

2005年11月イトカワタッチダウン時
のHAYABUSA観測
--位相遅延量を使った
相対VLBI観測の精度の評価--

関戸衛, 市川隆一

吉川真, 望月奈々子, 村田泰宏,
加藤隆二, 市川勉, 竹内央, (ISAS/JAXA)
大西隆史 (富士通)

Spacecraft Navigation R&RR + VLBI

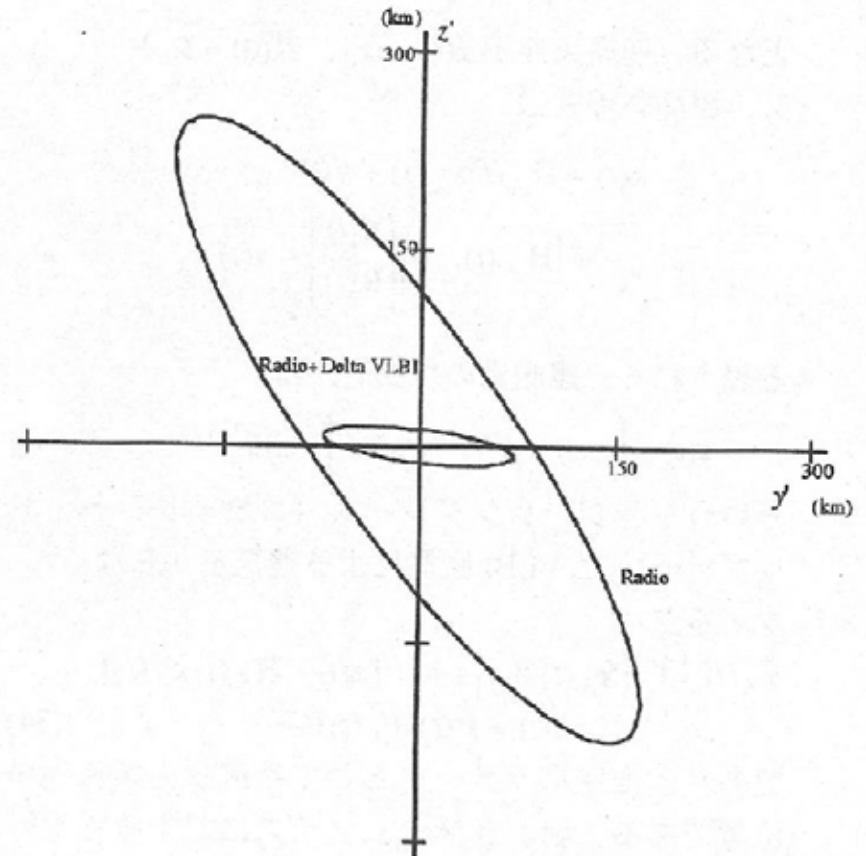
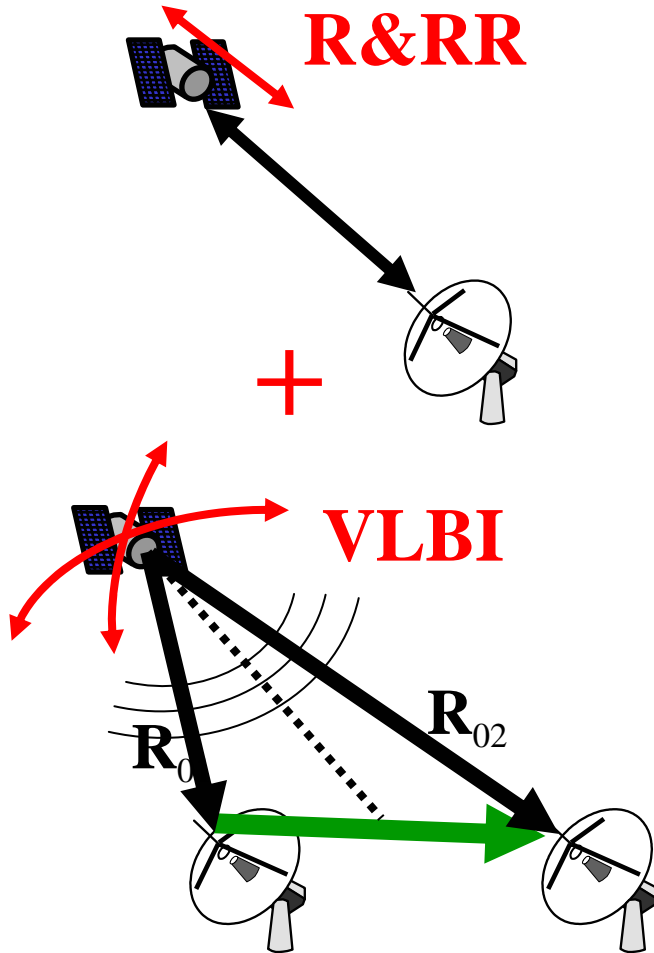


Fig. 7 誤差楕円

Outline

- VLBI 測定の精度
 - 信号バンド幅 群遅延精度
 - 基線長
- VLBI observation of HAYABUSA
 - Epoch: 2005年 11月 4日, 12日, 19日, 25日
 - 参照天体離角: 2 ~ 8度
- VLBIでどの程度の精度(確度)で遅延量が得られるか? 大気遅延・クロックの校正がどの程度できるか?

VLBI 計測精度

角度分解能を決める
遅延計測精度、基線長

Relation between Angular Resolution and Delay Resolution

$$\Delta L = c \quad \tau$$

$$\Delta \theta = \frac{\Delta L}{B} = c \frac{\Delta \tau}{B}$$

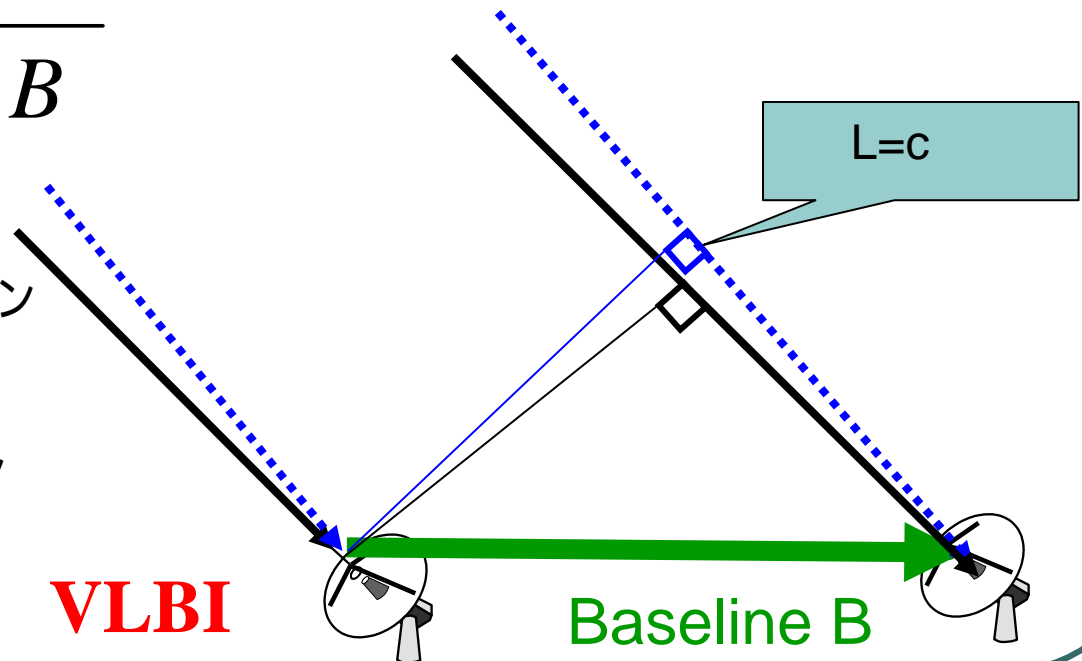
遅延精度:
 基線長: B
 確度分解能:
 光速: c

1 ns/1000km → 0.3 μ ラディアン
 (60mas)
 45km@1AU

1ns/8000km → 40 n ラディアン
 (8mas)
 6km@1AU

VLBI

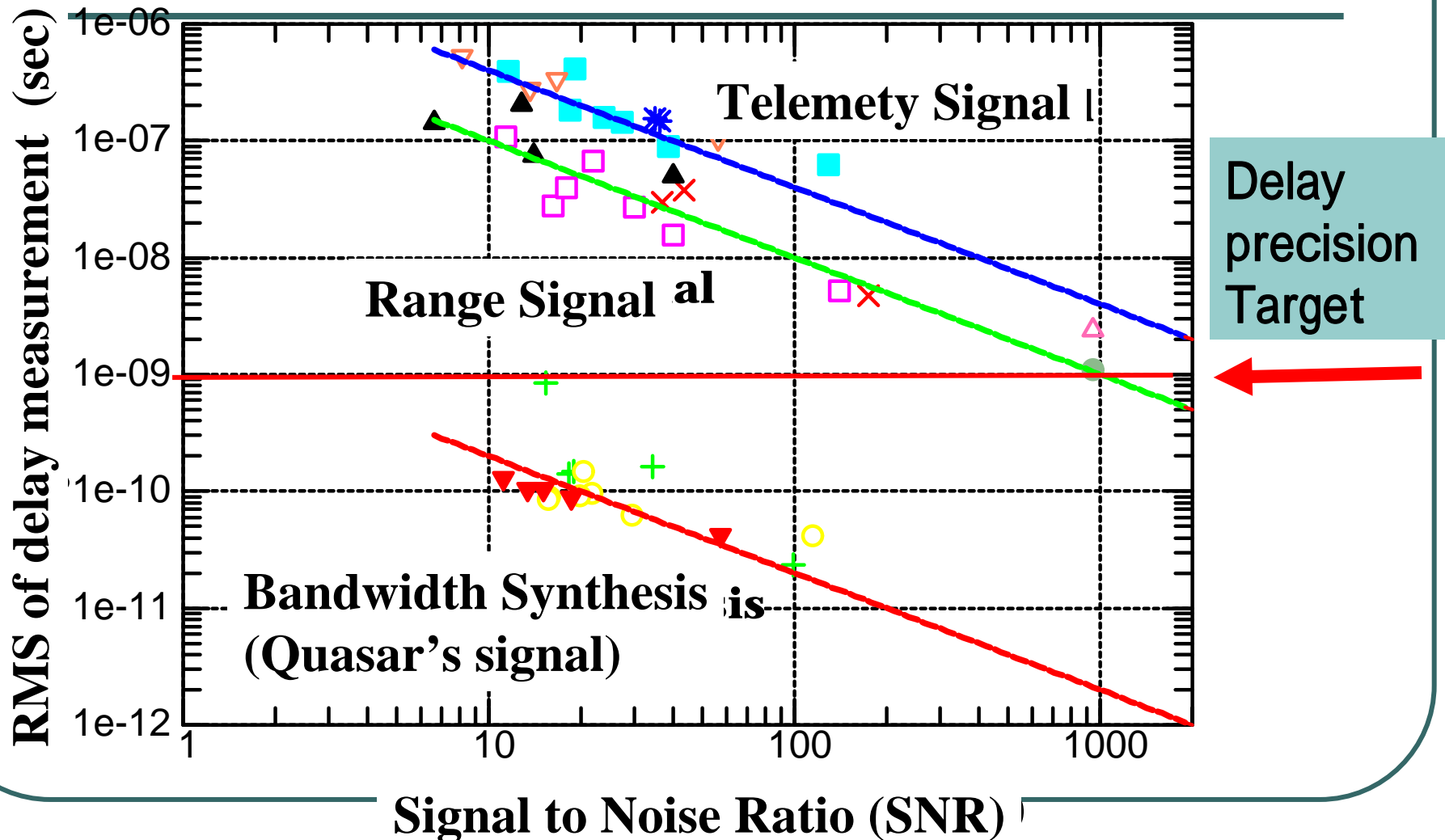
Baseline B



群遅延計測精度

Hayabusa Observations
In May /30 ~ July 4 2005

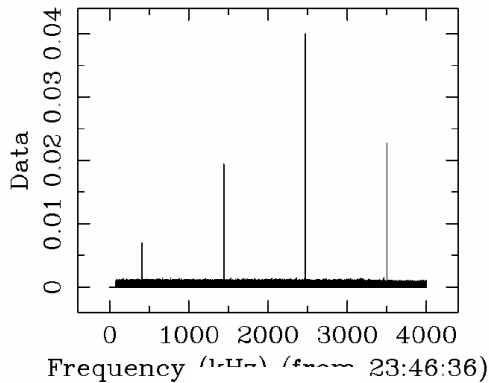
$$\sigma_{\tau} = A / (SNR \times \text{Effective Bandwidth})$$



VLBI 観測量: 群遅延

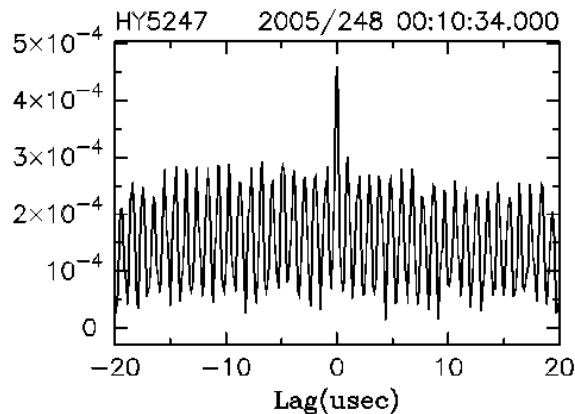
DDOR signal

0.000 - 1.000 sec.
8e+03 kHz-1bit Auto Cor Spectrum



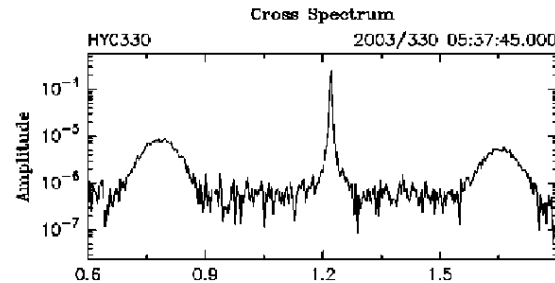
← 4 MHz →

Fringe



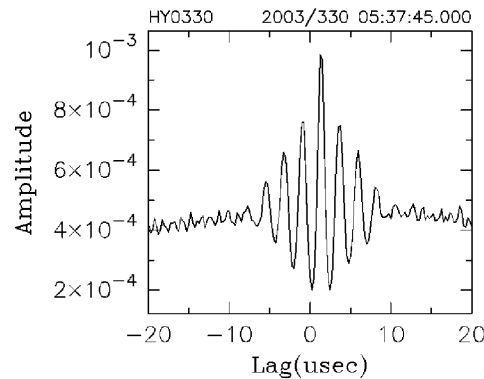
Effective Bandwidth
450kHz

Range signal



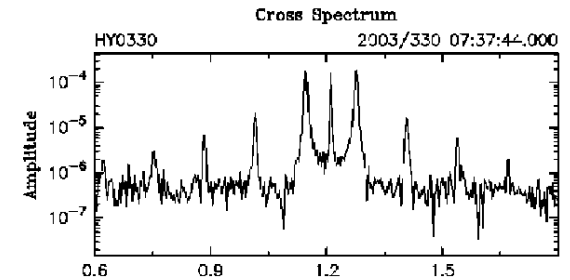
← 1MHz →

Fringe



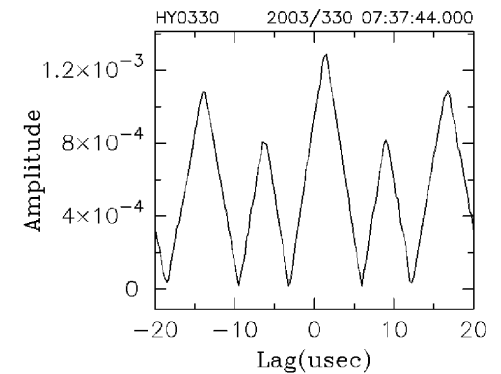
Effective Bandwidth
100kHz

Telemetry Signal



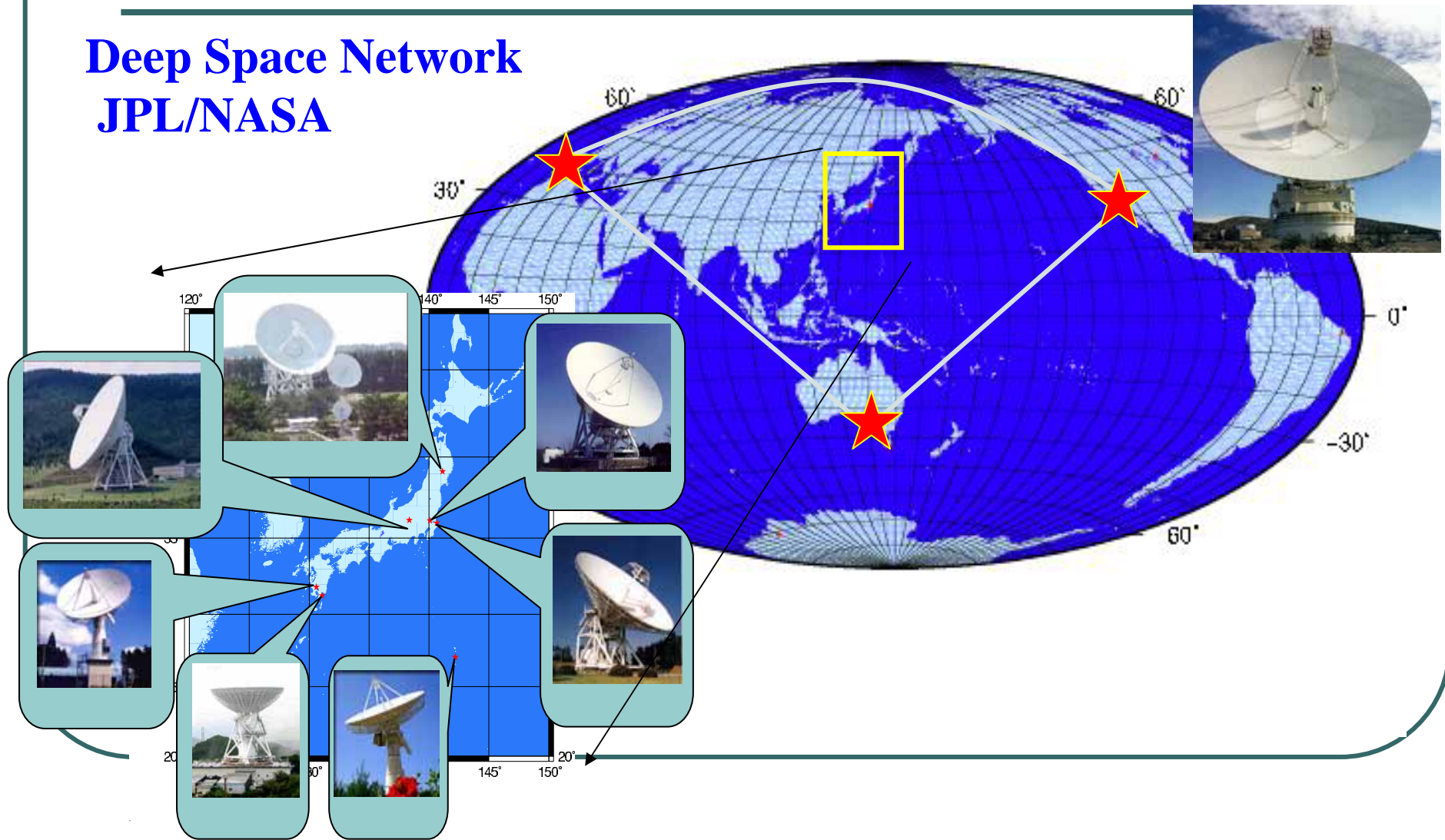
← 1MHz →

Fringe

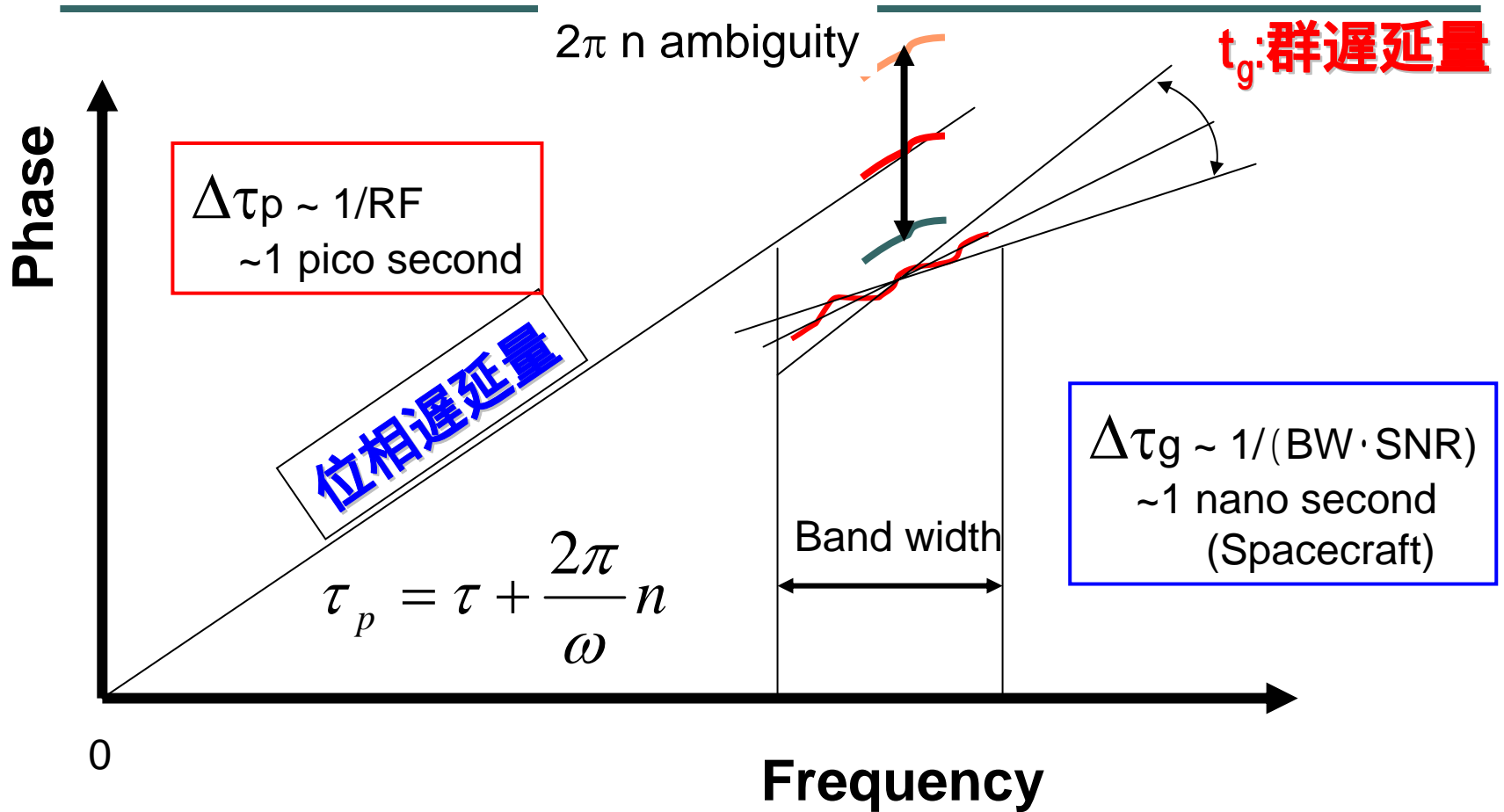


Deep Space Network and Japanese Domestic VLBI stations

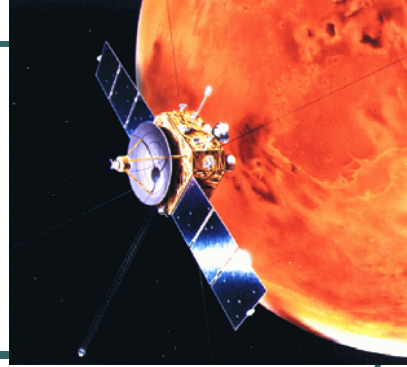
Deep Space Network JPL/NASA



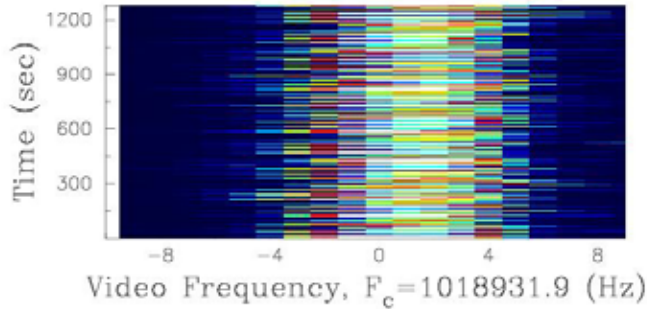
VLBI 観測量: 群遅延 & 位相遅延



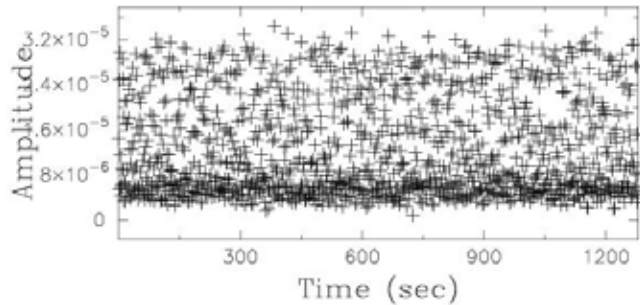
Alternative Choice: 位相遅延量



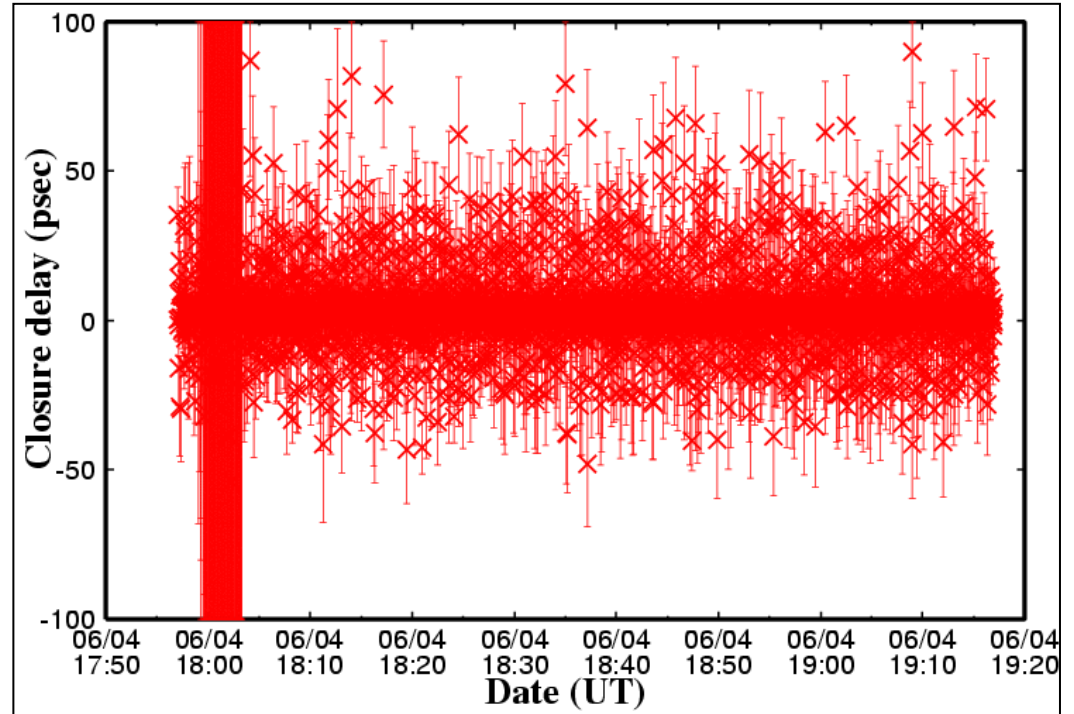
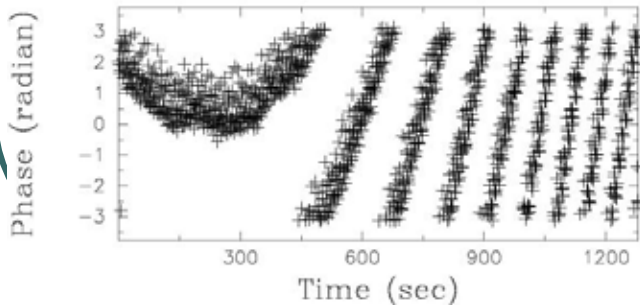
Dynamic Cross Spectrum: Rate Corrected ch=1



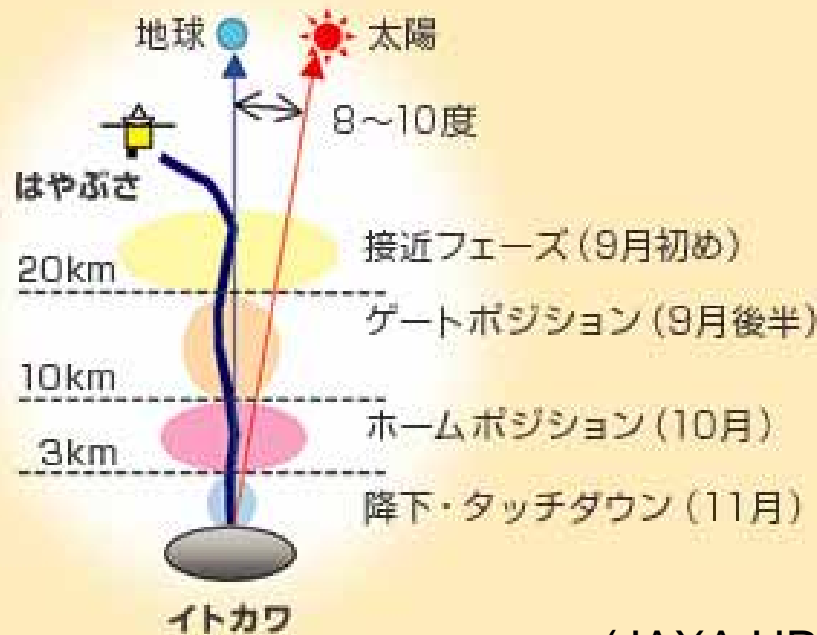
Dynamic Cross Spectrum: Rate Corrected ch=1



Dynamic Cross Spectrum: Rate Corrected ch=1



Hayabusa's Touchdown Approach to ITOKAWA in Nov. 2005

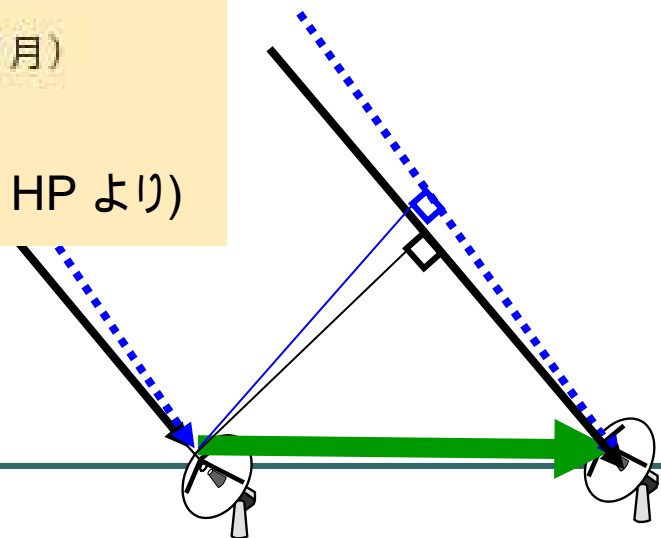


- VLBI Observation
- Nov. 4th
 - Nov. 12th
 - Nov. 19th
 - Nov. 25th

(JAXA HP より)

Fringe spacing: $\frac{\lambda}{B} \times n$

B=50km :	190km
B=300km :	33km



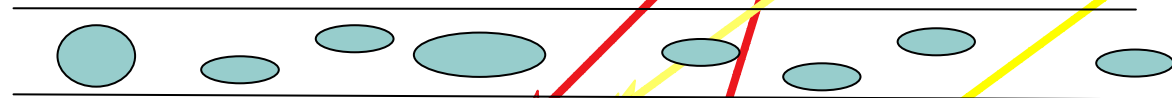
Delta-VLBI is for Calibration of Atmosphere, Clock offset

$$\tau = \tau_{geo} + \tau_{clock} + \tau_{atm} + \tau_{inst} + \dots$$

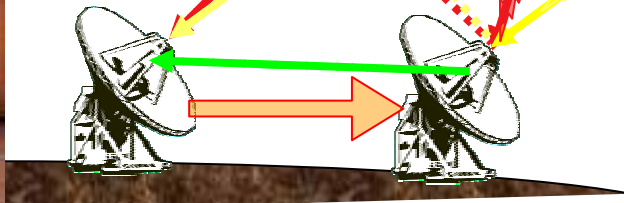


Ionosphere

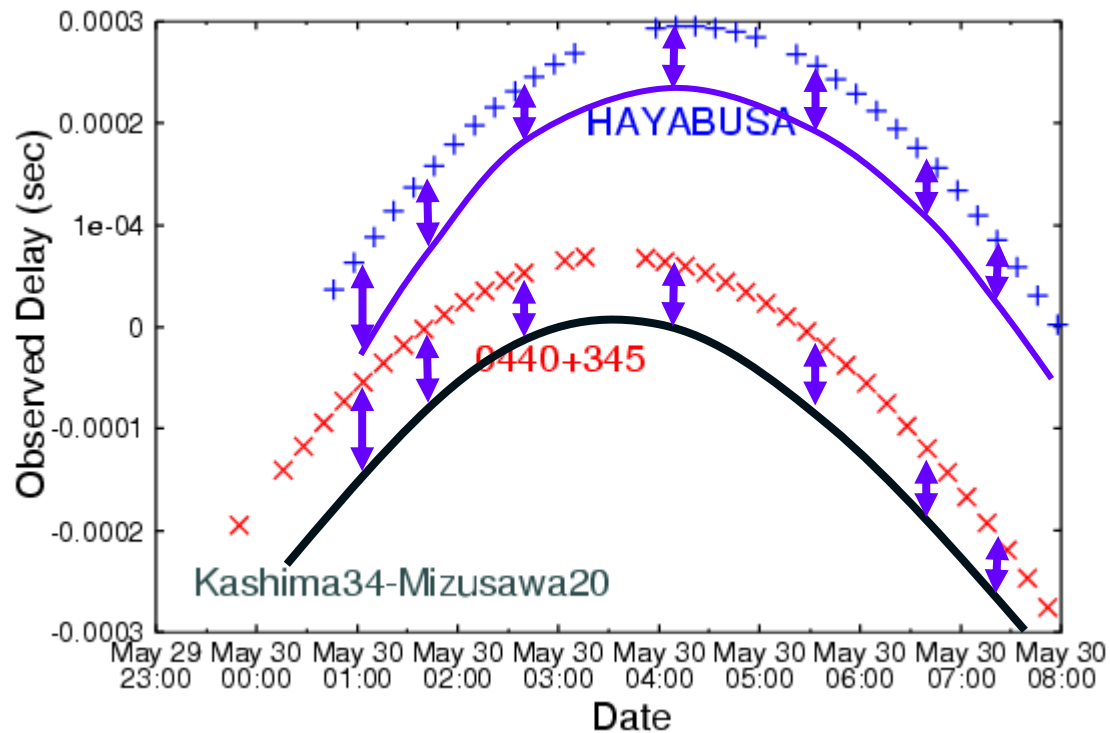
Atmosphere



Atomic
Clock
(H-Maser)

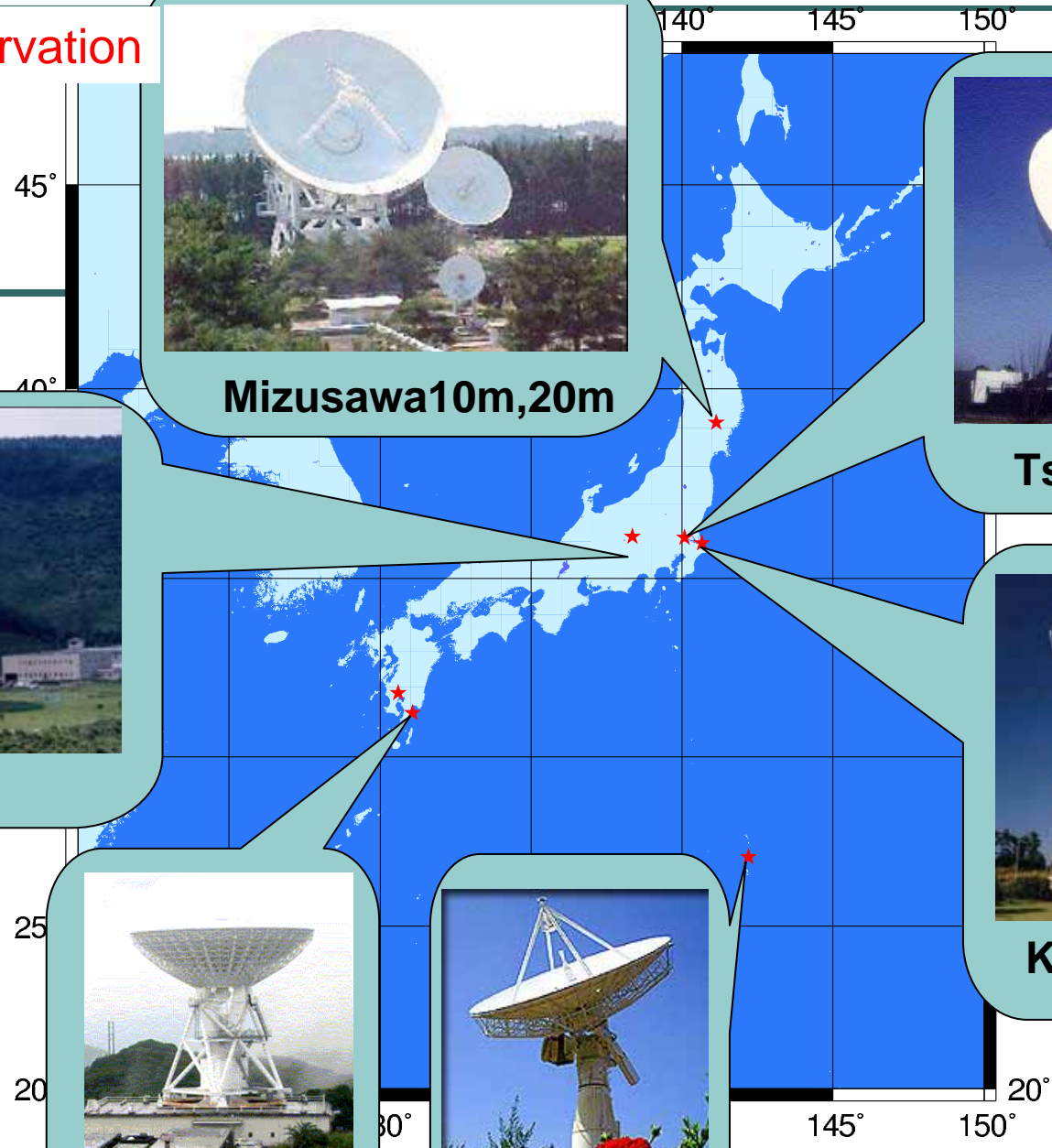


Delta-VLBI: データ処理の手順



June 28 - July 4 2005
Spacecraft: HAYABUSA
0440+345: 6 deg. Away
Switching cycle: 8 min.

HYBS VLBI observation



Mizusawa 10m, 20m



Tsukuba 32m



Usuda 64m



Kashima 34m



Uchinoura 34m



Chichi 10m

VLBI of HAYABYSA in Nov. 2005

Epoch	Reference Source (Angular Distance)	Switching Cycle	Observation Stations
4 th Nov.	1352-104(3.3deg)	6 min.	O,T,C
12 th Nov.	1430-178(3.3deg.) 1443-162(2.4deg.)	6 min. Alternatively	O,T
19 th Nov.	1443-162(5.5deg.) 1430-178(8.5deg.)	6 min. Alternatively	O,T,M
25 th Nov.	1514-241(6.8deg.) 1504-166(7.1deg.)	6 min. Alternatively	O,T

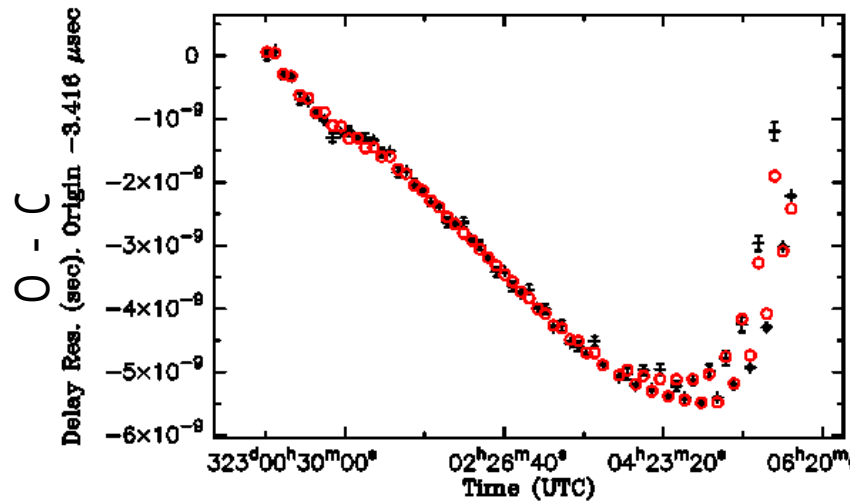
O:Kashima34, T:Tsukuba32m, C: Chichijima10m, M: Mizusawa 20m

VLBIによる遅延量の補正

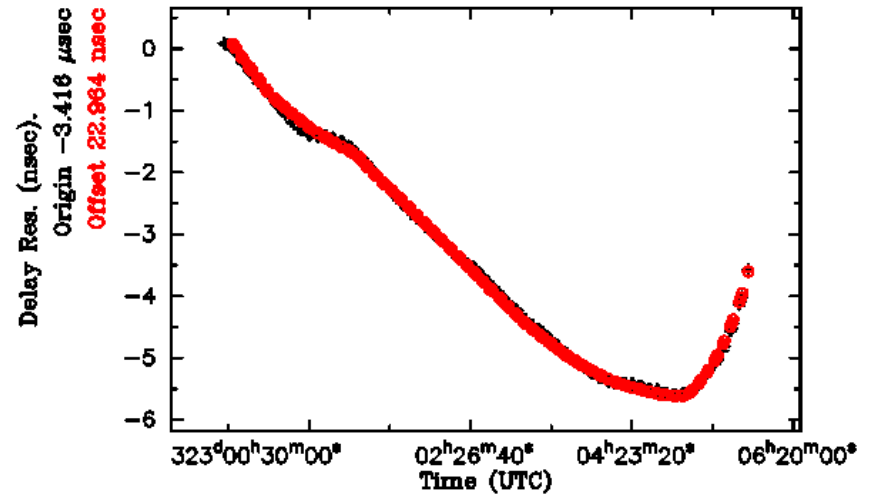
VLBIによりどの程度の精度(確度)で幾何学的遅延量が計測できるか？

2005/11/19 鹿島34-水沢20基線

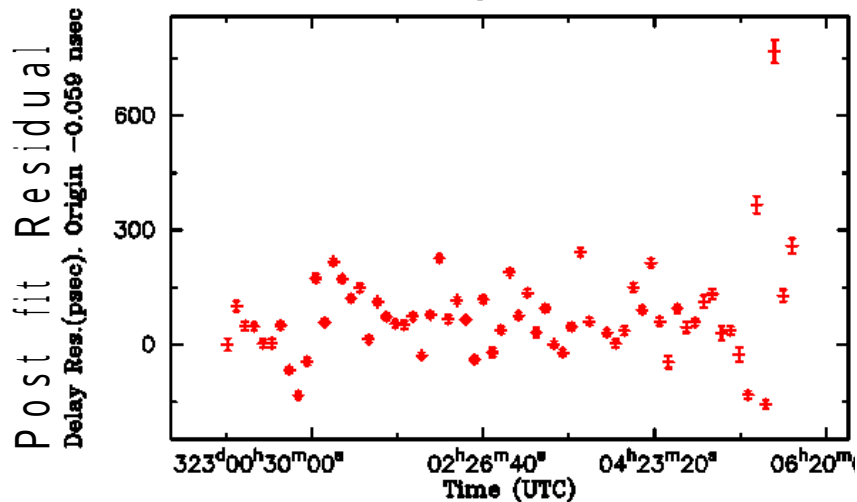
基準電波源へのモデルフィット



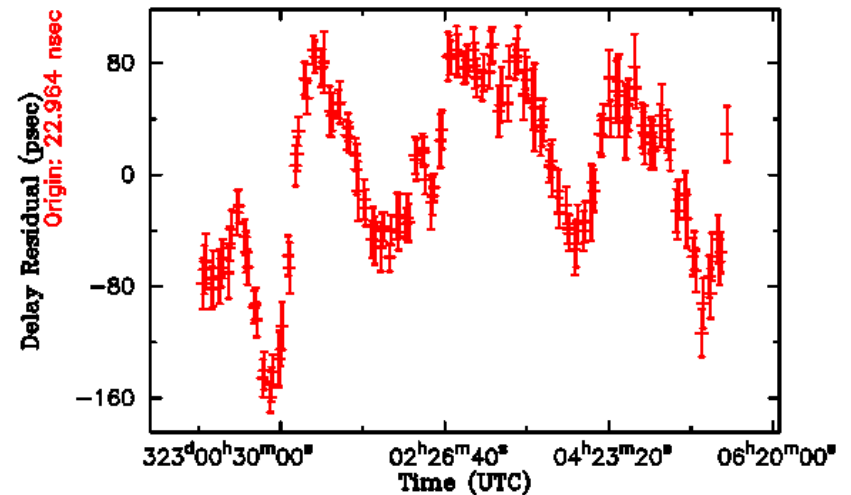
HYBSへのモデル適用 (nsec)



Reference Delay Post-Fit-Residual



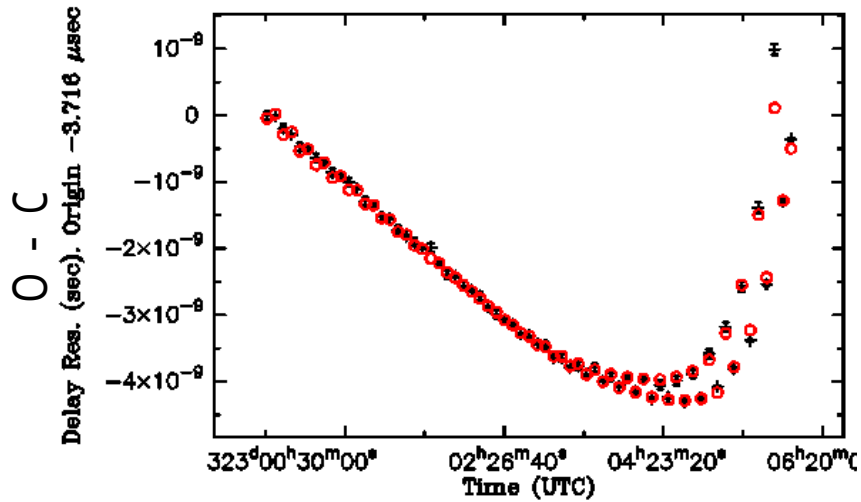
Target Delay Post-Correction-Residual



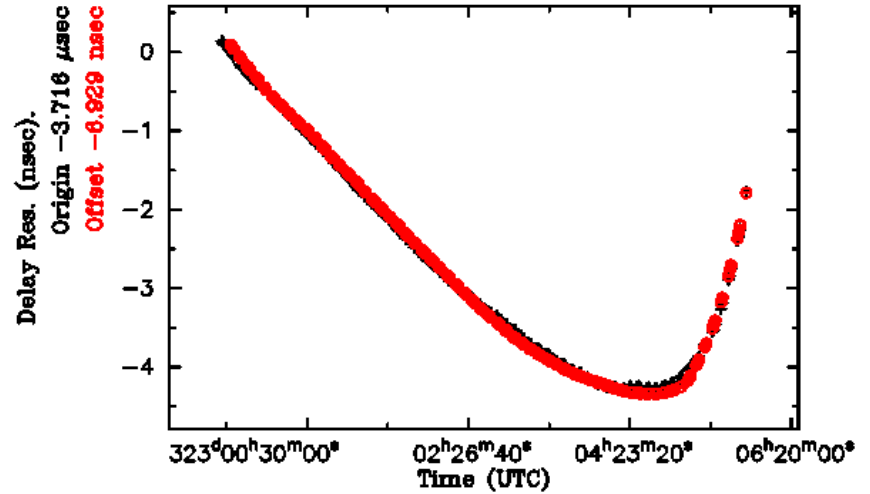
$$\tau = \tau_0 + \dot{\tau}(t - t_0) - \tau_{atm,x} fm(El_x) + \tau_{atm,y} fm(El_y)$$

2005/11/19 つくば32-水沢20基線

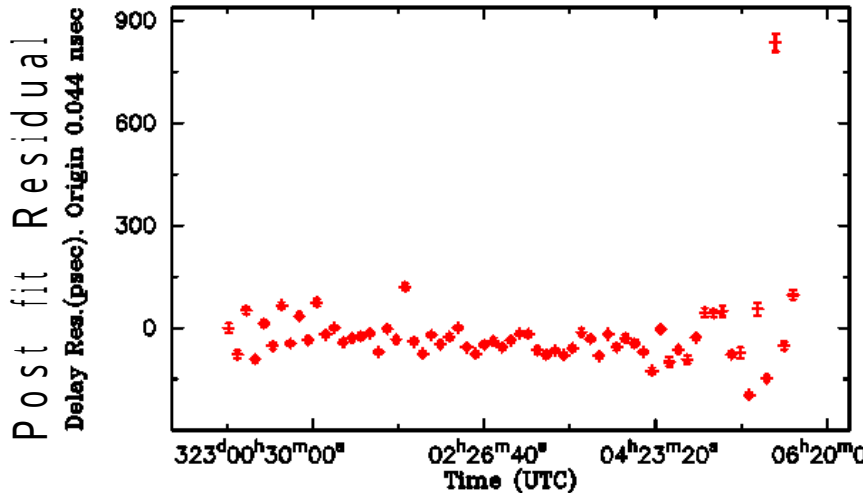
基準電波源へのモデルフィット



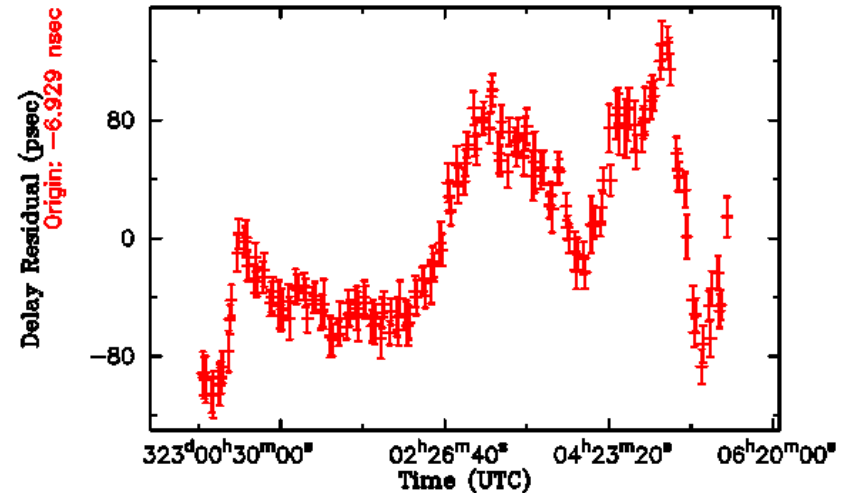
HYBSへのモデル適用 (nsec)



Reference Delay Post-Fit-Residual



Target Delay Post-Correction-Residual

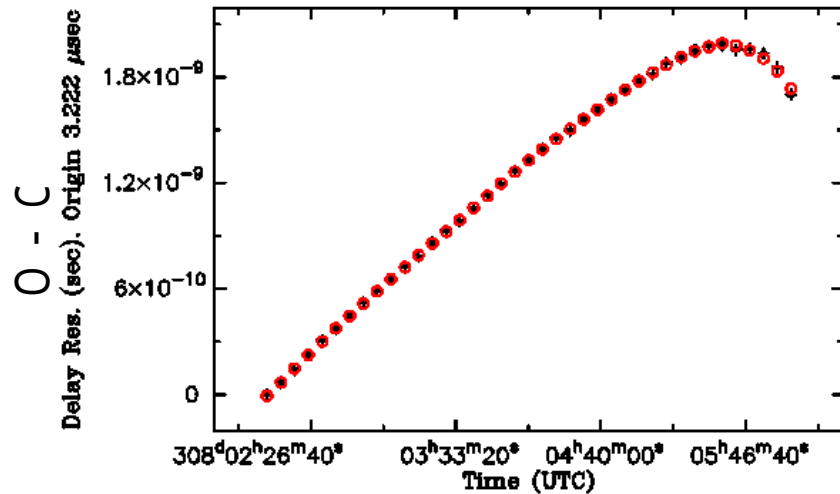


$$\tau = \tau_0 + \dot{\tau}(t - t_0) - \tau_{atm,x} fm(El_x) + \tau_{atm,y} fm(El_y)$$

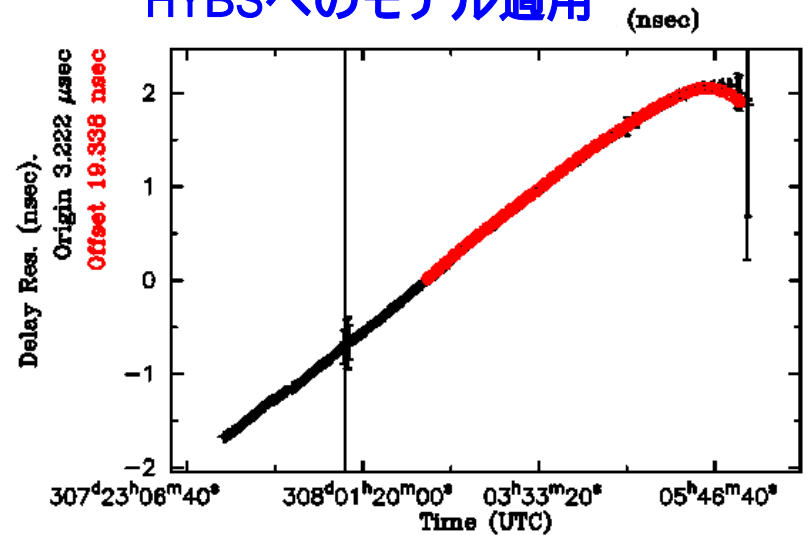
マルチエポック折れ線

2005/11/4 鹿島34-つくば32基線

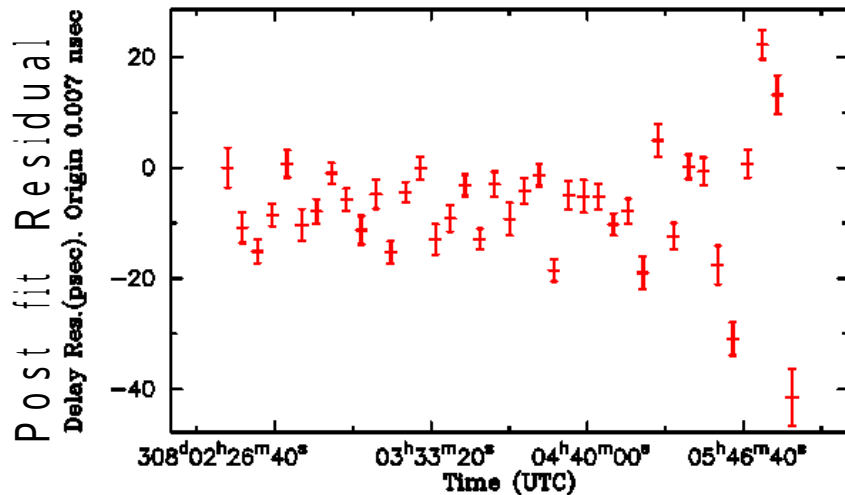
基準電波源へのモデルフィット



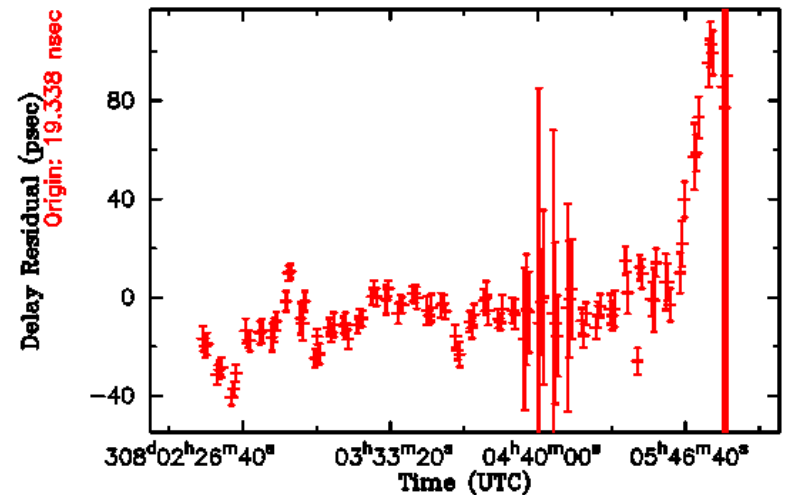
HYBSへのモデル適用



Reference Delay Post-Fit-Residual



Target Delay Post-Correction-Residual



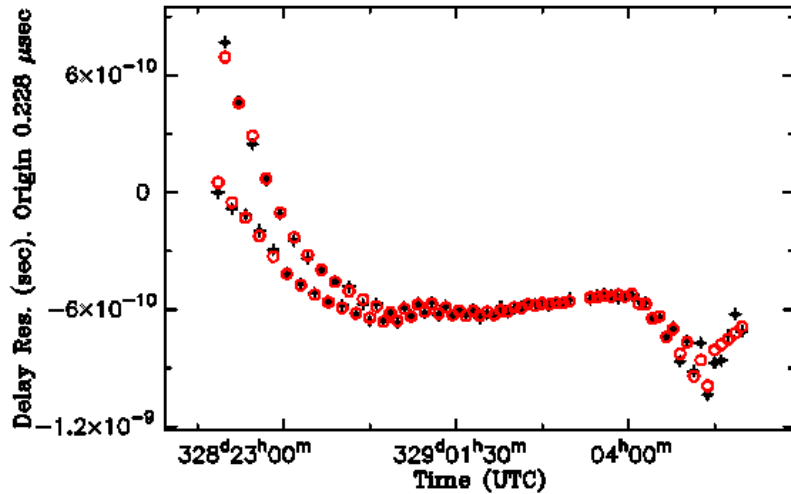
$$\tau = \tau_0 + \dot{\tau}(t - t_0) - \tau_{atm,x} fm(El_x) + \tau_{atm,y} fm(El_y)$$

マルチエポック折れ線

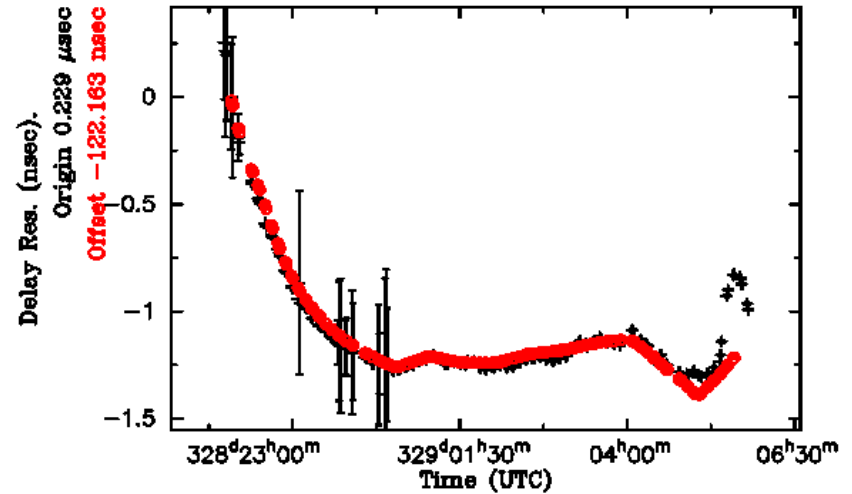
2005/11/25 鹿島34-つくば32基線

大気補正に
地上THP使用

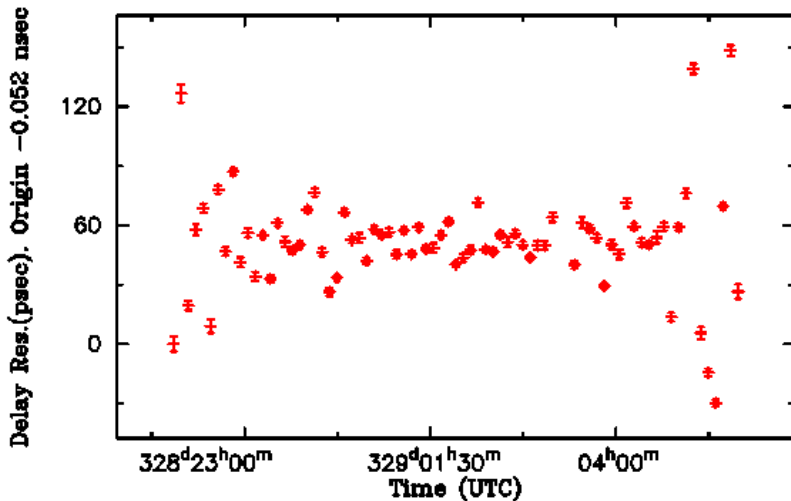
基準電波源へのモデルフィット



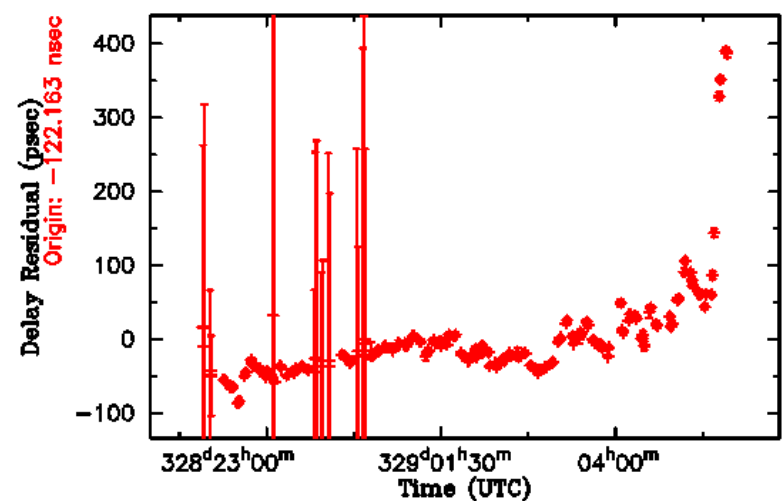
HYBSへのモデル適用 (nsec)



Reference Delay Post-Fit-Residual



Target Delay Post-Correction-Residual



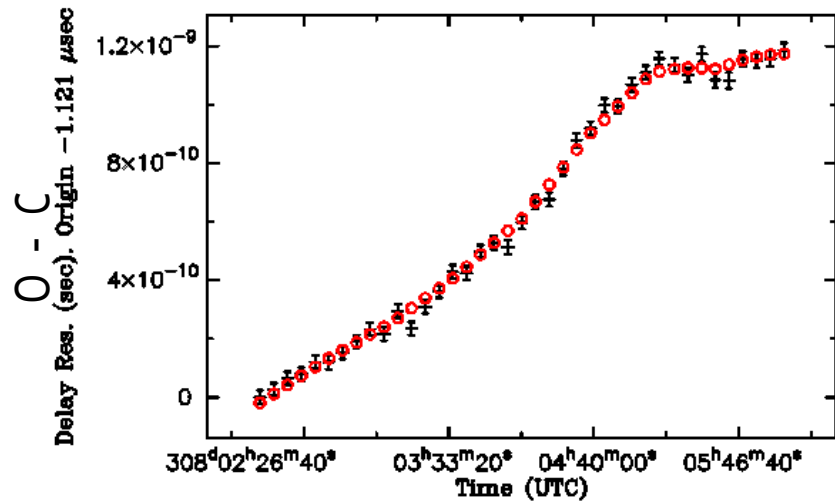
$$\tau = \tau_0 + \dot{\tau}(t - t_0) - \tau_{atm,x} fm(El_x) + \tau_{atm,y} fm(El_y)$$

マルチエポック折れ線

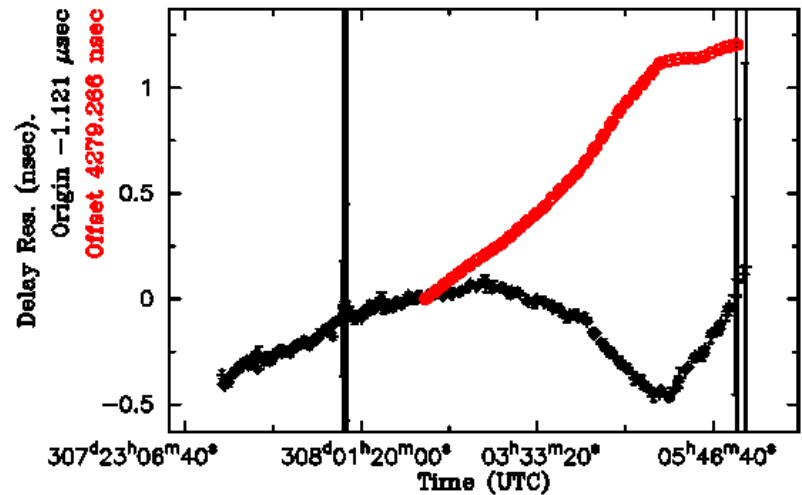
2005/11/4 つくば32-父島11基線

大気補正に
地上THP使用

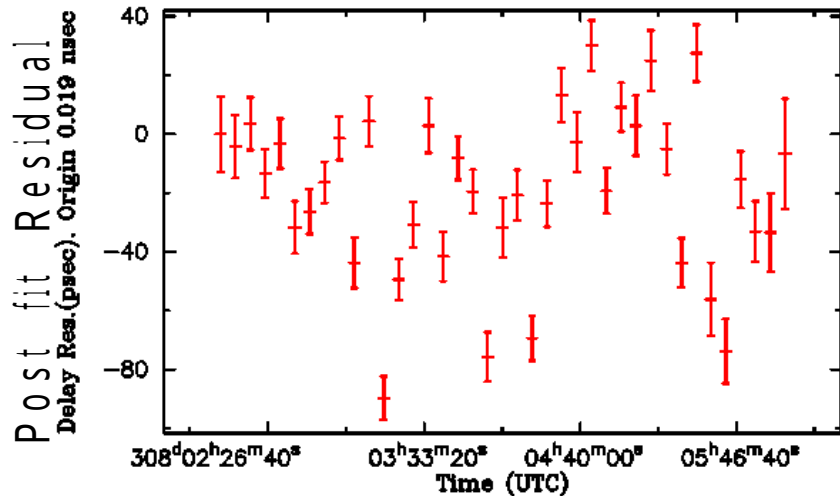
基準電波源へのモデルフィット



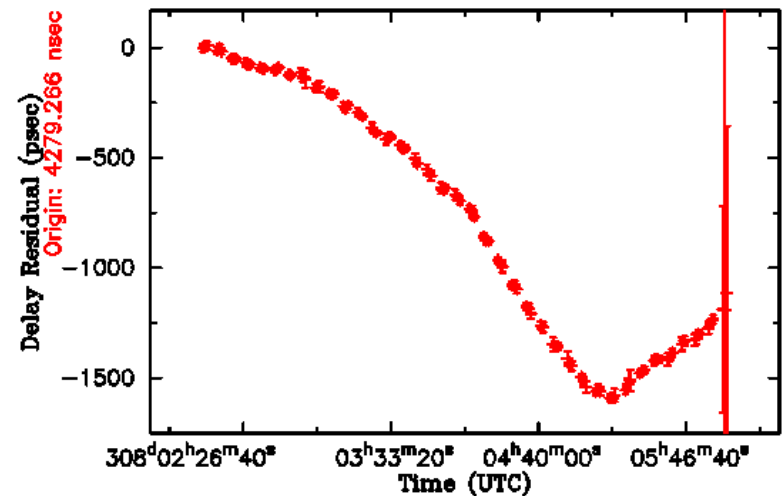
HYBSへのモデル適用 (nsec)



Reference Delay Post-Fit-Residual



Target Delay Post-Correction-Residual



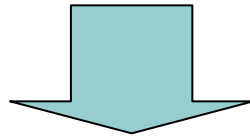
$$\tau = \tau_0 + \dot{\tau}(t - t_0) - \tau_{atm,x} fm(El_x) + \tau_{atm,y} fm(El_y)$$

マルチエポック折れ線

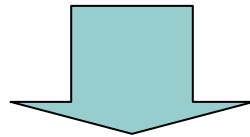
Delta-VLBI: データ処理の手順

$$\tau_{HYBS} = \tau_{geo} + \tau_{clock} + \tau_{atm} - \tau_{ION} + \dots$$

$$\tau_{QSO} = \tau_{geo} + \tau_{clock} + \tau_{atm} + \tau_{ION} + \dots$$

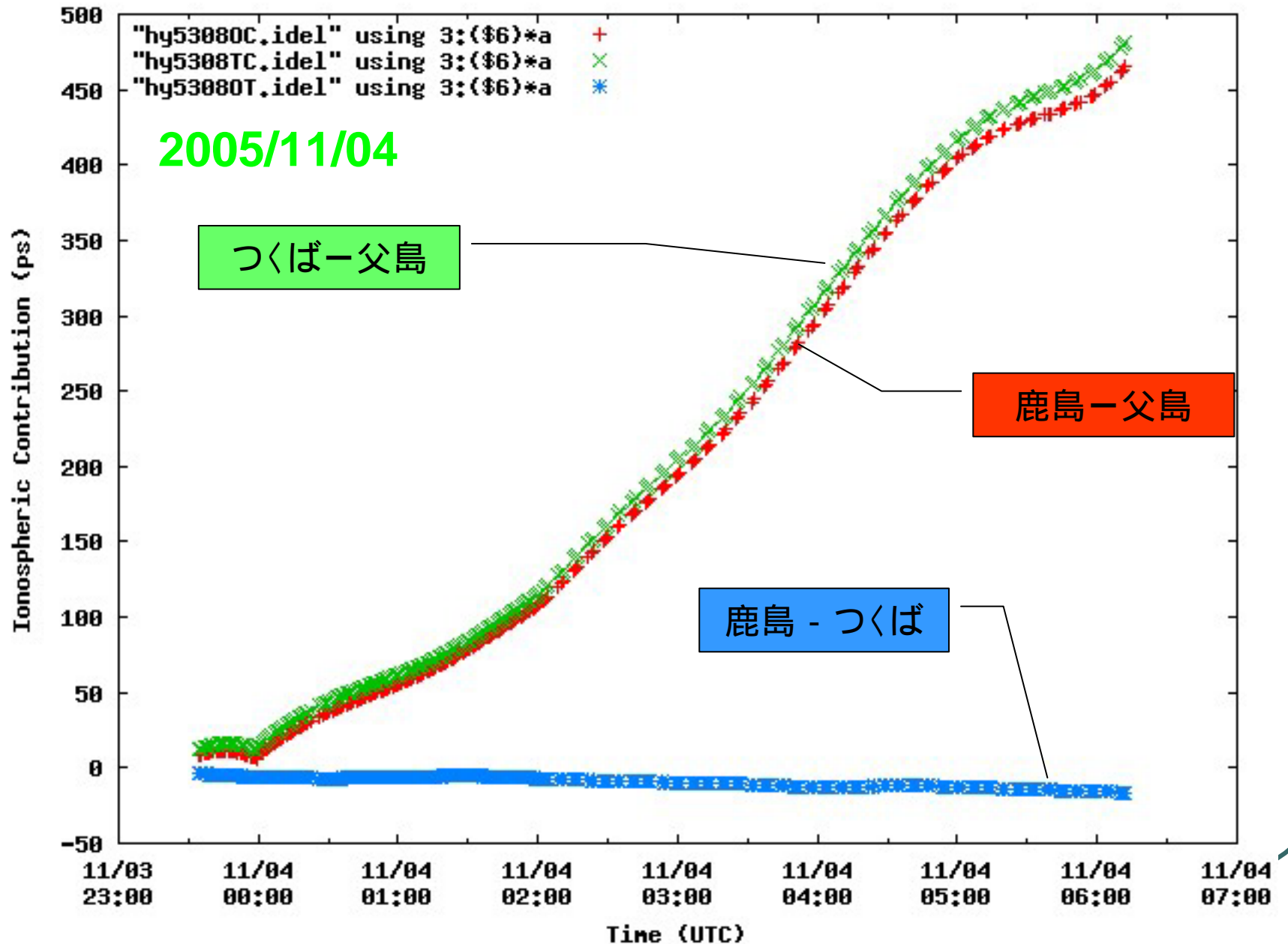


$$\tau_{QSO}^O - \tau_{QSO}^C = \tau_{clock} + \tau_{atm} + \tau_{ION} + \dots$$



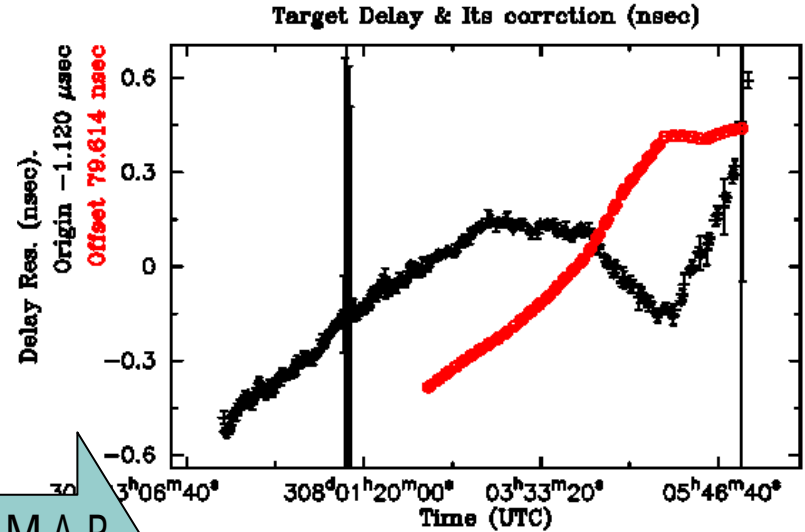
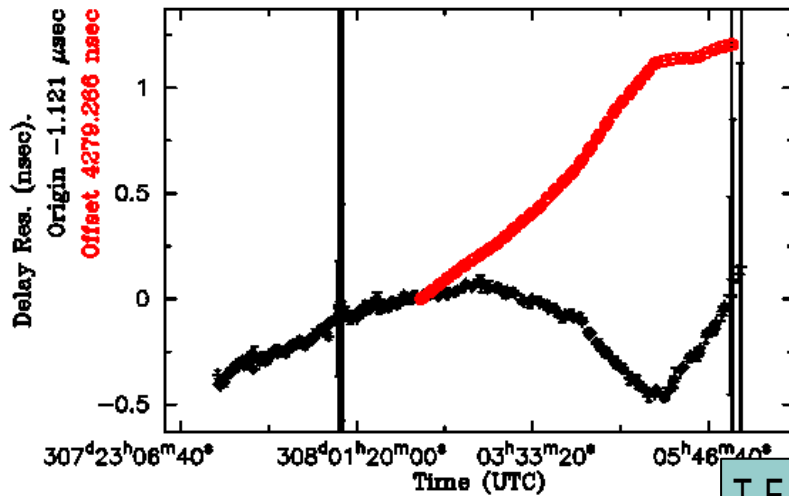
$$(\tau_{HYBS}^O - \tau_{HYBS}^C) - (\tau_{QSO}^O - \tau_{QSO}^C) = \Delta\tau^{Rsd}_{HYBS} - 2\tau_{ION} + \alpha$$

GIM/CODEを使って計算された電離層遅延量 (HAYABUSA)

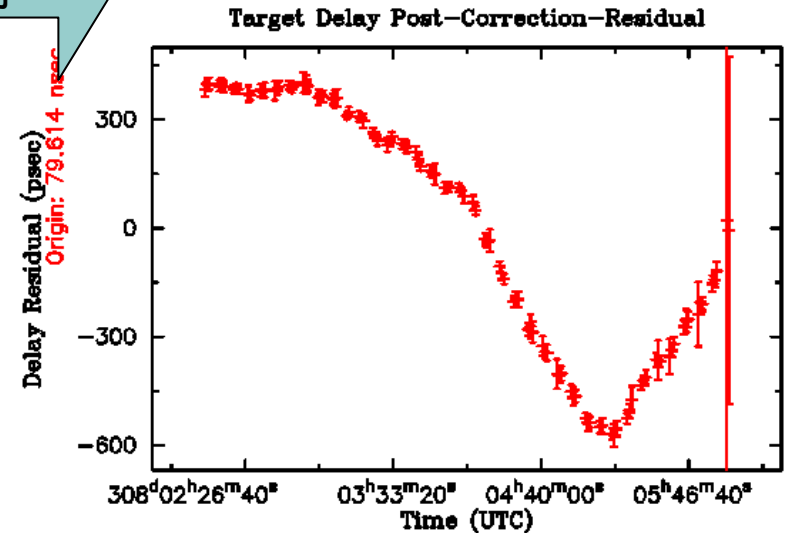
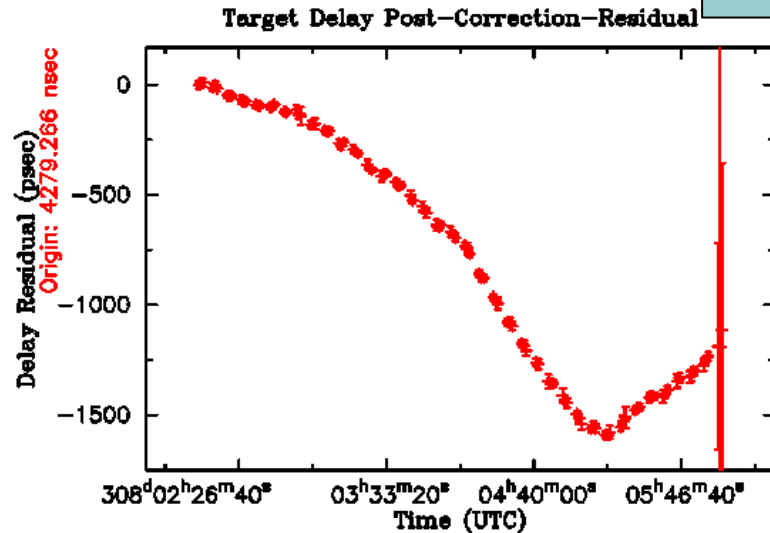


2005/11/4 つくば32-父島11基線

HYBSへのモデル適用 (nsec)



TEC - MAP
適用



$$\tau = \tau_0 + \dot{\tau}(t - t_0) - \tau_{atm,x} fm(El_x) + \tau_{atm,y} fm(El_y)$$

マルチエポック折れ線

Summary

- 2005年11月のHAYABUSA観測
 - 高い遅延分解能を得るため位相遅延量を使用。
 - 高い軌道予報値により位相の不定性を0と仮定。
 - HAYABUSAの位相遅延量をクエーサの群遅延量により補正
- **結果**
 - VLBIによる、幾何学的遅延量の計測精度を数百psec程度達成。 JPLのDDORと同程度
- **課題**
 - 信号の帯域幅 = > 群遅延
 - VLBIの補正方法の改善: 位相遅延一位相遅延