

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Vstar/Rstar 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)

Vstar/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

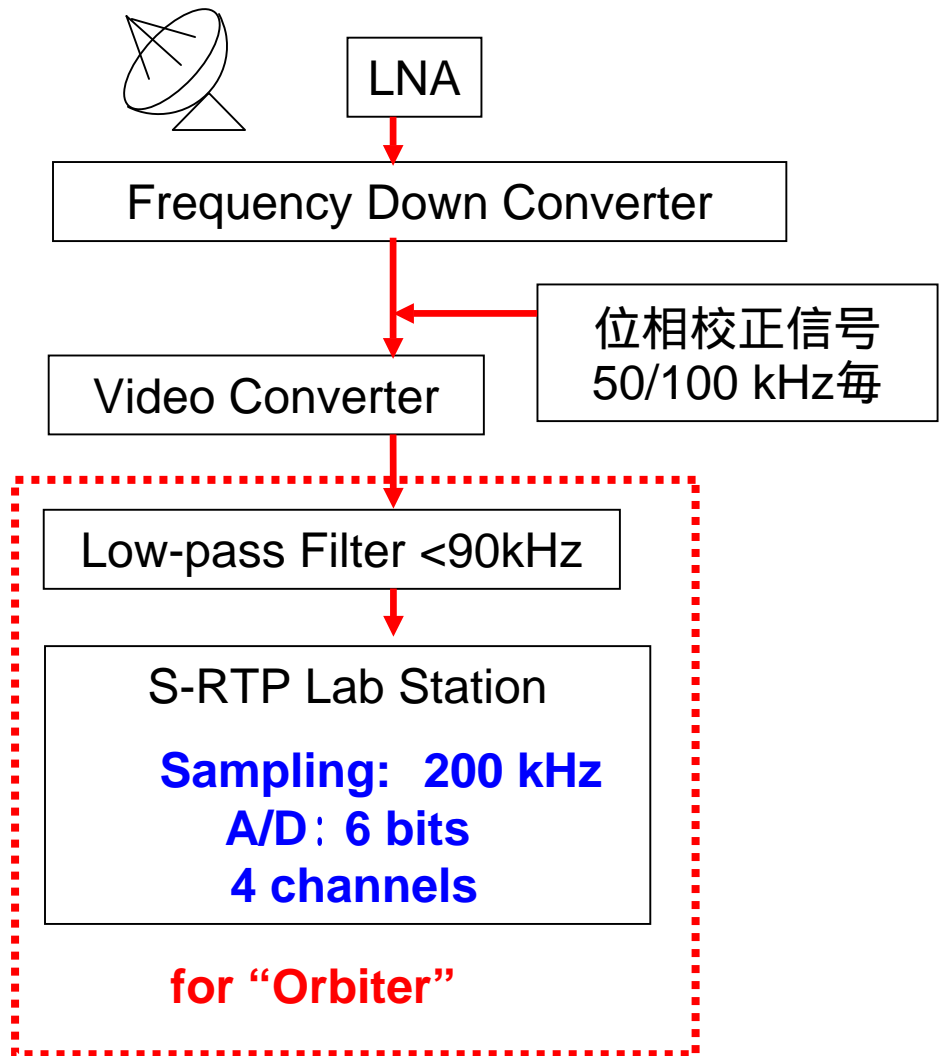
S-RTP Lab Station



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:

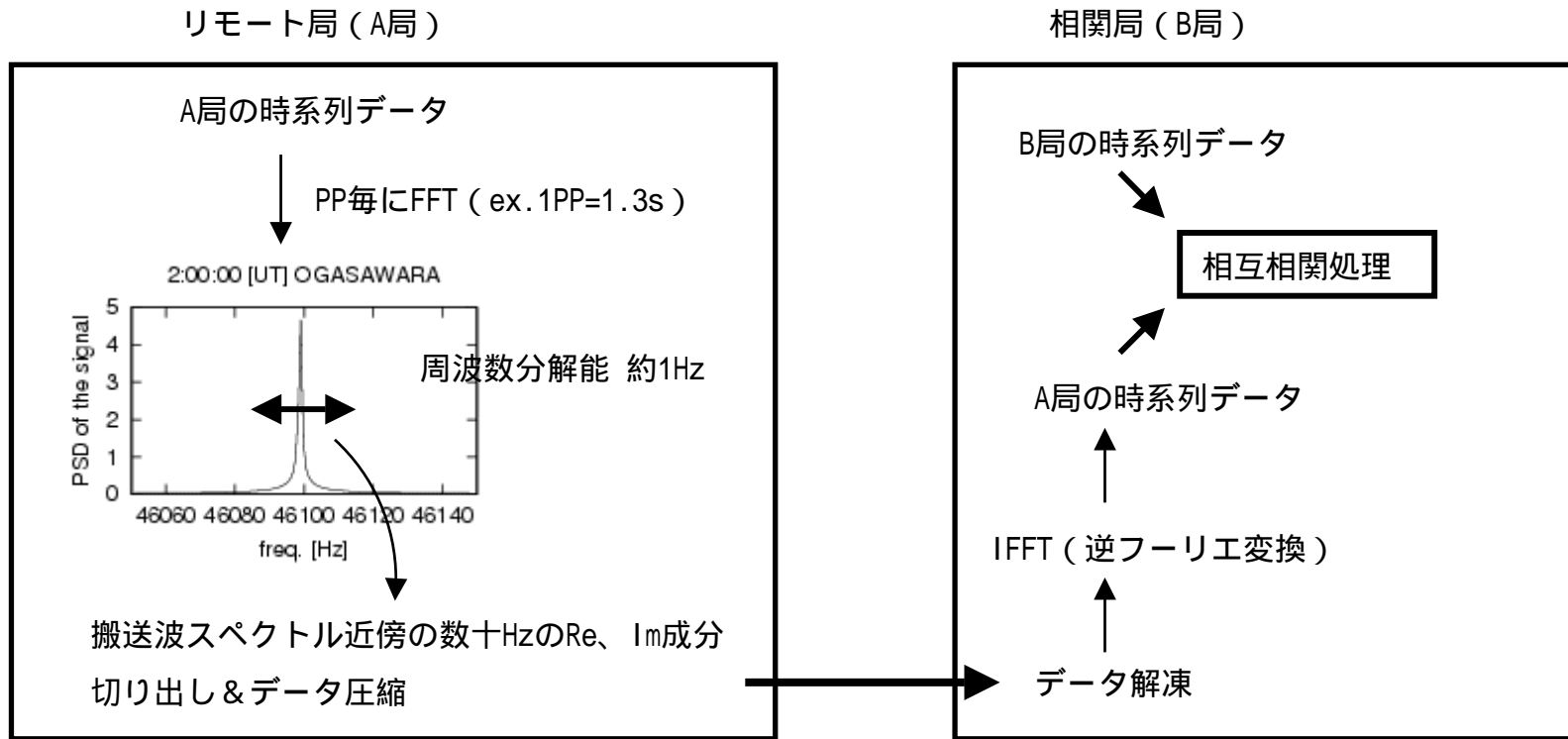
START

Comment log

Comment 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 × 4Byte(int型)=800kByte

新方式 100 × 2 × 8Byte(double型)=1.6kByte 500分の1

(搬送波50Hz, Pca150Hz切り出し、周波数分解能1Hz)

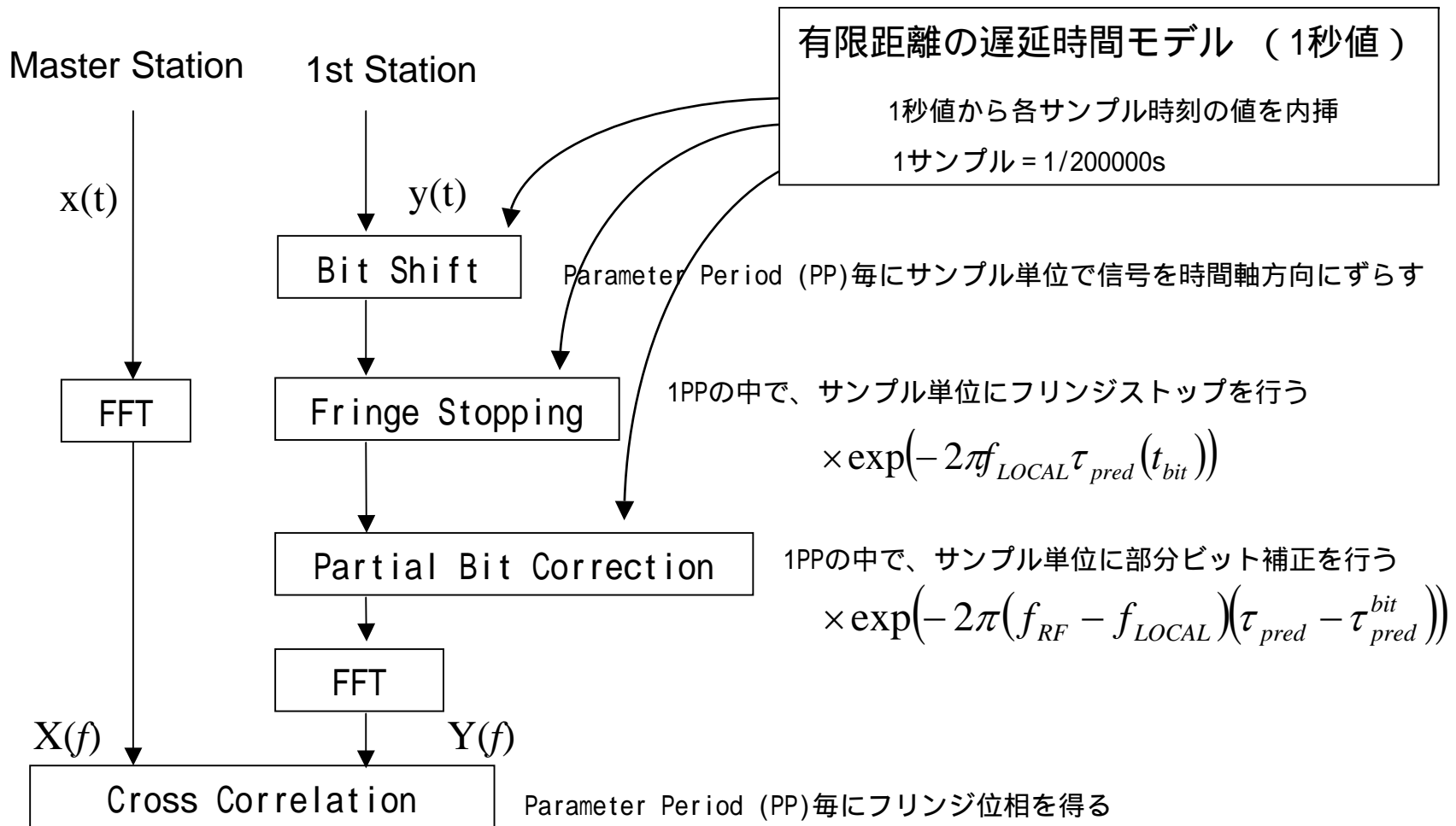


4ch、1hour = 23MByte ZIP圧縮 (約1/3) = 8.4MByte

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



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

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 551ps

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

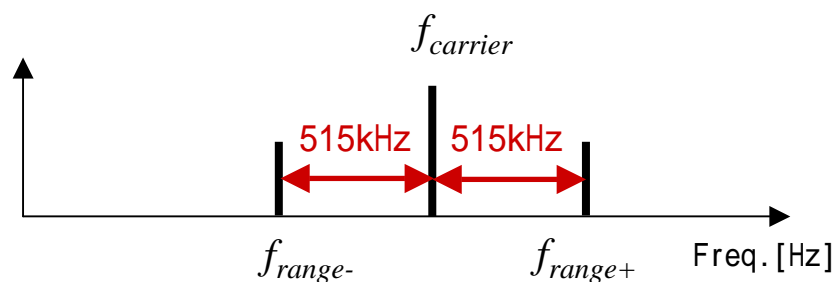
Ex. 周波数 $f = 2\text{GHz}$ 、 $\text{SNR}=10$ 推定精度 8ps

これからは位相遅延

多周波数VLBI法 (MFV) を利用 & 応用

3.1 . 群遅延解析の例 - 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

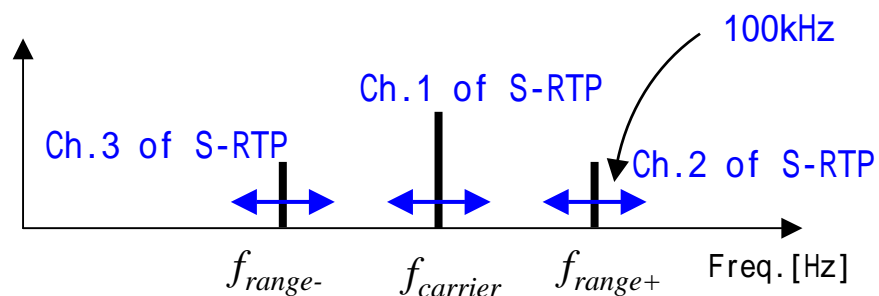


周波数

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 臼田-鹿島基線

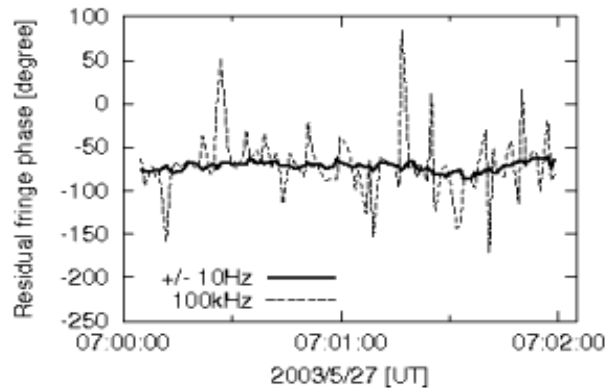


図 . メインキャリアのフリンジ位相。
 記録帯域100kHzすべて使った場合と
 リア周波数近傍 ± 10Hzのみ使った場合。 キャ

100秒間での位相誤差は38度 5度に減少

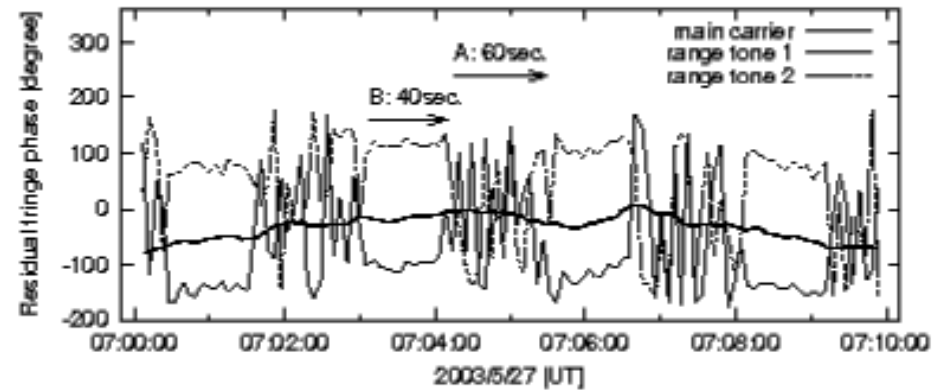
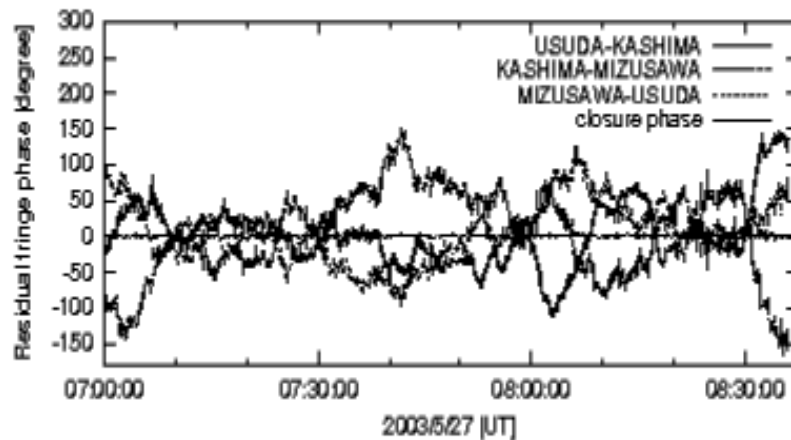


図 . メインキャリアとレンジトーンのフリンジ位相。
 レンジトーンについては、C/N0が非常に小さいため、
 図中Bの期間のみフリンジ位相を検出

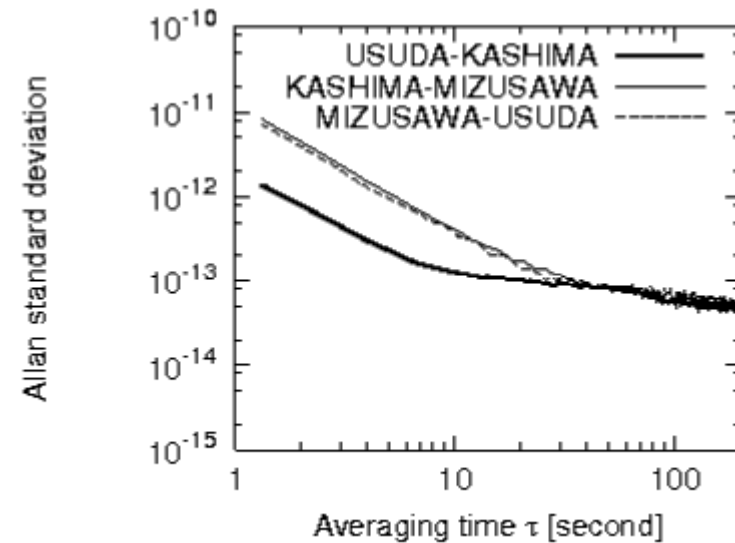
Bの期間 (100秒毎に40秒間ずつ) について
 群遅延解析を行った

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。

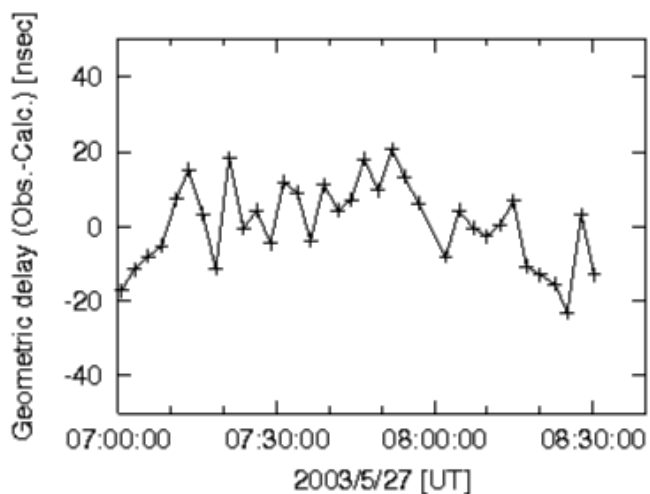


図．各基線のメインキャリアのアラン標準偏差

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。

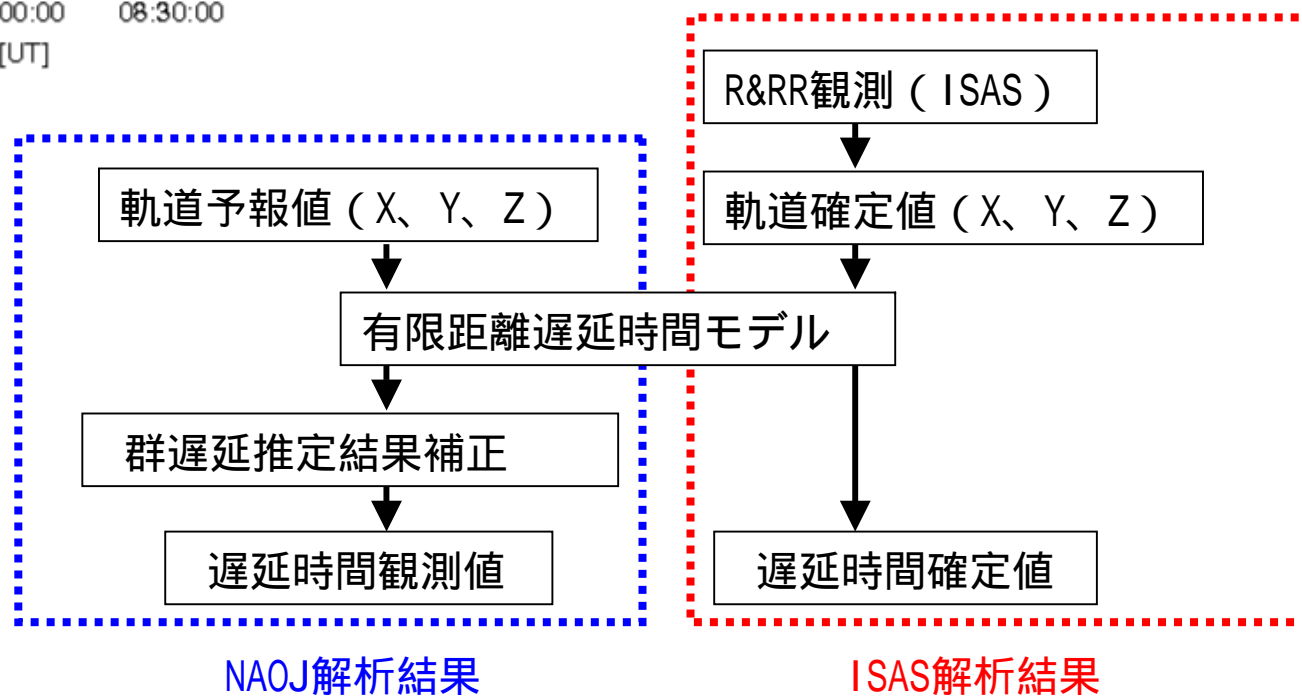
大気の影響は約 10^{-13} . Clear dayに対応する。

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



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。

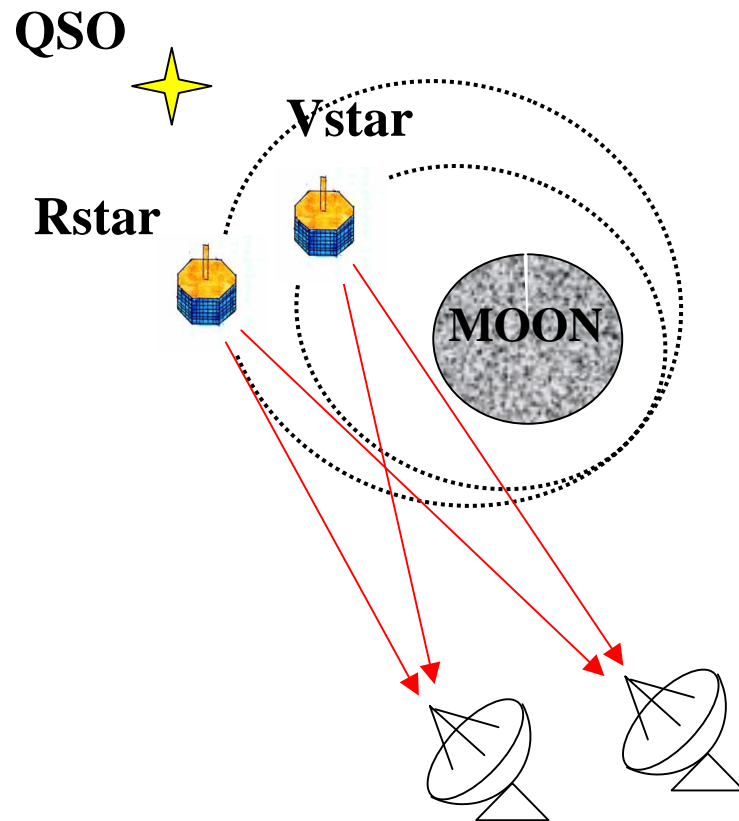
例) 信号1 : 周波数 f、 信号2 : 周波数 f+ f1、 信号3 : 周波数 f+ f2

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

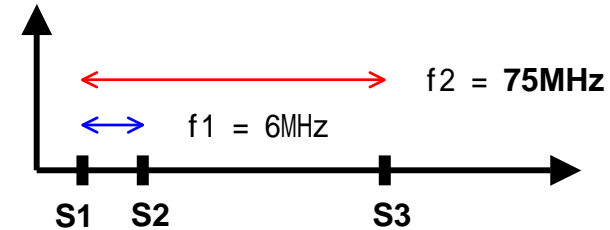
相対VLBI [Rstar/Vstar or Vstar/QSO]

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 σ_{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 $\sigma_\phi < \frac{\pi}{\sqrt{2}} = 130[\text{deg}]$, $\delta\tau_{\text{pred}} < \frac{1}{2\Delta f_2} = 83[\text{ns}]$

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 = $\frac{1}{2f} = 4.3 / (360 \times 2212 \times 10^6) = 5.4\text{ps}$ の精度で求めることができる。

しかしながら、上記の条件、特に位相誤差 < 4.3 度は積分時間を長くしたとしても厳しい。

そこで、位相誤差が条件よりやや大きい場合のアンビギュイティ除去方法および MFV後にアンビギュイティが完全に解けたかどうかの確認法を提案する。

補助的な位相遅延推定法

条件 の位相誤差 <4.3 度が満たされず、 $=5$ 度であった場合

- wide lane group delayが位相誤差5度で解けた場合、群遅延の推定精度は 641ps である。(図1赤点)
- 信号S1 (周波数 $f=2212\text{MHz}$) の位相遅延のアンビギュティの1/2 ($1/2f_1 = 226\text{ps}$) よりも、S1-S3間の群遅延誤差が大きいため、MFV法を用いて位相遅延を強引に解いたとしても、位相遅延は一意に決まらず (図2赤点)、アンビギュティ分の452psずつ離れた3つの位相遅延の候補、0ambi (図2緑線)、+1ambi (図2青線)、-1ambi (図2桃線) が得られる。

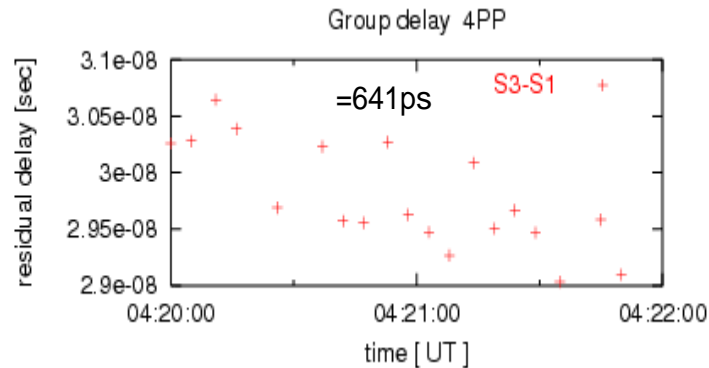


図1. wide lane group delay

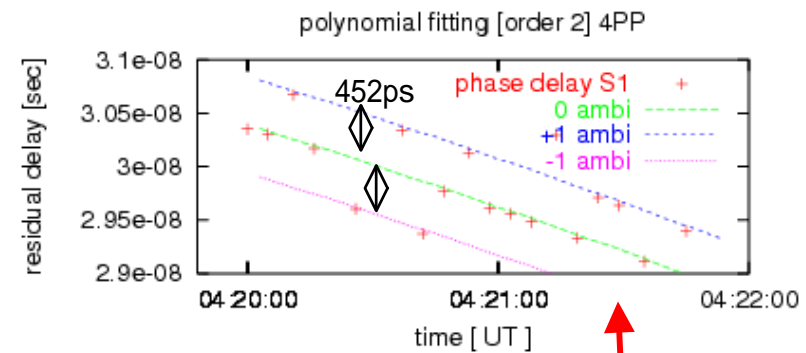


図2. phase delay and its polynomial fits.

3つの位相遅延 (緑、青、桃) の中から、真の位相遅延を判定するために、

それぞれの位相遅延を用いて再度、相関処理を行う

各信号のフリンジ位相差を求め、それぞれの位相遅延について比較する。

$$\begin{matrix} 2 & 21 = & 2^- & 1 \\ 2 & 31 = & 3^- & 1 \end{matrix}$$

位相遅延には3つの候補があり、
どれが真の位相遅延かわからない! ?

各信号のフリッジ位相は、

$$\phi_i = 2\pi f_i \tau - 2\pi k D/f_i + \dots \quad (1)$$

$$= n \cdot 452 + \dots \quad [\text{ps}] \quad (n = \dots -2, -1, 0, 1, 2 \dots)$$

$k: 1.34 \times 10^{-7} [\text{m}^2/\text{eI} \cdot \text{s}]$, $D: \text{TEC}$, τ : 遅延時間残差, ϕ_i : フリッジ位相誤差, n : 位相遅延残差 (数ps)

フリッジ位相差は

$$\Delta^2 \phi_{21} = \phi_2 - \phi_1 = 2\pi (f_2 - f_1) \tau - 2\pi k D(1/f_2 - 1/f_1) + \dots$$

$$\Delta^2 \phi_{31} = \phi_3 - \phi_1 = 2\pi (f_3 - f_1) \tau - 2\pi k D(1/f_3 - 1/f_1) + \dots \quad (2)$$

式(2)の第2項、第3項の電離層遅延と位相誤差の影響が十分に小さいとき、MFVで得られた位相遅延に対して、これらのフリッジ位相差から、真の位相遅延が判定できる。

Table 1. The differential fringe phase when there are n ambiguity.

n	2	1	0	-1	-2
$\Delta^2 \phi_{S2-S1} [\text{degrees}]$	-2	-1	0	1	2
$\Delta^2 \phi_{S3-S1} [\text{degrees}]$	-24	-12	0	12	24

Short lane で判断するのは難しいが

Wide lane なら判断できる

アンビギュイティが +1 の場合

アンビギュイティが -1 の場合

アンビギュイティがない場合

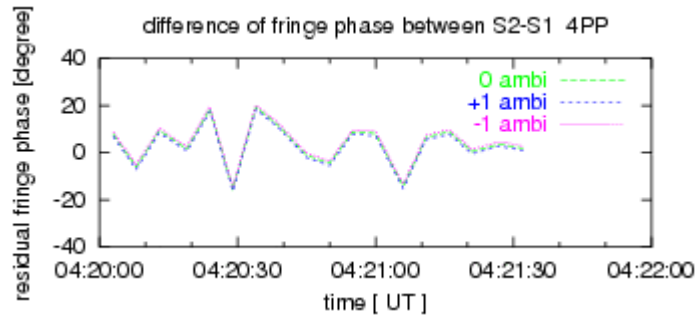


図. フリンジ位相差 $^2_{21}$ 4 PP積分 (5秒積分)

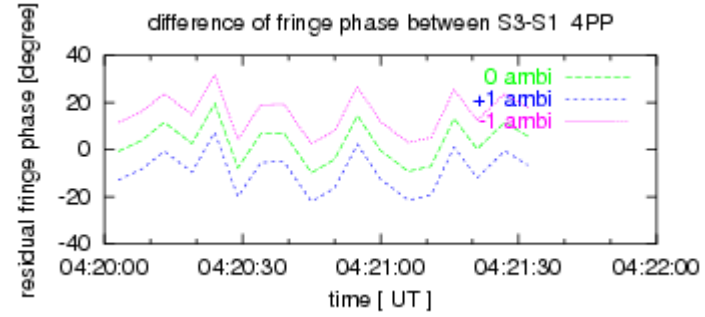


図. フリンジ位相差 $^2_{31}$ 4 PP積分 (5秒積分)

5秒積分ではフリンジ位相誤差が大きく、判定はやや難しい

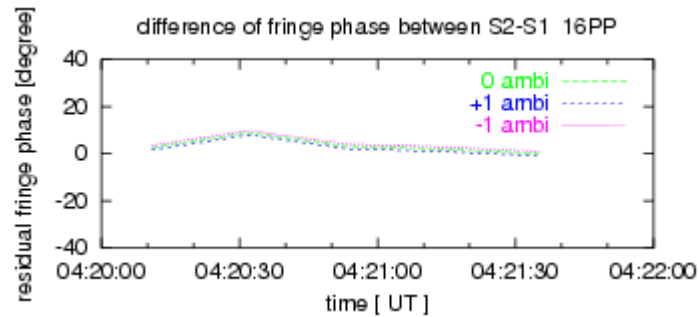


図. フリンジ位相差 $^2_{21}$ 16PP積分 (20秒積分)

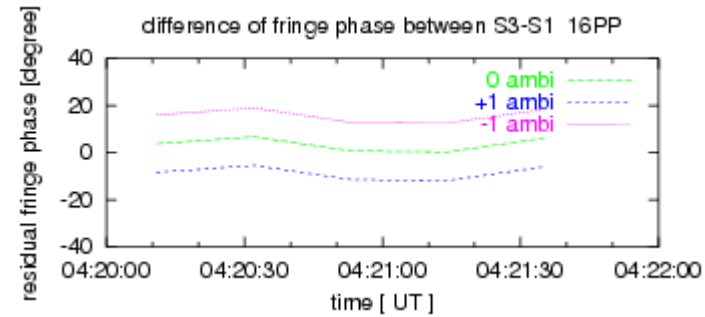


図. フリンジ位相差 $^2_{31}$ 16PP積分 (20秒積分)

20秒積分であれば十分に判定できる

表1のフリンジ位相残差と比較した結果、図2の0ambiが真の位相遅延であると判定される

電離層遅延の影響

$$\begin{aligned}
 \phi_{21} &= \phi_2 - \phi_1 = 2\pi (f_2 - f_1) D - 2\pi k D (1/f_2 - 1/f_1) + \phi_2 \\
 \phi_{31} &= \phi_3 - \phi_1 = 2\pi (f_3 - f_1) D - 2\pi k D (1/f_3 - 1/f_1) + \phi_3 \quad (2)
 \end{aligned}$$

位相遅延のアンビギュイティによるフリンジ位相差よりも電離層遅延によるフリンジ位相差が大きいと、先述の判定ができない。よって下記条件が満たされなければならない

$$\begin{aligned}
 -2\pi k D (1/f_3 - 1/f_1) &< 2\pi (f_3 - f_1) D / 2 \quad (=452\text{ps}) \\
 D &< 0.85 \text{ [TECU]}
 \end{aligned}$$

相対VLBI

電波源間の仰角の差、平均仰角と
相対VLBI後の電離層遅延の残差

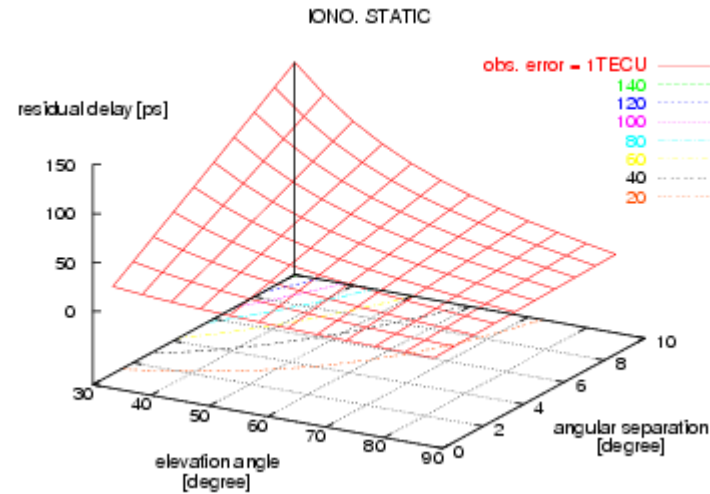


図. 天頂方向 電離層遅延 補正誤差 = 1 TECU