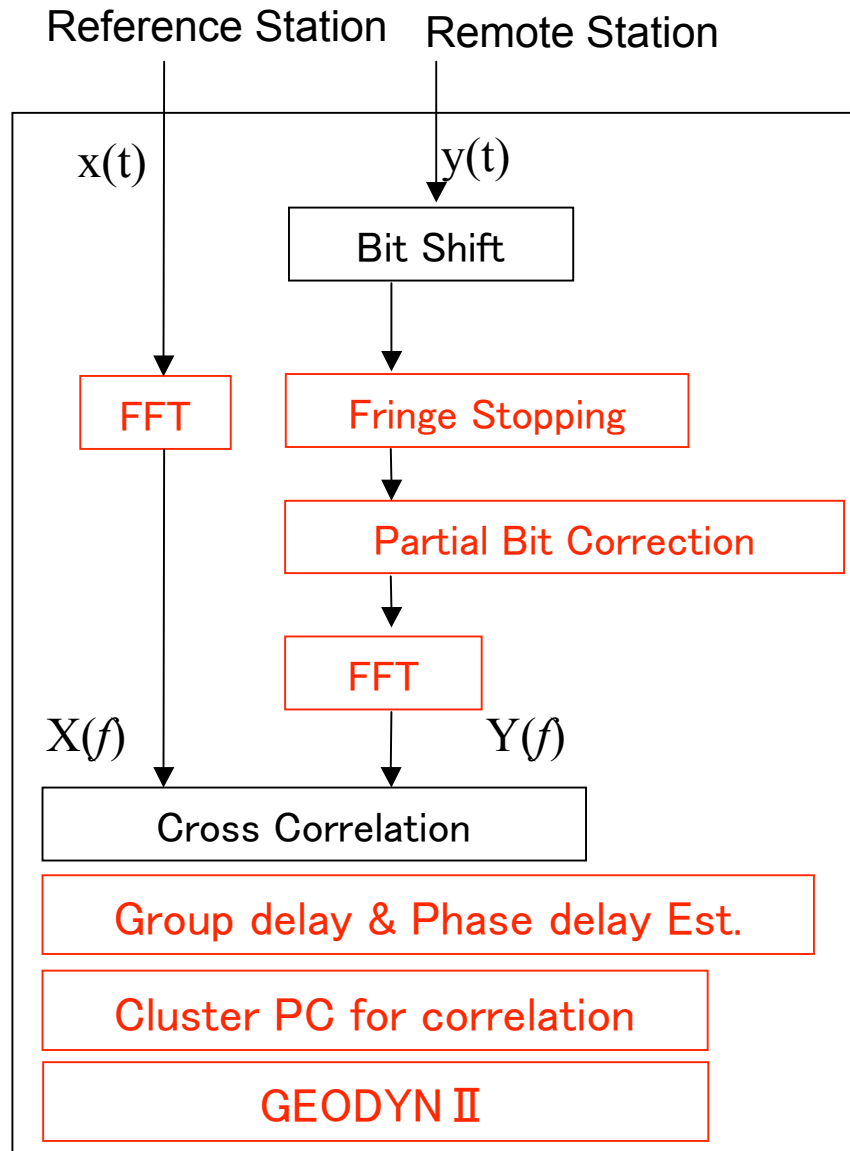
宇宙飛行体の追跡に必要不可欠

## 【旧システムからの変更点】

- IF-Pcalの作成
- LPFの仕様変更
- データ記録方式の変更  
(テープ記録 ⇒ HDD直接記録)

⇒ 狭帯域記録システムの完成

# VRADシステム — 相関処理ソフトウェアの開発 —



## 【特徴】

相関処理を汎用PCで実行可能

## 【旧システムからの変更点】

- ① ソフトウェアの**3倍以上の高速化**  
高速FFTツールの導入、処理の簡略化
- ② クラスタ型“相関処理用”計算機の

## 新規開発

⇒ VRAD計画で予定されている**1週間**分のデータ処理を**22時間以内**に完了

(2衛星、4局6基線、4チャンネル、24時間)

## VRADに有効なシステムを構築

# VLBI Observation of Lunar Orbiter Smart-1

- 背景および目的

9月3日に予定されている月周回衛星SMART-1の月面衝突前には近月点高度が100km以下となり、一部低高度軌道となる。この時期の軌道推定はSELENEの予行演習として有益である。観測の主目的は軌道推定である。SMART-1のデータのみによる重力場の推定は、データの質(頻繁な軌道制御)、量(短期間)の観点から困難であるが、SELENEやこれまでの月探査ミッションと併せた重力場の推定に有効なデータとなりうる。

- 概要

通信用のS帯信号にはトーン信号が付随せず、群遅延推定は不可能である。したがって、遅延時間変化率(アンビギュイティありの位相遅延)を観測量とする。また、衛星の軌道面がface-on, edge-onの場合の軌道推定を行い、異なる条件下での軌道推定精度の比較を行う。(約1週間で軌道面は90度回転、軌道面により観測量の感度が異なる)



# VLBI Observation of Lunar Orbiter Smart-1

## Signal of Smart-1

Case 1. 通信用のS帯信号 周波数 = 2235.1 MHz

Case 2. 通信用のS帯信号 + トーン信号

Case 3. キャリア + 4つのトーン信号 (X帯、KaTE\*)

(\* KaTEはSMART-1搭載のTT&C通信用機器。主搬送波の他に2MHzと16MHz離れたトーン信号があり、これらの信号を用いた群遅延推定が可能。

## Observation SCHEJULE

1. 2006/05/30 9:00 –13:30 [UT] Obs.time 4.5hours

Station : MIZUSAWA10m,OGASAWARA [VERA]

2. 2006/08/03 20:00 –24:00 [UT] Obs.time 4.0 hours [KaTE]

Station : MIZUSAWA10m,OGASAWARA [VERA]

3. 2006/08/04 00:00 –08:00 [UT] Obs.time 8.0 hours [KaTE]

Station : MIZUSAWA10m,OGASAWARA [VERA]

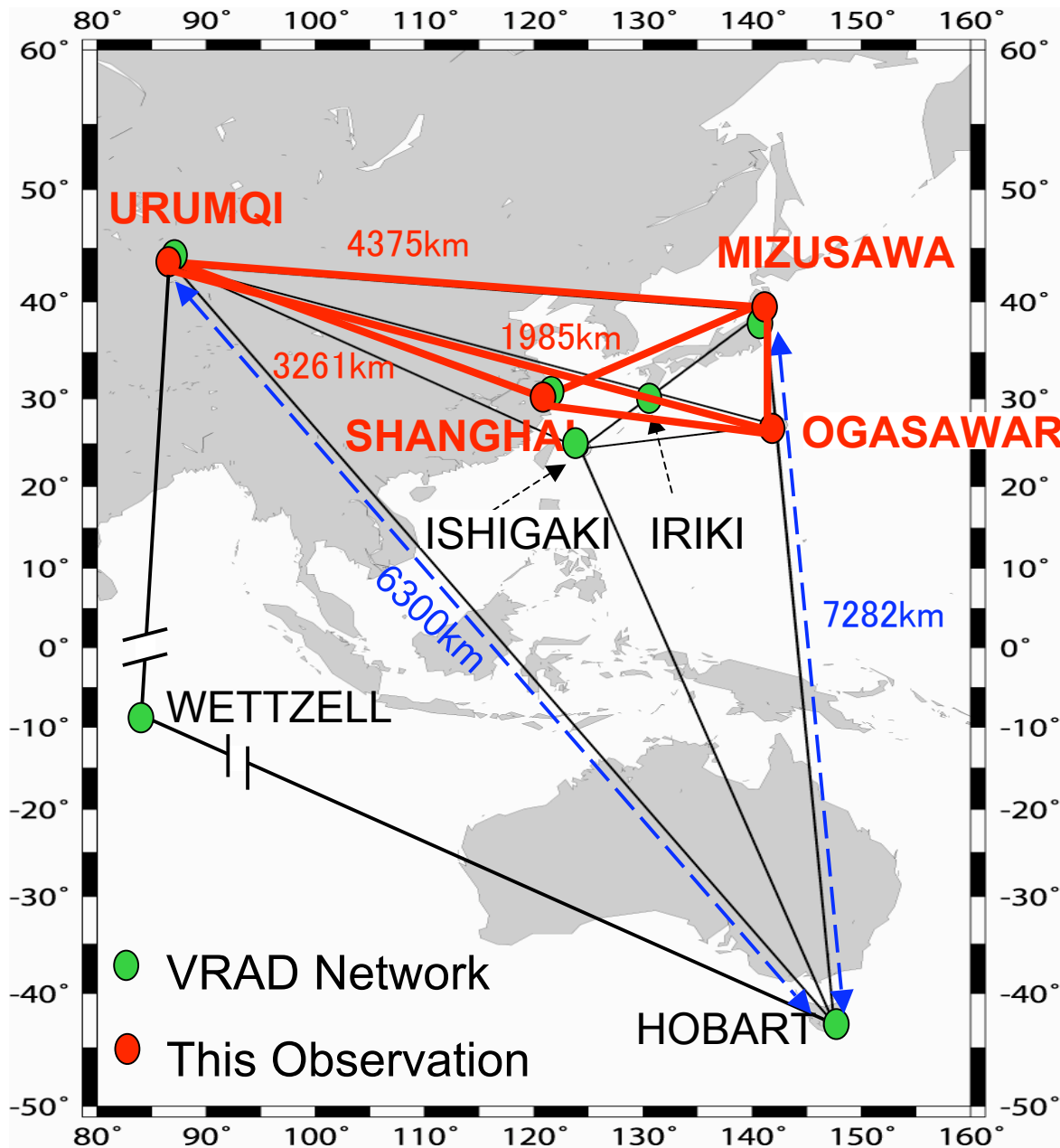
4. 2006/08/22 20:00 –24:00 [UT] Obs.time 4.0 hours [ Face-on ]

2006/08/23 00:00 –08:00 [UT] Obs.time 8.0 hours [ Face-on ]

Station : MIZUSAWA10m,OGASAWARA [VERA]

5. 2006/08/30 03:00 –12:00 [UT] Obs.time 9.0 hours [ Edge-on ]

Station : MIZUSAWA10m,OGASAWARA [VERA], URUMQI



**MIZUSAWA 10m**

**MIZUSAWA 20m (VERA)**

**OGASAWARA 20m (VERA)**

**SHANGHAI 25m**

**URUMQI 25m**

# Result of correlation

2006/05/30

## Received Frequency

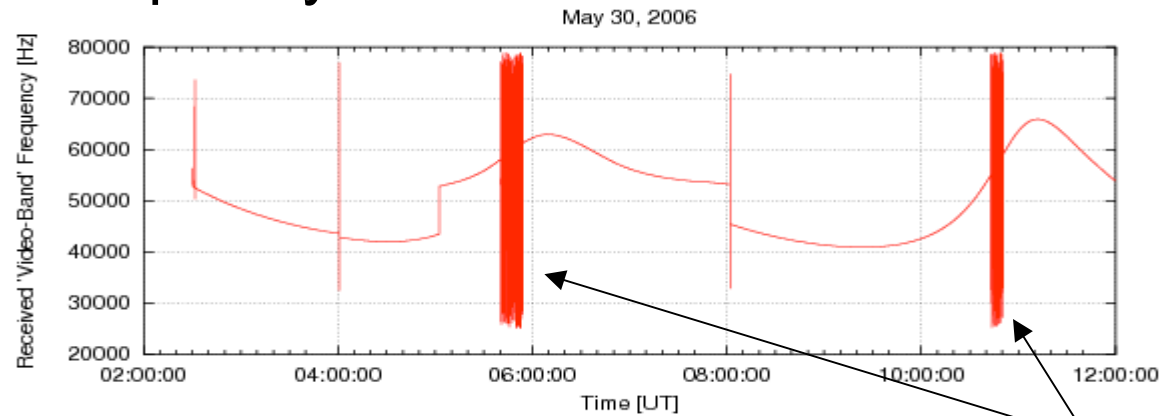


Fig. Local frequency is 2235.05 [MHz]

Lunar occultation

## Estimated phase delay

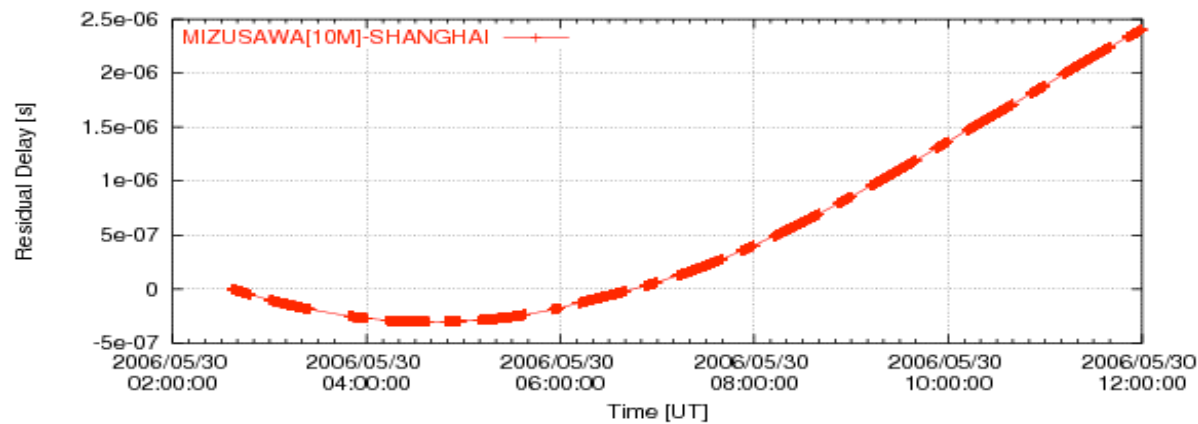


Fig. The phase delay with the ambiguity. ( $\tau = \Delta\phi / (2 * \pi * \text{freq\_RF})$ )

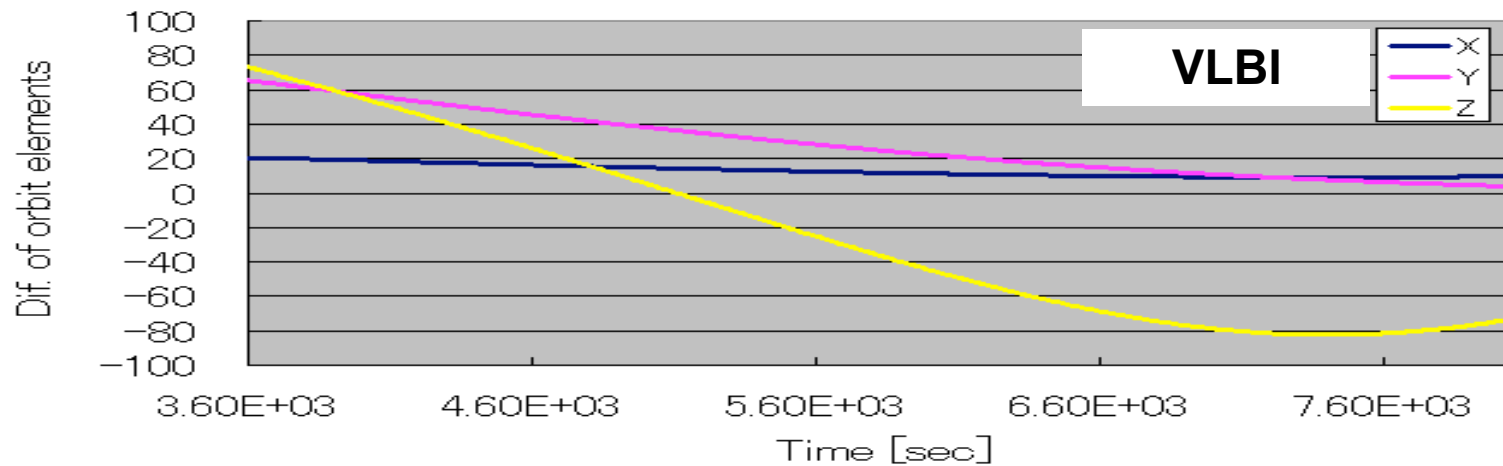
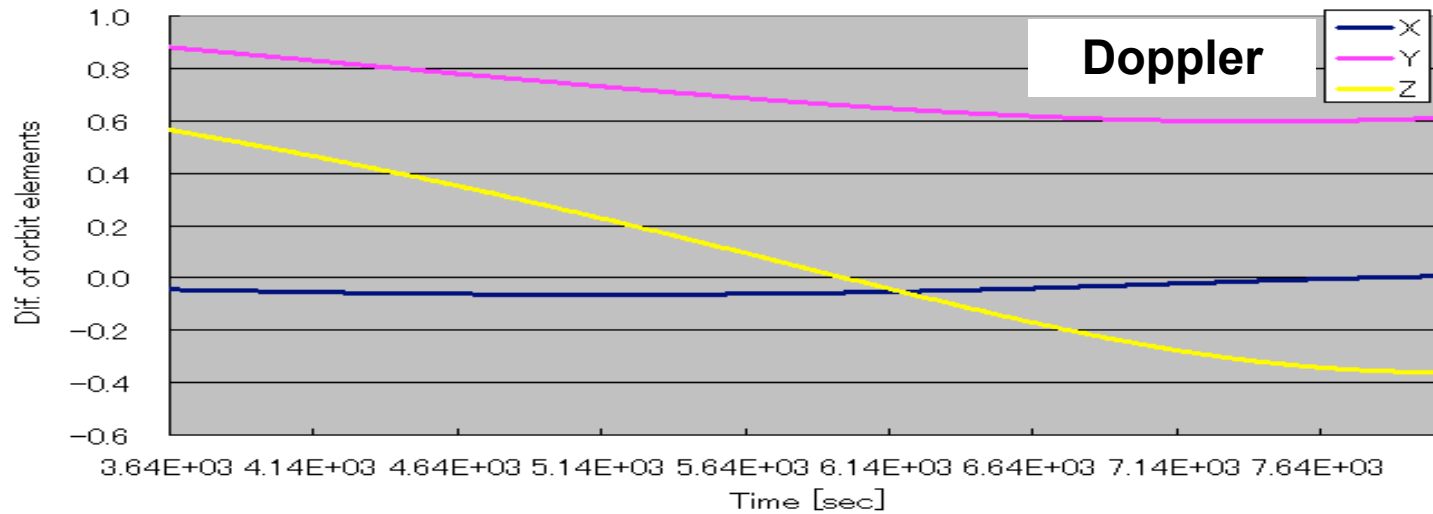
# Result of orbit determination by GEODYN II ①

The difference of the initial state vector when using VLBI data only and Doppler only.

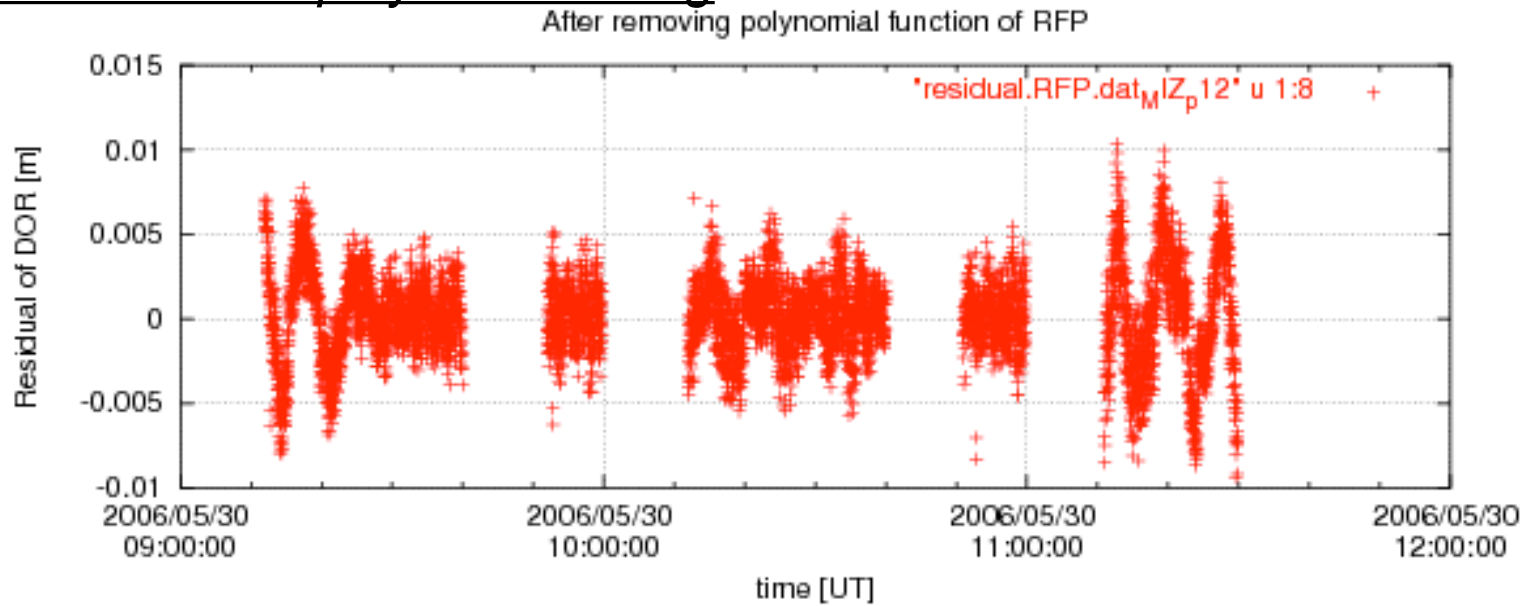
State adjustment	X [km]	Y [km]	Z [km]	Vx [m/s]	Vy [m/s]	Vz [m/s]
Doppler	-3.37	-0.99	-1.15	-0.12	-0.1	0.47
VLBI	6.68	32.68	48.09	-20.30	4.59	-13.17

# Result of orbit determination by GEODYN II ②

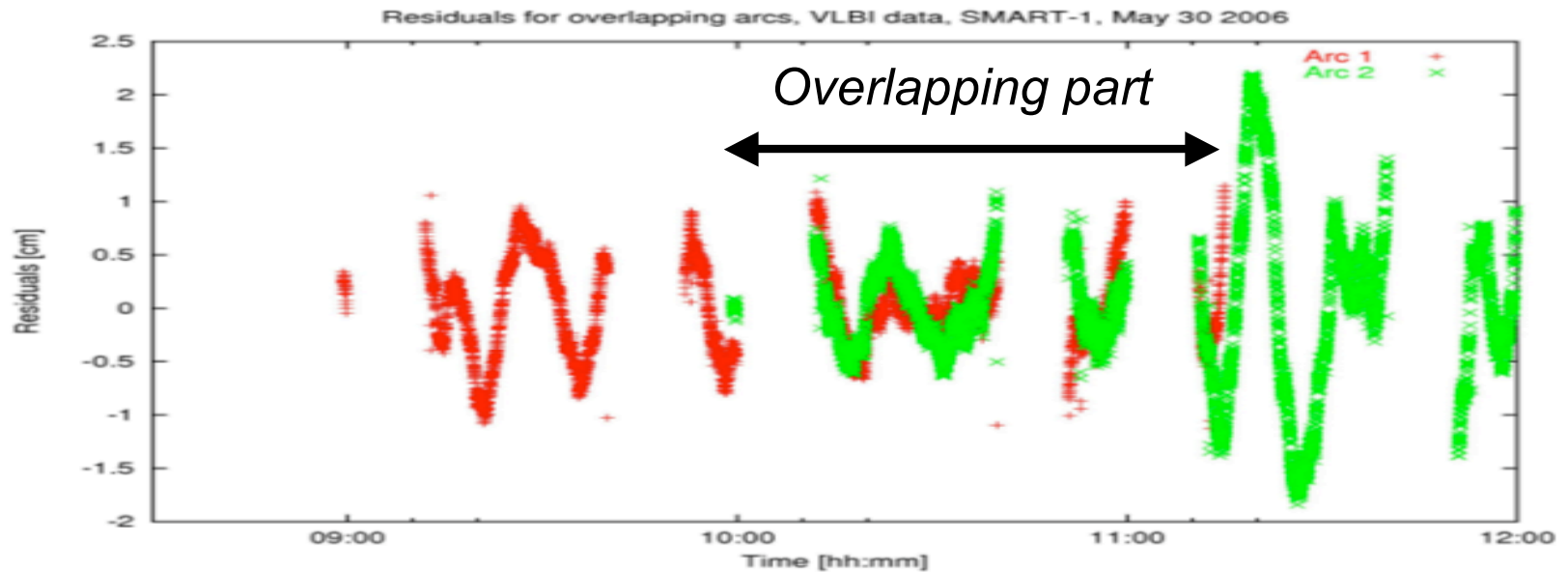
The orbit differences during the overlapping part.



## Residual of DOR after polynomial fitting



## Residual of DOR after orbit determination



# Received Frequency

2006/08/22

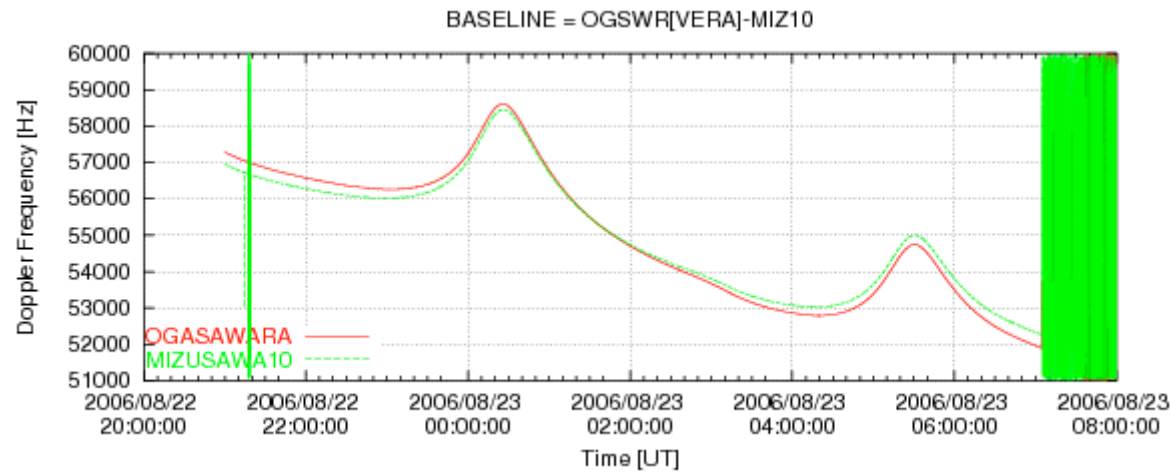


Fig. Local frequency is 2235.05 [MHz]

# Result of correlation

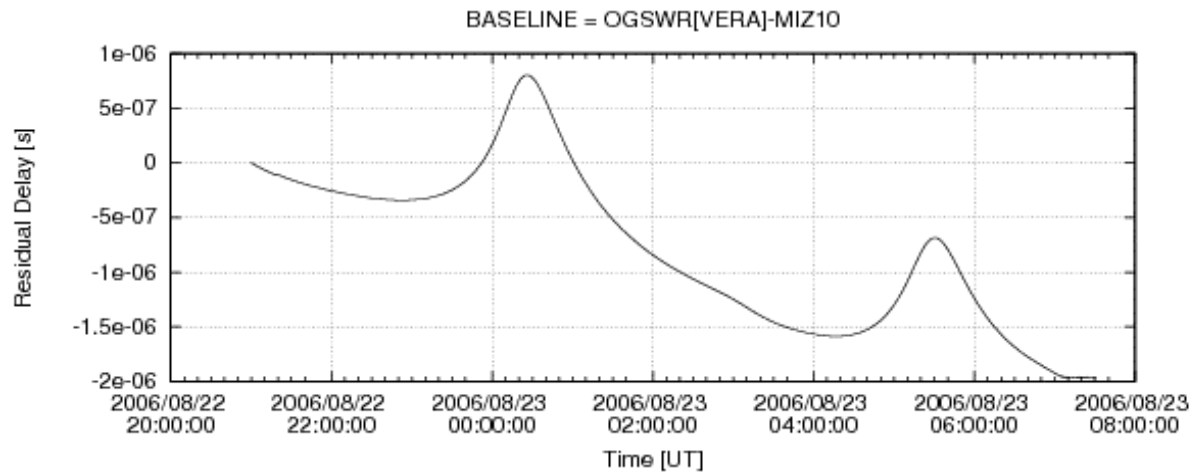


Fig. The phase delay with the ambiguity. ( $\tau = \Delta\phi / (2 * \pi * \text{freq\_RF})$ )



# Received Frequency

2006/08/30A

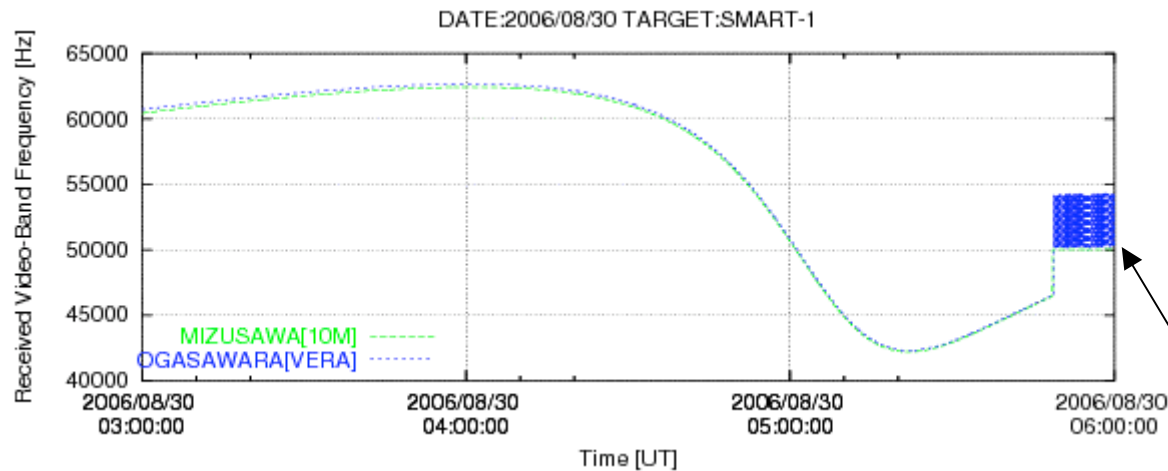


Fig. Local frequency is 2235.05 [MHz] Lunar occultation

# Result of correlation

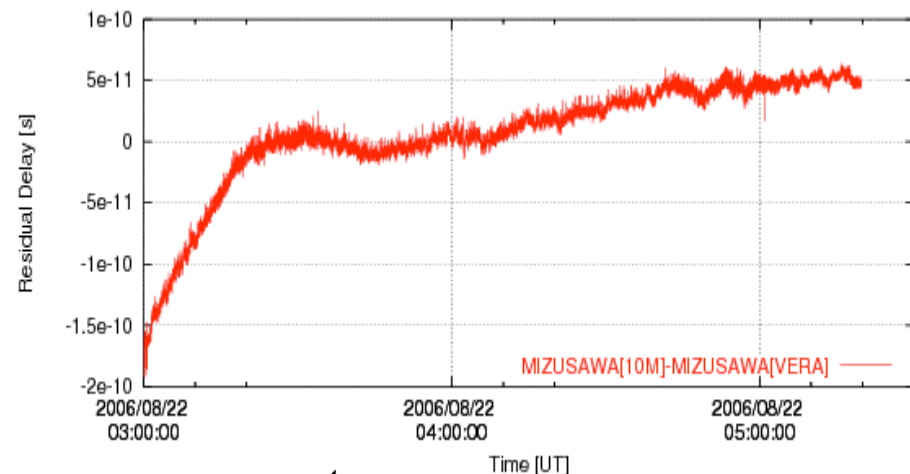
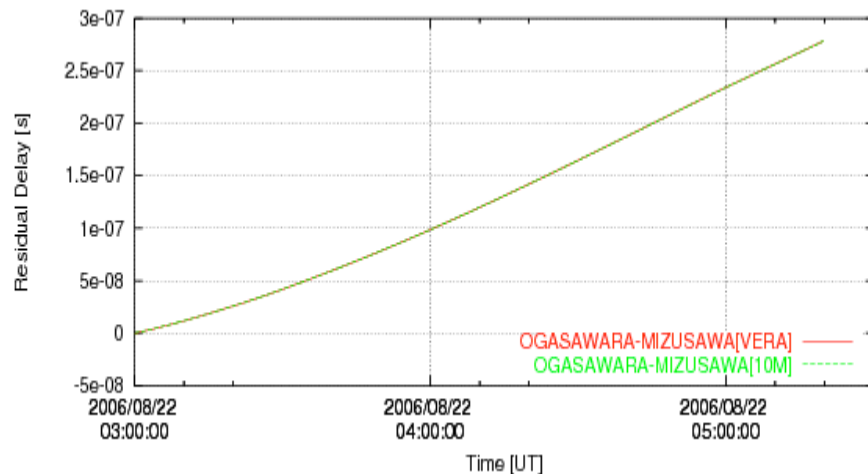
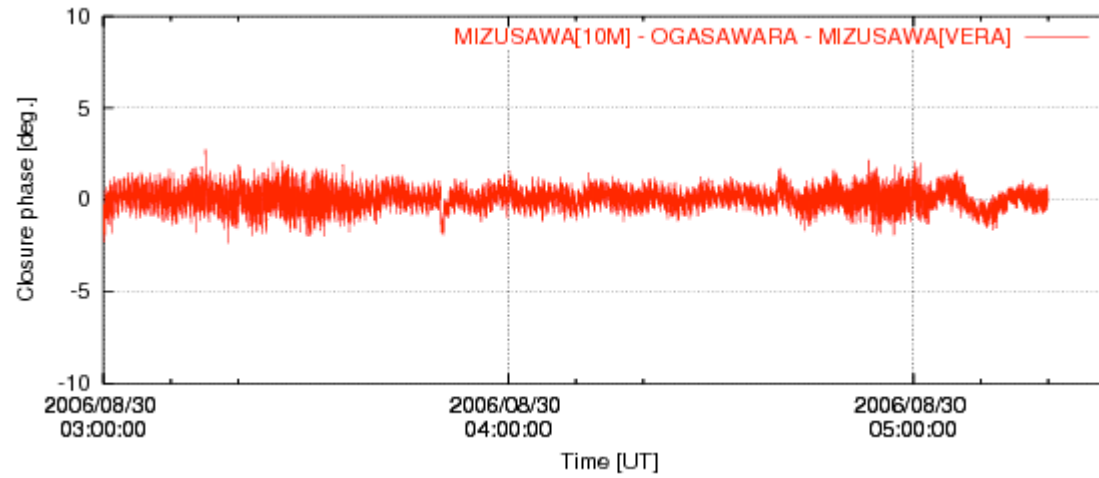


Fig. The phase delay with the ambiguity. ( $\tau = \Delta\phi / (2 * \pi * \text{freq\_RF})$ )

2006/08/30A

## Closure phase



# Received Frequency

2006/08/30B

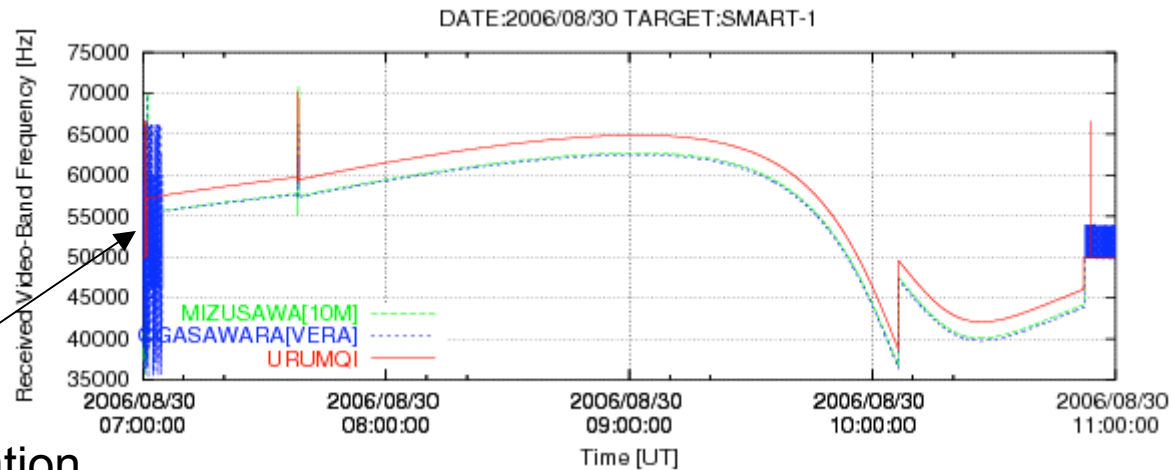


Fig. Local frequency is 2235.05 [MHz]

# Result of correlation

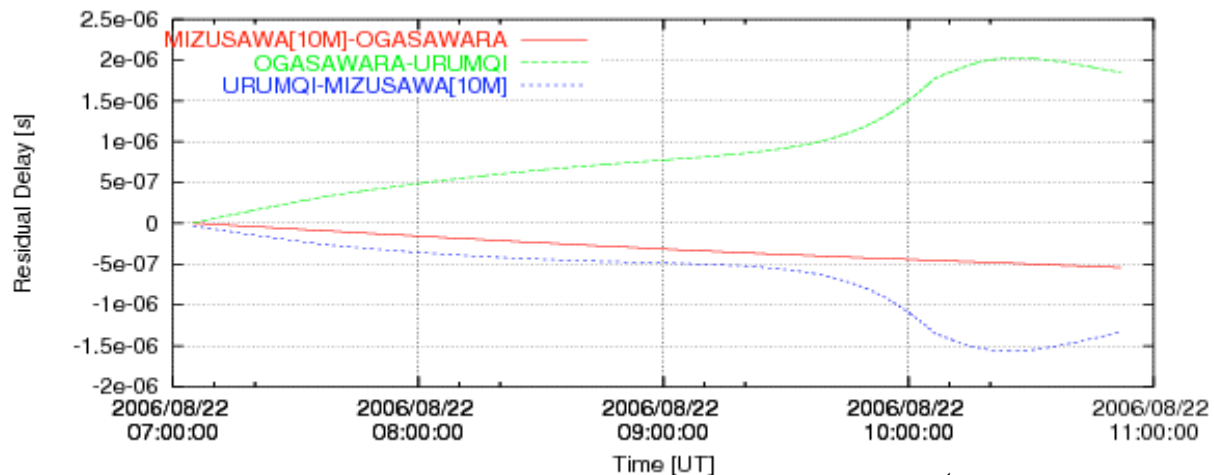
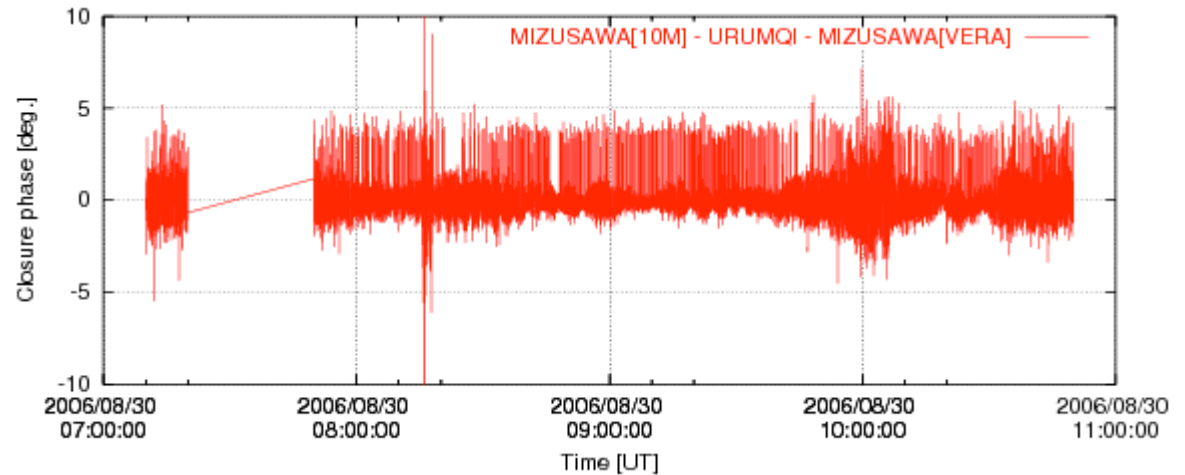
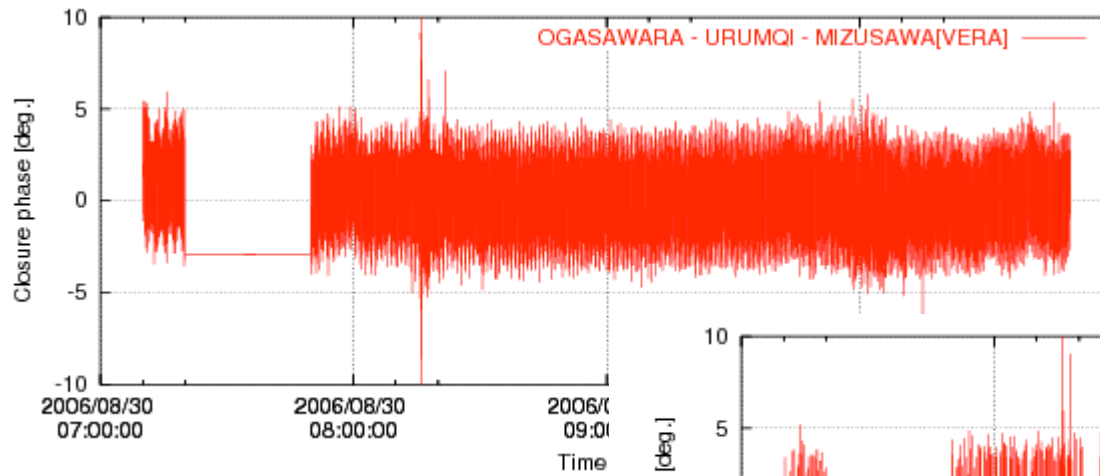
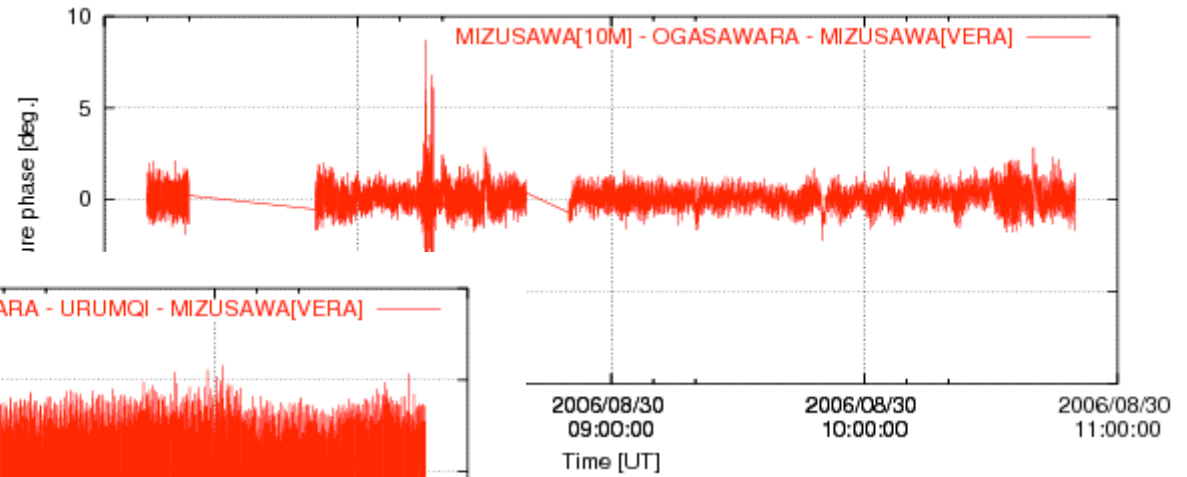
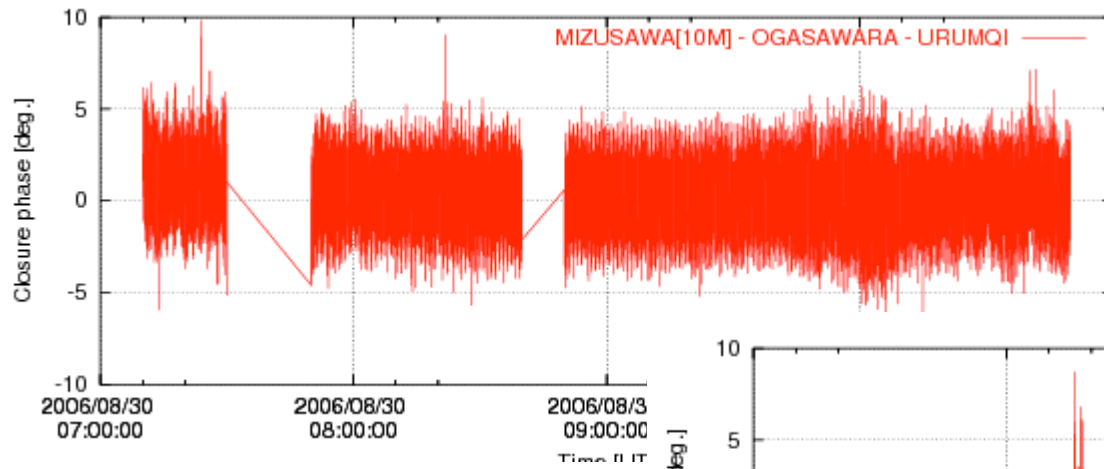


Fig. The phase delay with the ambiguity. ( $\tau = \Delta\phi / (2 * \pi * \text{freq\_RF})$ )

2006/08/30B

Closure phase



## まとめ

- 5/30, 8/3, 8/4, 8/22, 8/23, 8/30のデータ正常記録時の相関処理にすべて成功。特に8/22, 8/23のFace-on時、10時間以上FRINGE位相を連続検出
  - 5/30観測分の軌道推定
    - Residualは1cm以下であり、位相誤差とほぼ同様
    - VLBIを観測量とした場合、ドップラを観測量とした場合に比べて
      - ・ オーバーラップ部分の位置差が大きい
      - ・ 軌道推定前後での初期軌道要素の差が大きい
- 原因① 5/30は1基線のみでのVLBI観測
- 原因② 観測量はアンビギュイティありの位相遅延

## 今後

- クロックオフセット、局内遅延の推定(QSOの相関処理)
- 8/3, 8/4, 8/22, 8/30の軌道推定
- Face-on, Edge-onの場合の軌道推定精度の比較