

# 狭帯域VLBI記録システムを用いた 宇宙飛翔体の位置決定手法

菊池 冬彦

総合研究大学院大学(国立天文台RISE) D2

[\(fuyuhiko@miz.nao.ac.jp\)](mailto:fuyuhiko@miz.nao.ac.jp)

# 1. 狭帯域VLBI記録システム

- 数MHz ~ 数GHzの広帯域信号を記録する測地VLBIや電波天文とは異なり、宇宙飛翔体のVLBI観測では狭帯域の搬送波信号を用いることが多い。

## 狭帯域記録

データ量の削減、一般回線での高速転送、解析時間の短縮

- 最適な記録帯域は？  
衛星の視線速度変化による受信周波数の変化を考慮しなくてはならない

表1から $V_{\text{star}}/R_{\text{star}}$  SELENEの場合、68.9kHz以上の帯域が必要。

表1. ドップラーによる受信周波数変動 (Kono et al., 2003)

$V_{\text{star}}/SELENE$ の場合	地球回転	月の公転	衛星軌道	最大
視線方向速度	380m/s	56m/s	2km/s	
ドップラー周波数 (S帯)	2.8kHz	0.4kHz	14.8kHz	18kHz
ドップラー周波数 (X帯)	10.7kHz	1.6kHz	56.6kHz	68.9kHz

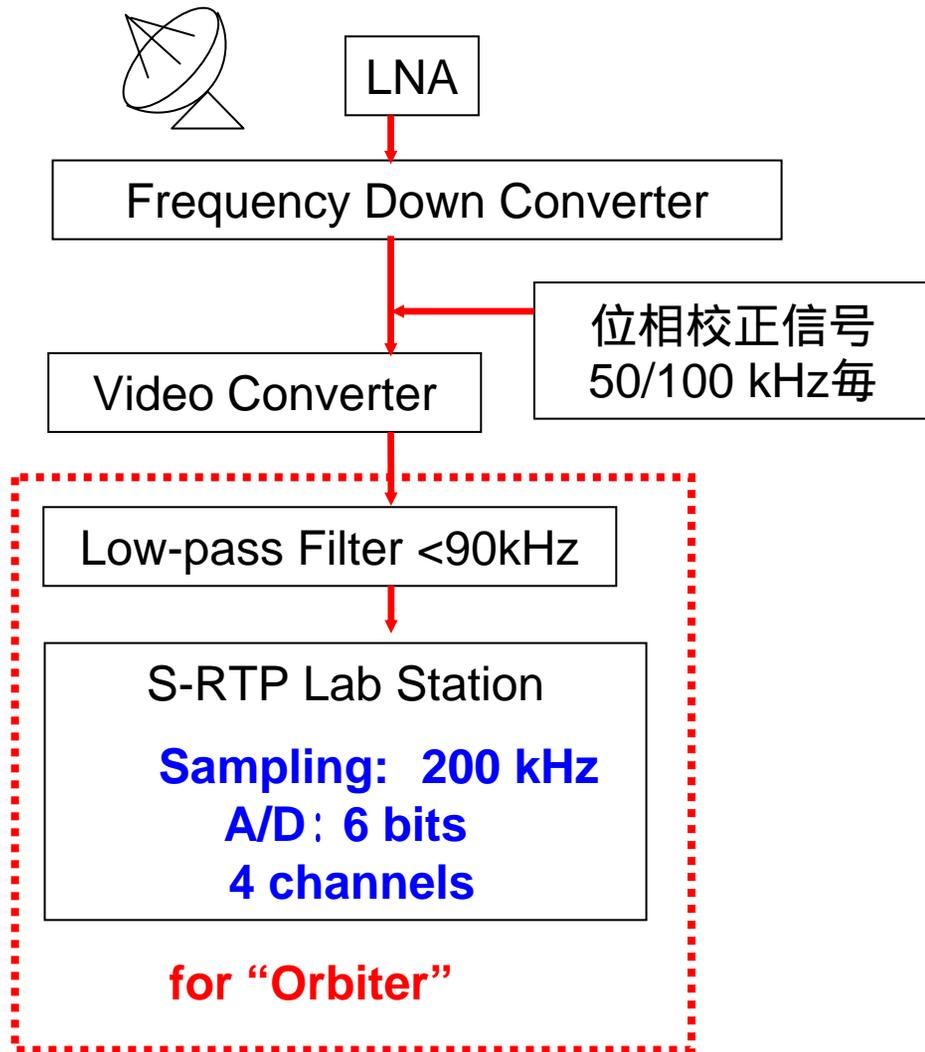
# S-RTP Lab Station



S-RTP Lab Station

REF信号 : 1pps、10MHz  
OS: Fedora Core

外付けHD  
(500GB)



# S-RTP Lab Station 操作画面

## Manual Mode

Schedule Manual

Parameter settings

Station name: VERAMIZ

Session directory: /data/

Max block length: 30 minutes

Measuring duration: 0 hours 30 minutes

Sampling frequency: 200 kHz

AD conv. resolution: 6 bits 12 bits

Clock input: External Internal

Input level: CH1: 5V 1V CH2: 5V 1V CH3: 5V 1V  
CH4: 5V 1V CH5 (1pps clock): 5V 1V

Comment:

ADTOOL v2.0

Date: 2004.02.15 Time: 06:10:09 UTC Adjust clock NTP Close

Schedule Manual

Schedule file: [ ] Reload

スケジュールの詳細表示・・・

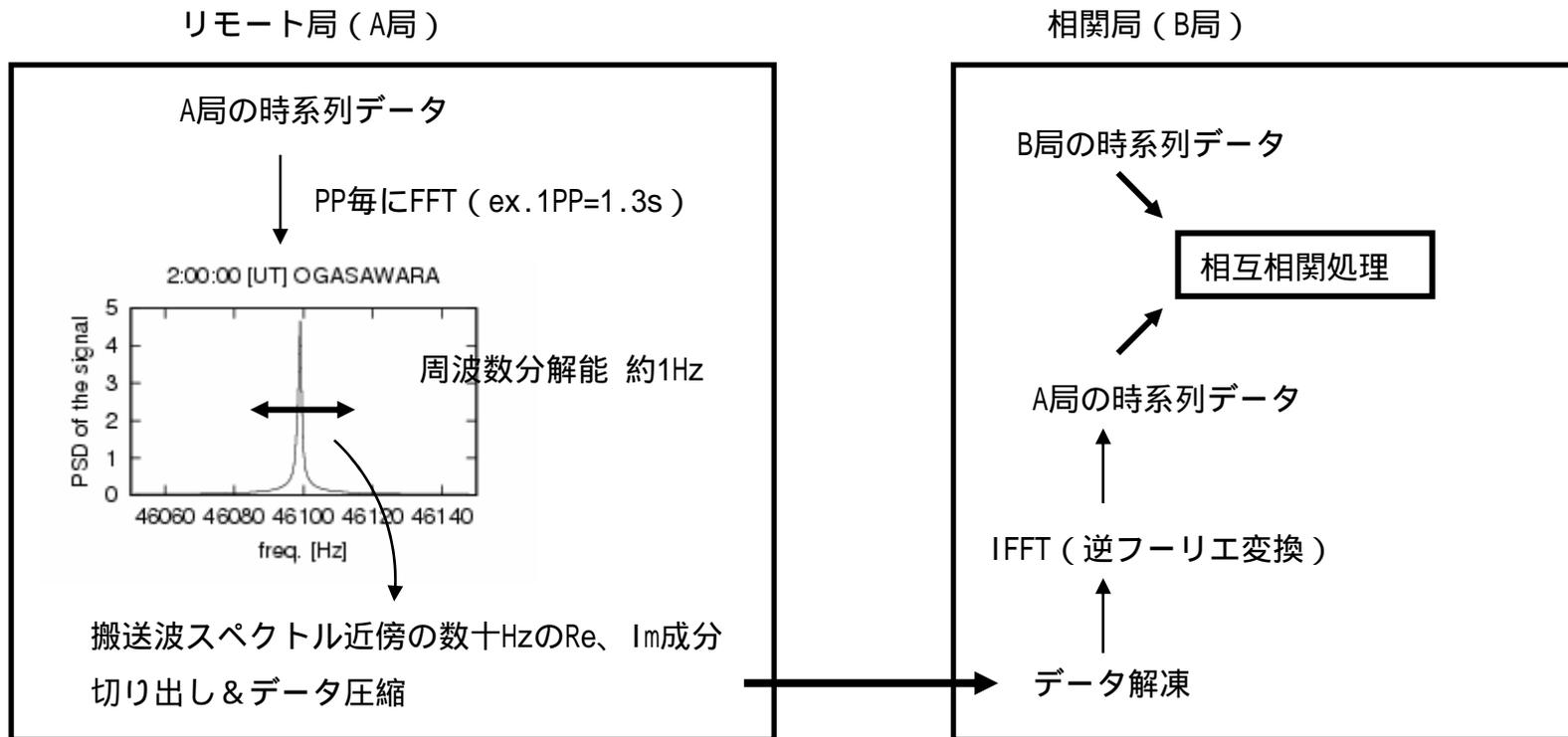
Comment: [ ]

Start log [ START ]

Current status: The command is placed in the wait state

## Schedule Mode

# データ転送



一般のInternet 回線で転送

45 Mbps(ADSL), 56kbps(電話回線: 上海-水沢間テスト ~ 平均10kbps)

1秒間のデータ量

生データ  $200000 \times 4\text{Byte}(\text{int型}) = 800\text{kByte}$

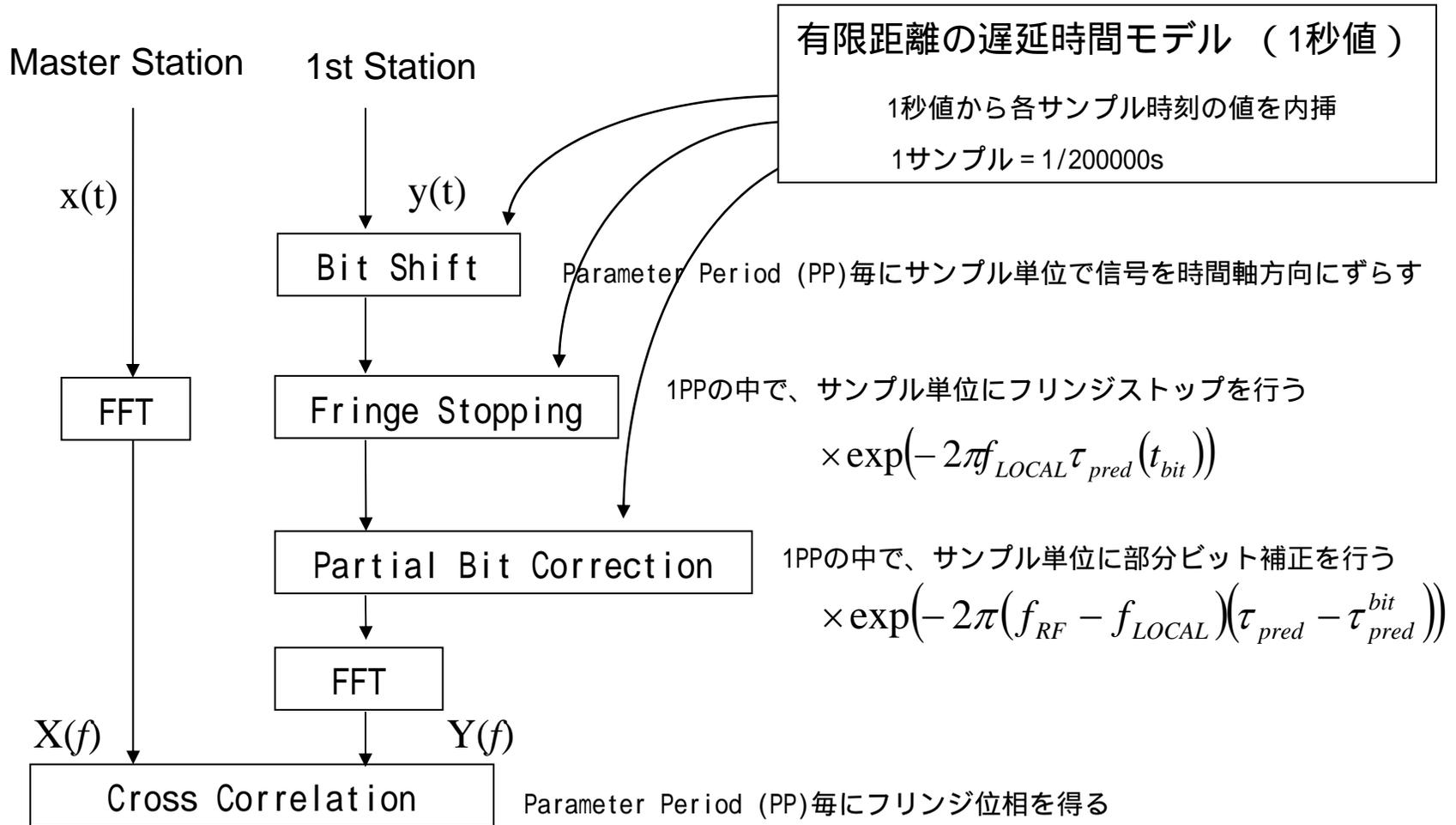
新方式  $100 \times 2 \times 8\text{Byte}(\text{double型}) = 1.6\text{kByte}$       500分の1  
 (搬送波50Hz, Pca150Hz切り出し、周波数分解能1Hz)

4ch、1hour = 23MByte      ZIP圧縮 (約1/3) = 8.4MByte

転送速度 10kbps      840\*8秒      112分で転送

10Mbps      0.84\*8秒      6.7秒で転送

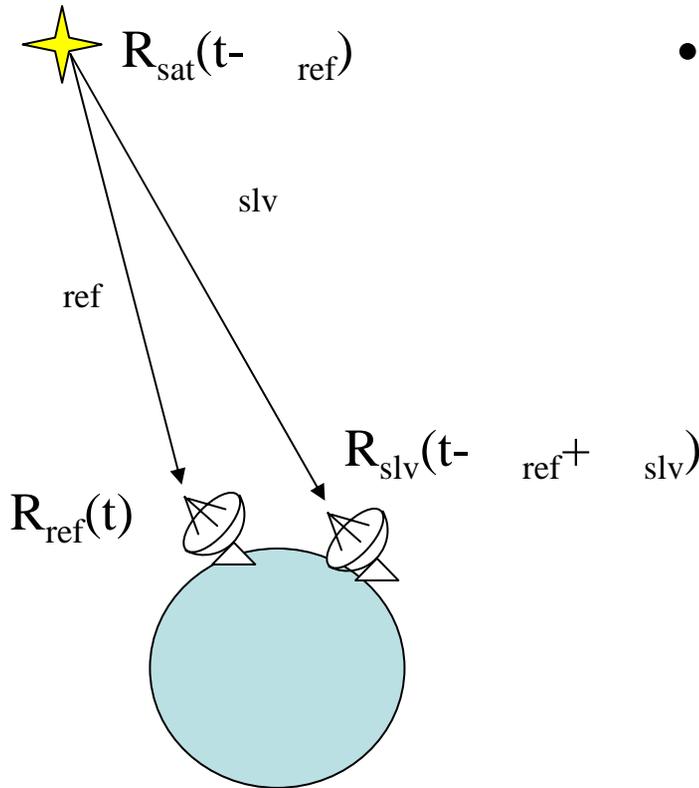
## 2. ソフトウェア関連処理



$$C_{xy}(f) = X(f)Y^*(f)$$

# Correlation Software [FX type]

## 有限距離遅延時間モデル



- 有限距離の遅延時間モデル  
地上局 衛星間距離を光差方程式を解くことにより求める

### 衛星 Ref局間の伝播時間

$$\tau_{\text{ref}}(t) = \frac{|\mathbf{R}_{\text{sc}}(t - \tau_{\text{ref}}(t)) - \mathbf{R}_{\text{ref}}(t)|}{c} + \delta$$

### 衛星 Slv局間の伝播時間

$$\tau_{\text{slv}}(t) = \frac{|\mathbf{R}_{\text{sc}}(t - \tau_{\text{ref}}(t)) - \mathbf{R}_{\text{slv}}(t - \tau_{\text{ref}}(t) + \tau_{\text{slv}}(t))|}{c} + \delta$$

### 伝播時間差 ( g ) 遅延時間予測値

$$\tau_g(t) = \tau_{\text{slv}}(t) - \tau_{\text{ref}}(t)$$

# 3. 遅延時間推定法

- 群遅延 group delay

精度：周波数帯域に反比例

Ex. 周波数帯域  $B=100\text{MHz}$  (S帯)、 $\text{SNR}=10$  推定精度 $551\text{ps}$

これまでは群遅延

月、惑星の重力場推定には不十分

- 位相遅延 phase delay

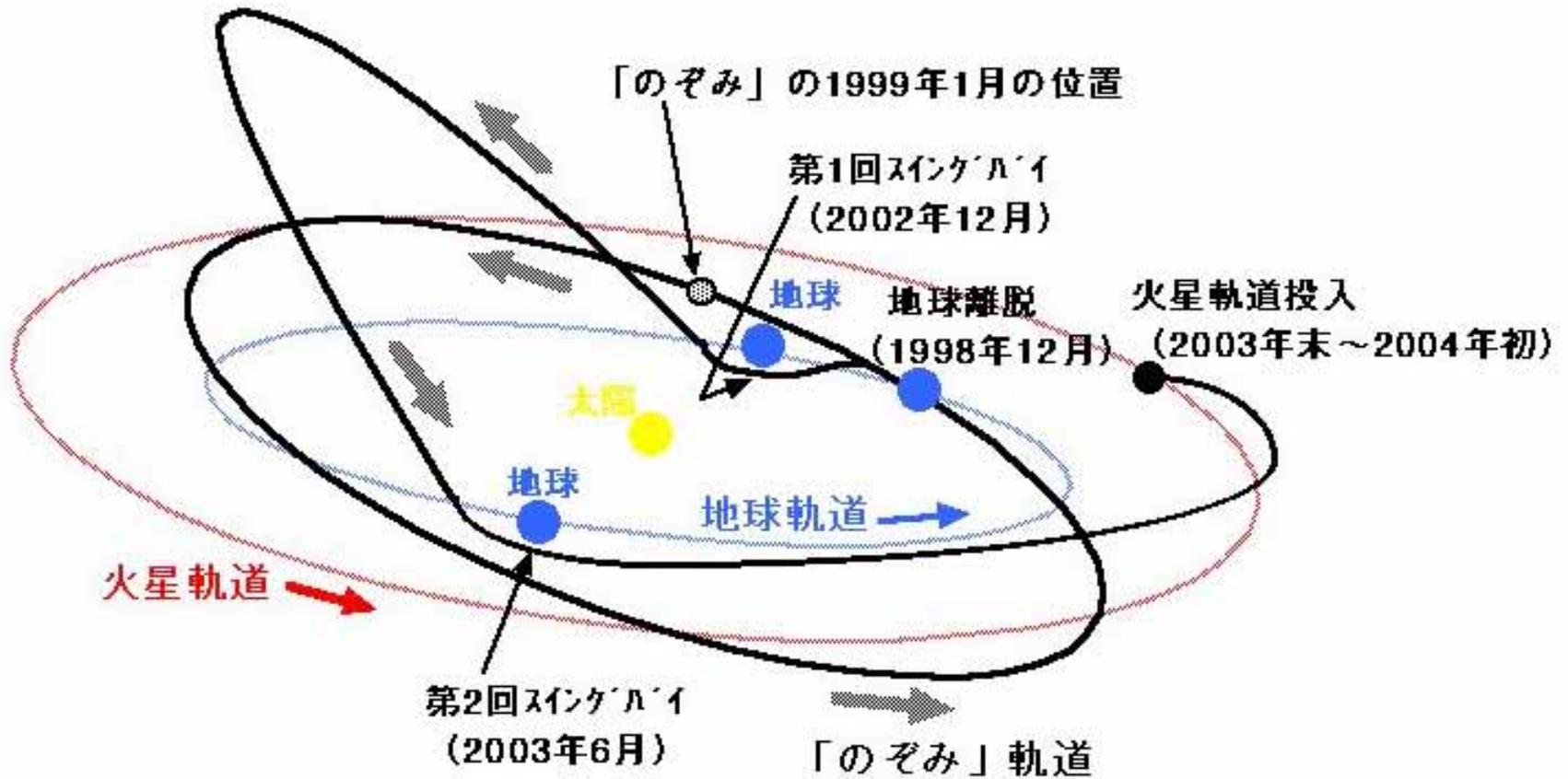
精度：周波数に反比例

Ex. 周波数  $f = 2\text{GHz}$ 、 $\text{SNR}=10$  推定精度 $8\text{ps}$

これからは位相遅延

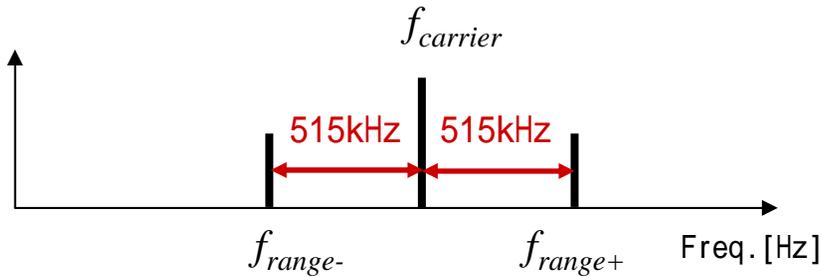
多周波数VLBI法 (MFV) を利用 & 応用

### 3.1 . 群遅延解析 - 火星探査機NOZOMI -



# 3.1 . 群遅延解析 - 火星探査機NOZOMI -

メインキャリアと2つのレンジトーンを使った群遅延解析

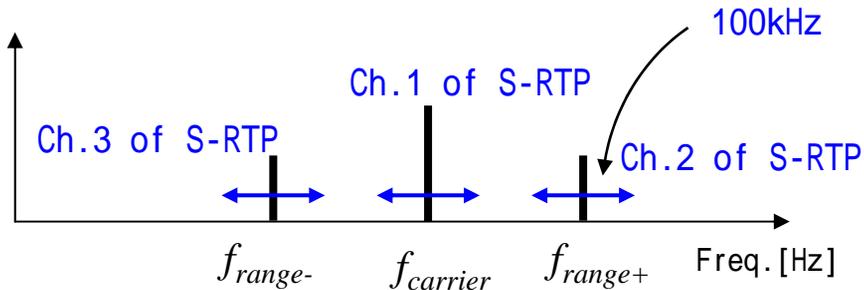


周波数

メインキャリア :  $f_{carrier} = 8411\text{MHz}$

レンジトーン+ :  $f_{range+} = 8411\text{MHz} + 515\text{kHz}$

レンジトーン- :  $f_{range-} = 8411\text{MHz} - 515\text{kHz}$



メインキャリアと2つのレンジトーンをS-RTPを用いて3つのチャンネルで記録.

# 相関処理結果 2003.5.27 白田-鹿島基線

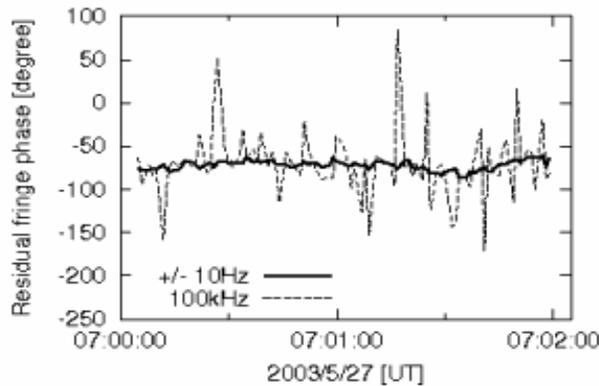


図 . メインキャリアのフリンジ位相。

記録帯域100kHzすべて使った場合と  
キャリア周波数近傍 $\pm 10\text{Hz}$ のみ使った場合。

100秒間での位相誤差は38度 5度に減少

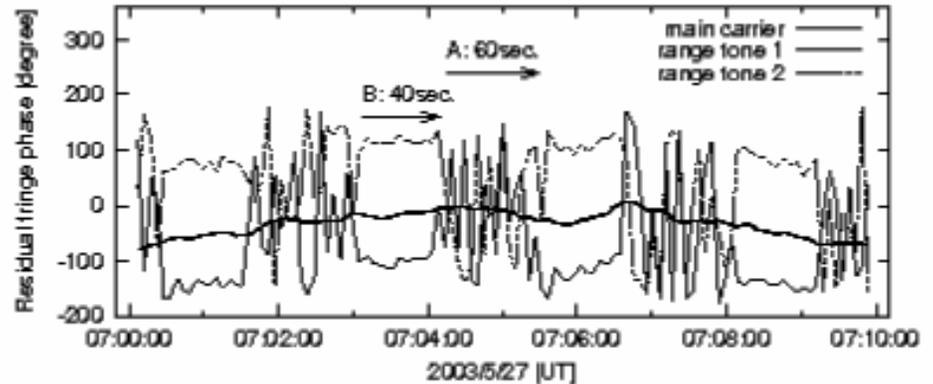
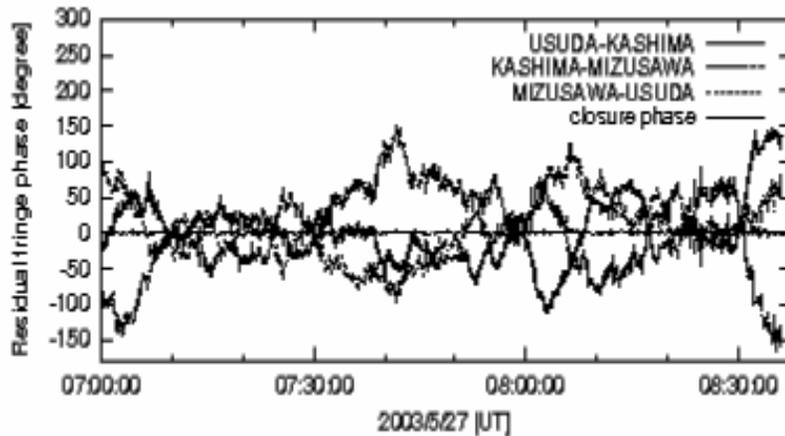


図 . メインキャリアとレンジトーンのフリンジ位相。

レンジトーンについては、 $C/N_0$ が非常に小さいため、  
図中Bの期間のみフリンジ位相を検出

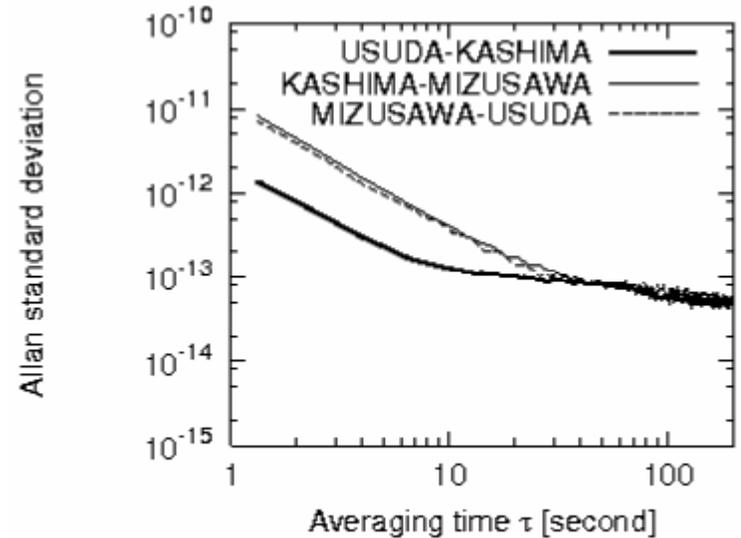
Bの期間（100秒毎に40秒間ずつ）について  
群遅延解析を行った

# 相関処理結果 2003.5.27 臼田-鹿島基線



図．各基線のメインキャリアのフリンジ位相とclosure位相。

closure位相の位相誤差 = 1.72度 (5.2秒積分)  
各基線での大気変動が得られた。

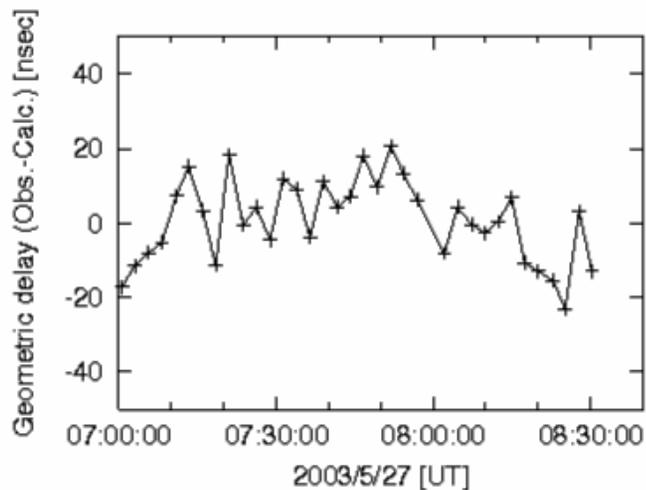


図．各基線のメインキャリアのアラン標準偏差

各基線でのASD値の比は地上局パラメータ(システム雑音温度、アンテナ半径等)から予想される値とだいたい一致している。

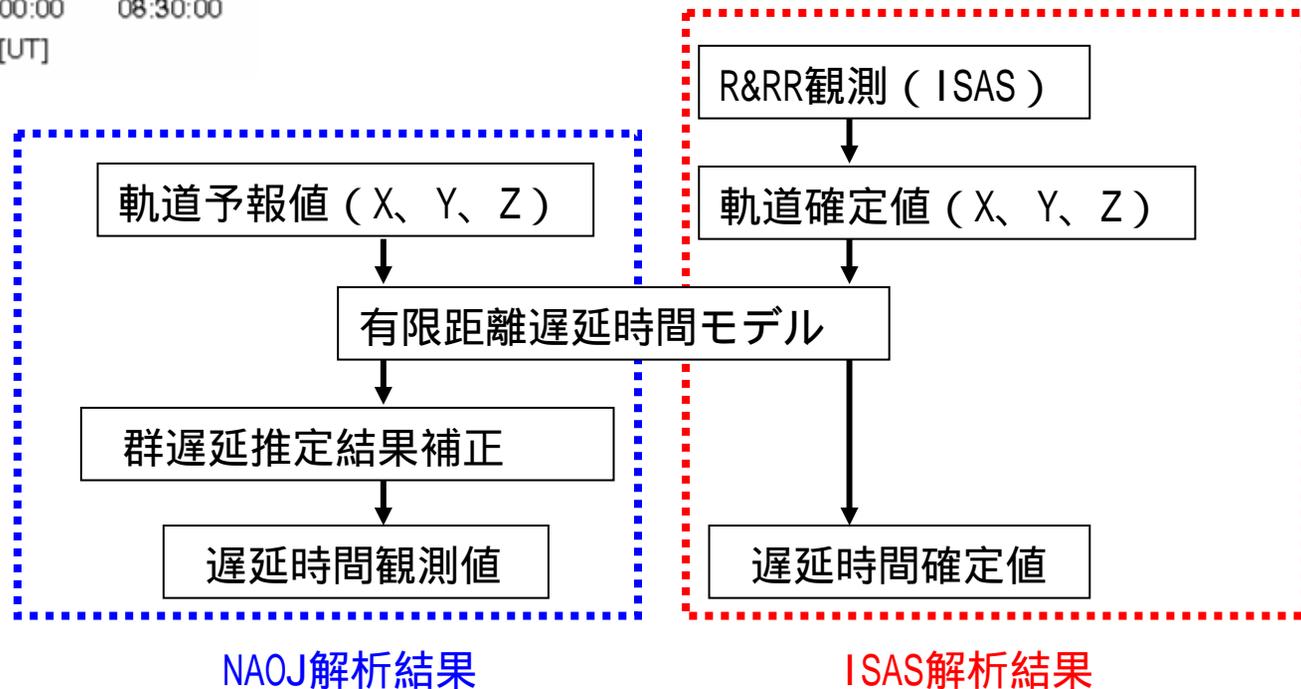
大気の影響は約 $10^{-13}$ . Clear dayに対応する。

# 群遅延推定結果 2003.5.27 臼田-鹿島基線



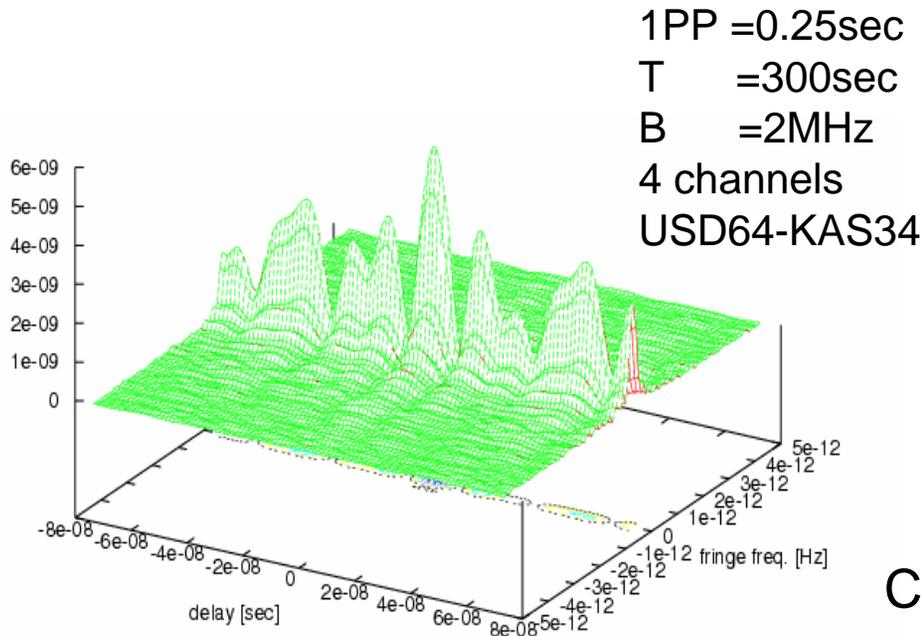
チャンネル間位相差をIF-Pcalを用いて補正  
CLOCKおよびCLOCK RATEをQSO観測により補正  
群遅延解析

図．群遅延解析による遅延時間と  
R&RR観測による遅延時間の差 平均 2 ns，標準偏差13ns



# 相関処理 / 群遅延推定結果 (QSO)

-ソフトウェア相関-



Local Frequency

1ch: 8409.99MHz

2ch: 8419.99MHz

3ch: 8459.99MHz

4ch: 8479.99MHz

Clock offset =  $7.63e-7$

Clock rate =  $1.3e-13$

Detected fringe of 1849+670

## 3.2 . 位相遅延推定 - 多周波数VLBI法 -

位相遅延を求めることは、フリンジ位相の2 の不確定性Nを解くということ

相関処理の結果得られるフリンジ位相 に対して真のフリンジ位相 真は次式で表される。

$$\text{真} = \text{フリンジ位相} + 2 N$$

ここでNがアンビギュイティである。アンビギュイティが解ければ、位相遅延 位相が求まる。

$$\text{位相} = \text{真} / (2 f)$$

例えば、位相誤差10度でS帯信号 (f=2212MHz) の位相遅延を解くことができれば、その精度は

$$\text{位相} = 10 / (2 f) = 10 / (360 \times 2212 \times 10^6) = 12.5 \text{ps}$$

ただし、大気遅延、電離層遅延、局内遅延、クロックオフセットを12.5ps以下で求めておく  
必要があり、そのためには相対VLBI観測が必至である。

位相遅延を解く方法のひとつ 多周波数VLBI法 (MFV : Multi-Frequency-VLBI , Kono et al., 2003)

MFVでは複数の搬送波を用いていくつかの群遅延を解き、その結果を用いて位相遅延を推定する。

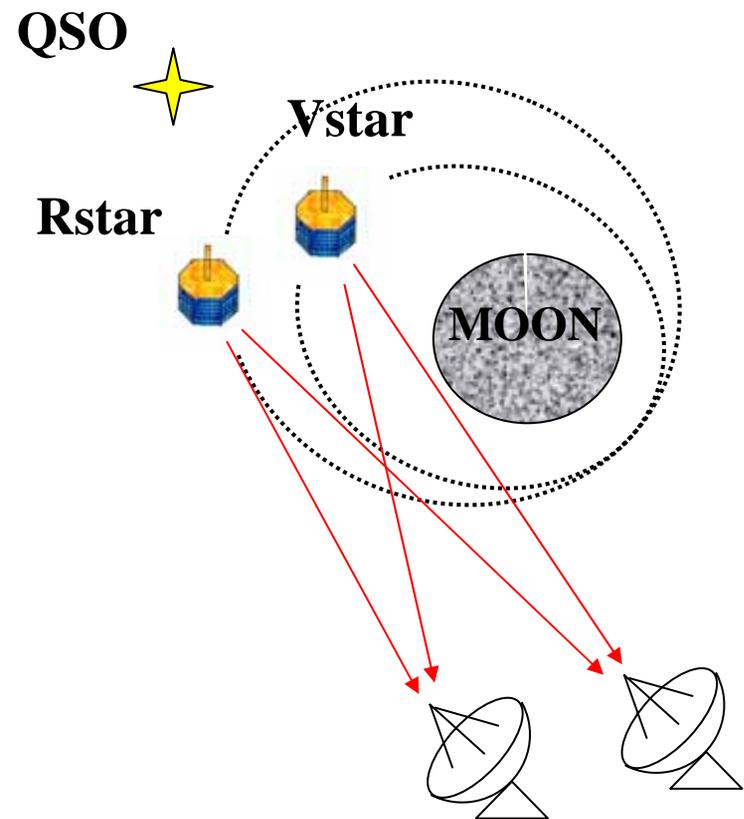
例) 信号1 : 周波数 f、 信号2 : 周波数 f+ f1、 信号3 : 周波数 f+ f2

short lane group delay 信号1、信号2の間で群遅延を解く。

wide lane group delay の結果を用いて信号1、信号3の間で群遅延を解く。

phase delay の結果を用いて信号1の位相遅延を解く。

# SELENE/VRADの場合



2機の小型衛星Rstar、Vstarに人工電波源を搭載

ドップラーデータと併せることによる3次元観測

狭帯域のキャリアー信号

多周波数VLBI 4つの搬送波

S帯3波： 2212, 2218, 2287 MHz

X帯1波： 8456 MHz

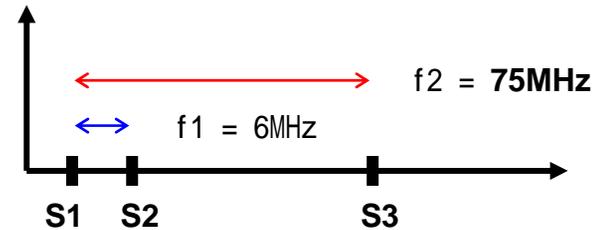
相対VLBI [Rstar/Vstar or Vstar/QSO]

大気、電離層による伝播遅延や局内遅延の除去

# 位相遅延を解く条件

例) SELENE Vstar/Rstarの相対VLBIの場合

- 信号1 : 周波数  $f = 2212\text{MHz}$
- 信号2 : 周波数  $f + f_1 = 2212\text{MHz} + 6\text{MHz}$
- 信号3 : 周波数  $f + f_2 = 2212\text{MHz} + 75\text{MHz}$



## short lane group delay

条件 : 遅延時間の予測値誤差  $\sigma_{pred}$  が信号1、2間のアンビギュイティより小さい

条件 : フリンジ位相誤差  $\sigma_\phi < \frac{\pi}{\sqrt{2}} = 130[\text{deg}]$  ,  $\delta\tau_{pred} < \frac{1}{2\Delta f_2} = 83[\text{ns}]$

## wide lane group delay

条件 : フリンジ位相誤差

$$\sigma_\phi < \frac{\pi \cdot \Delta f_1}{\sqrt{2((\Delta f_1)^2 + (\Delta f_2)^2)}} = 10.1 [\text{deg.}]$$

## phase delay

条件 : フリンジ位相誤差

$$\sigma_\phi < \frac{\pi \cdot \Delta f_2}{\sqrt{2f^2 + (\Delta f_2)^2}} = 4.3 [\text{deg.}]$$

これらの条件が満たされれば、位相遅延を

位相 =  $\frac{4.3}{(2 \cdot f)} = 4.3 / (360 \times 2212 \times 10^6) = 5.4\text{ps}$  の精度で求めることができる。