

Itokawa 接近時の HAYABUSA
の相対 VLBI 観測による
遅延補正精度の評価

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

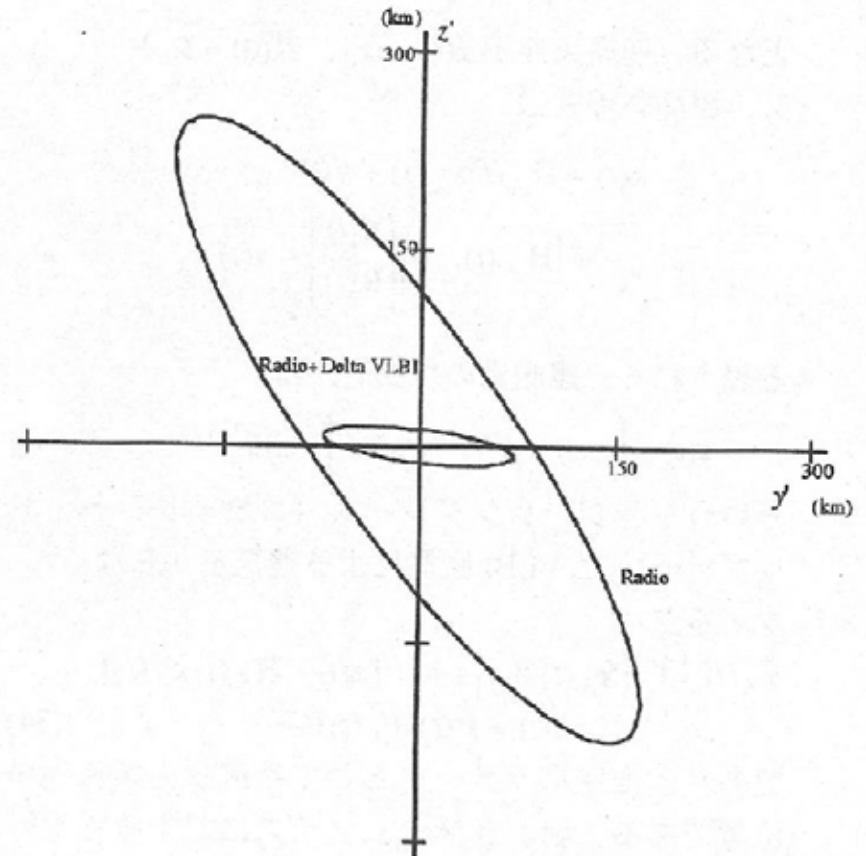
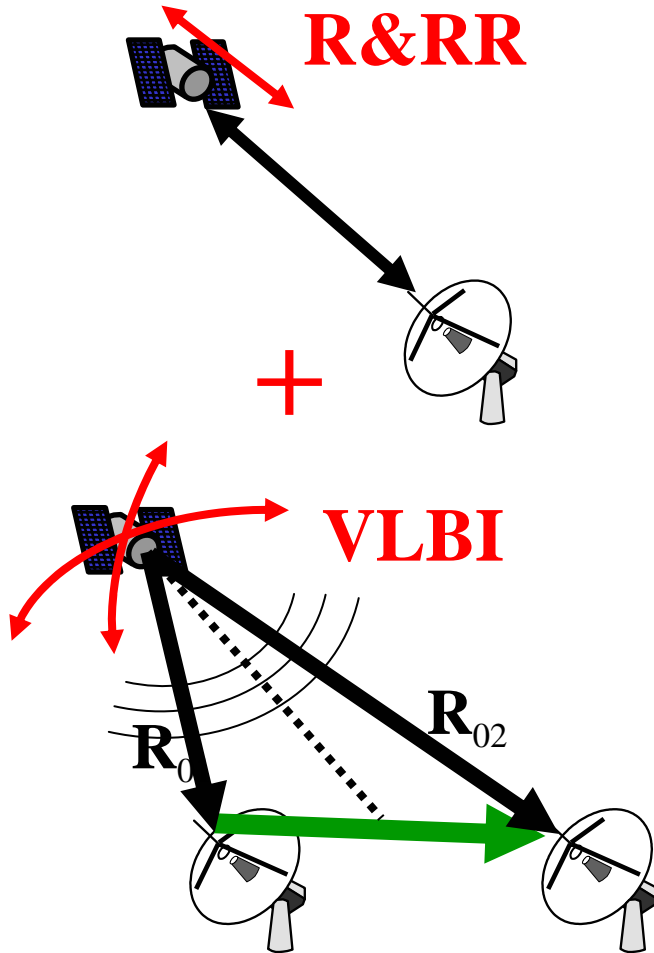


Fig. 7 誤差楕円

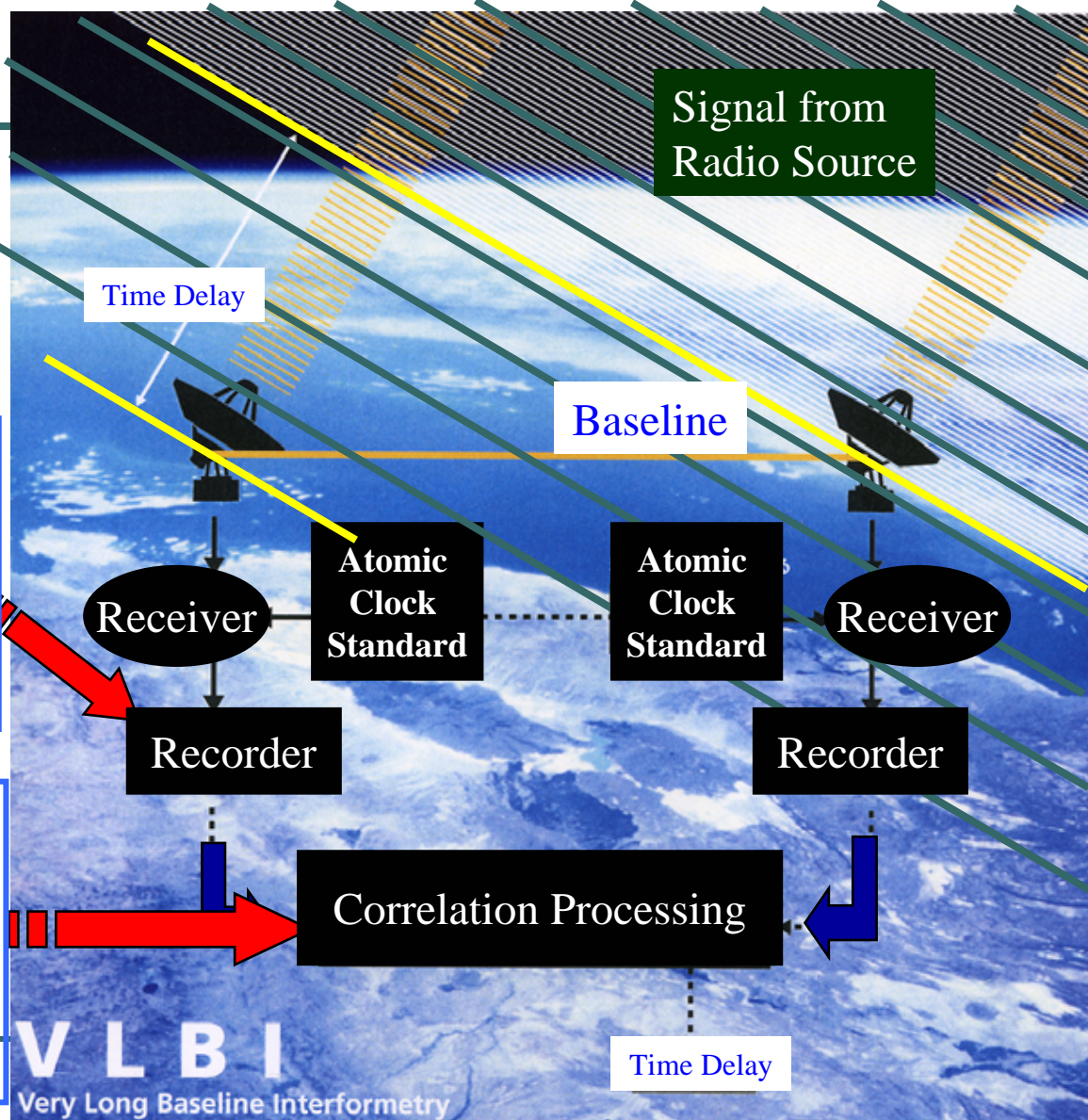
VLBI = Very Long Baseline Interferometry



Radio Telescope



Atomic Time Standard (H-maser)



Huge Volume Data Recording



Correlator

VLBI
Very Long Baseline Interferometry

Outline

- これまでのHAYABUSAの観測について
 - 群遅延精度 \leq 信号帯域幅
 - 基線長 \leq 国内基線
- HAYABUSAのイトカワへのタッチダウン(2005年11月)
 - 位相遅延量による**高精度の遅延計測**ができる絶好の機会
 - => VLBIの遅延量(大気・クロック)補正精度(確度)の評価

遅延計測の
精度制約

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

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

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

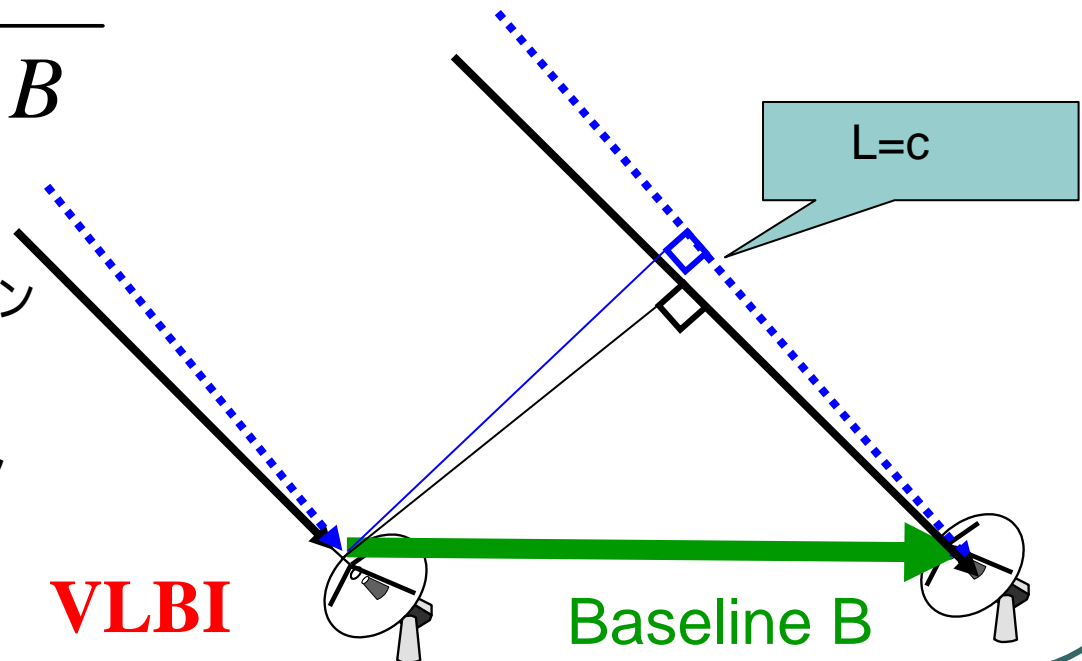
遅延精度:
基線長: B
確度分解能:
光速: c

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

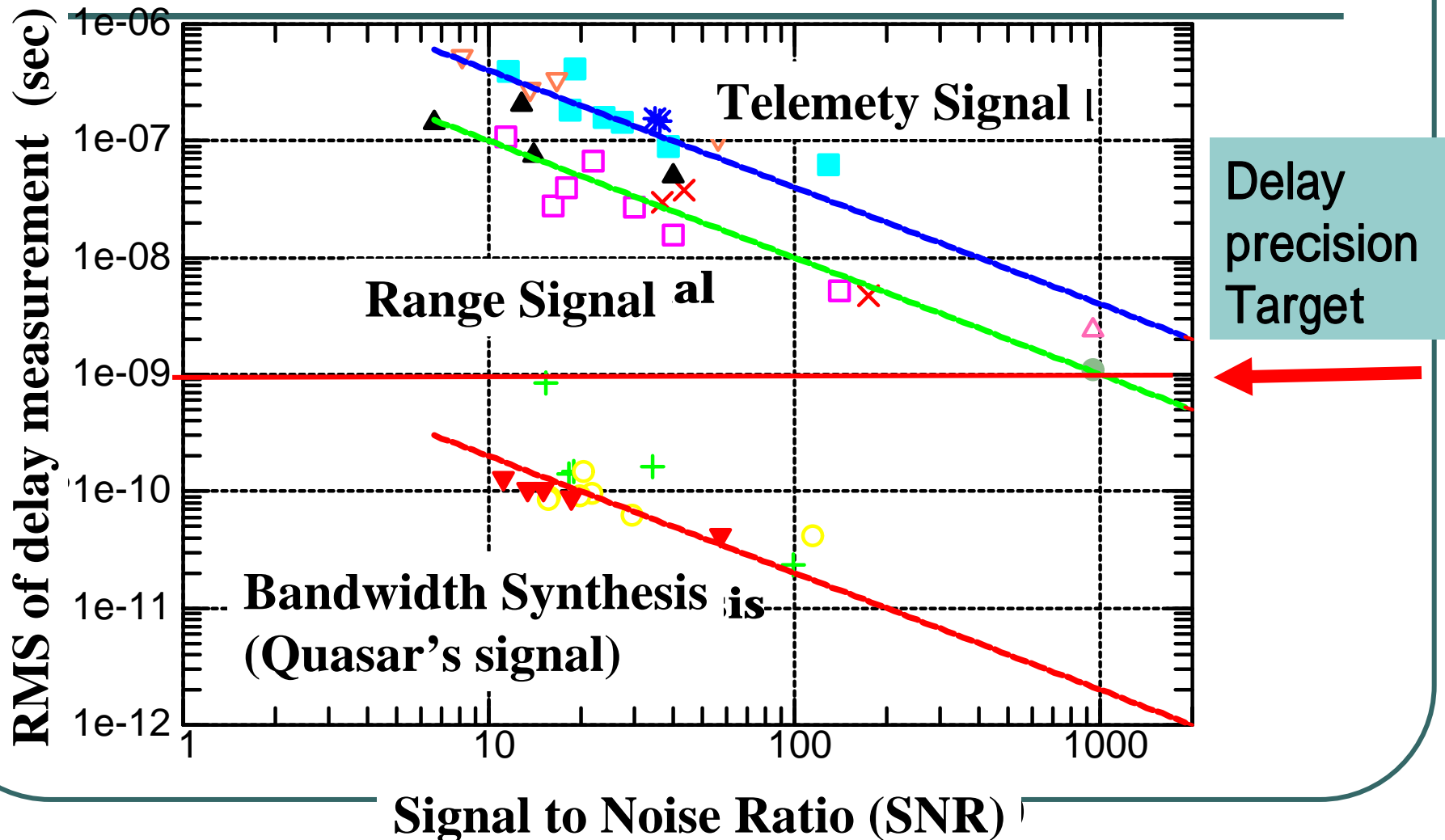
Baseline B



群遅延計測精度

Hayabusa Observations
In May /30 ~ July 4 2005

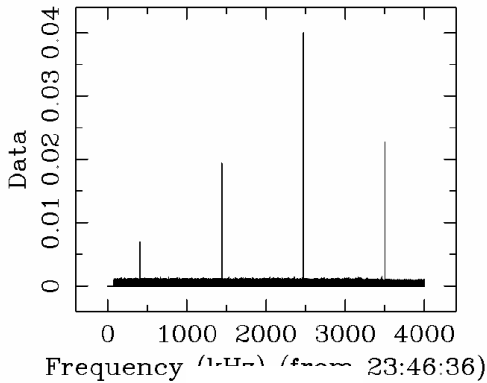
$$\sigma_{\tau} = \frac{A}{(SNR \times EffectiveBandwidth)}$$



VLBI 観測量: 群遅延

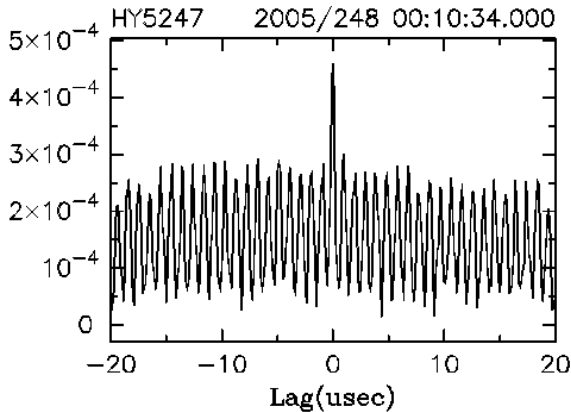
DDOR signal

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



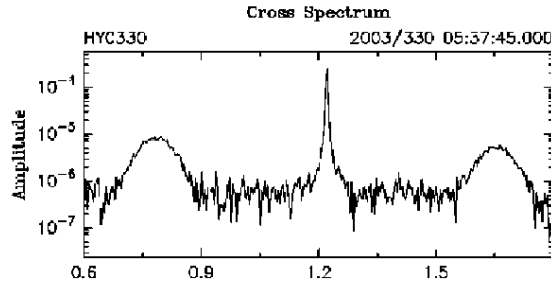
← 4 MHz →

Fringe



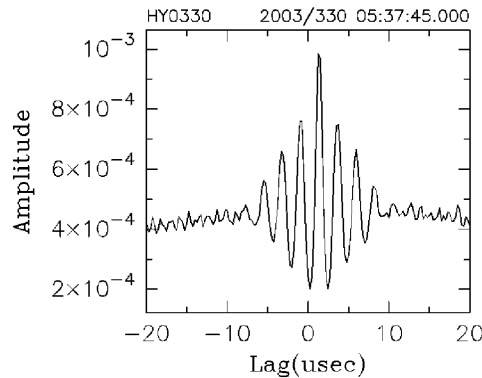
Effective Bandwidth
450kHz

Range signal



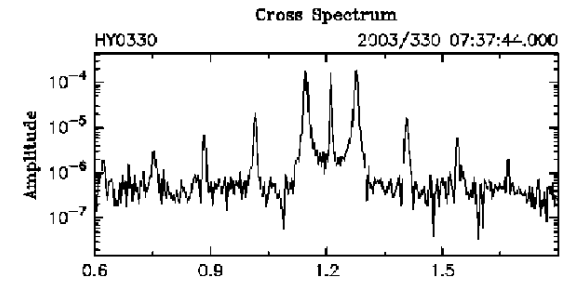
← 1MHz →

Fringe



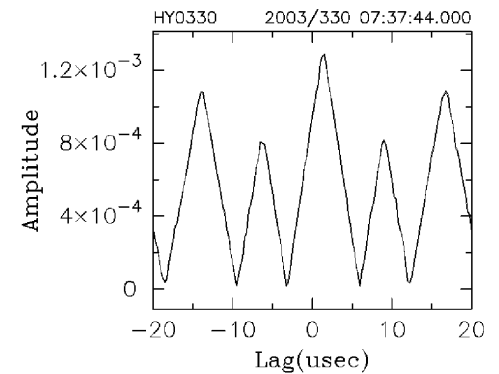
Effective Bandwidth
100kHz

Telemetry Signal

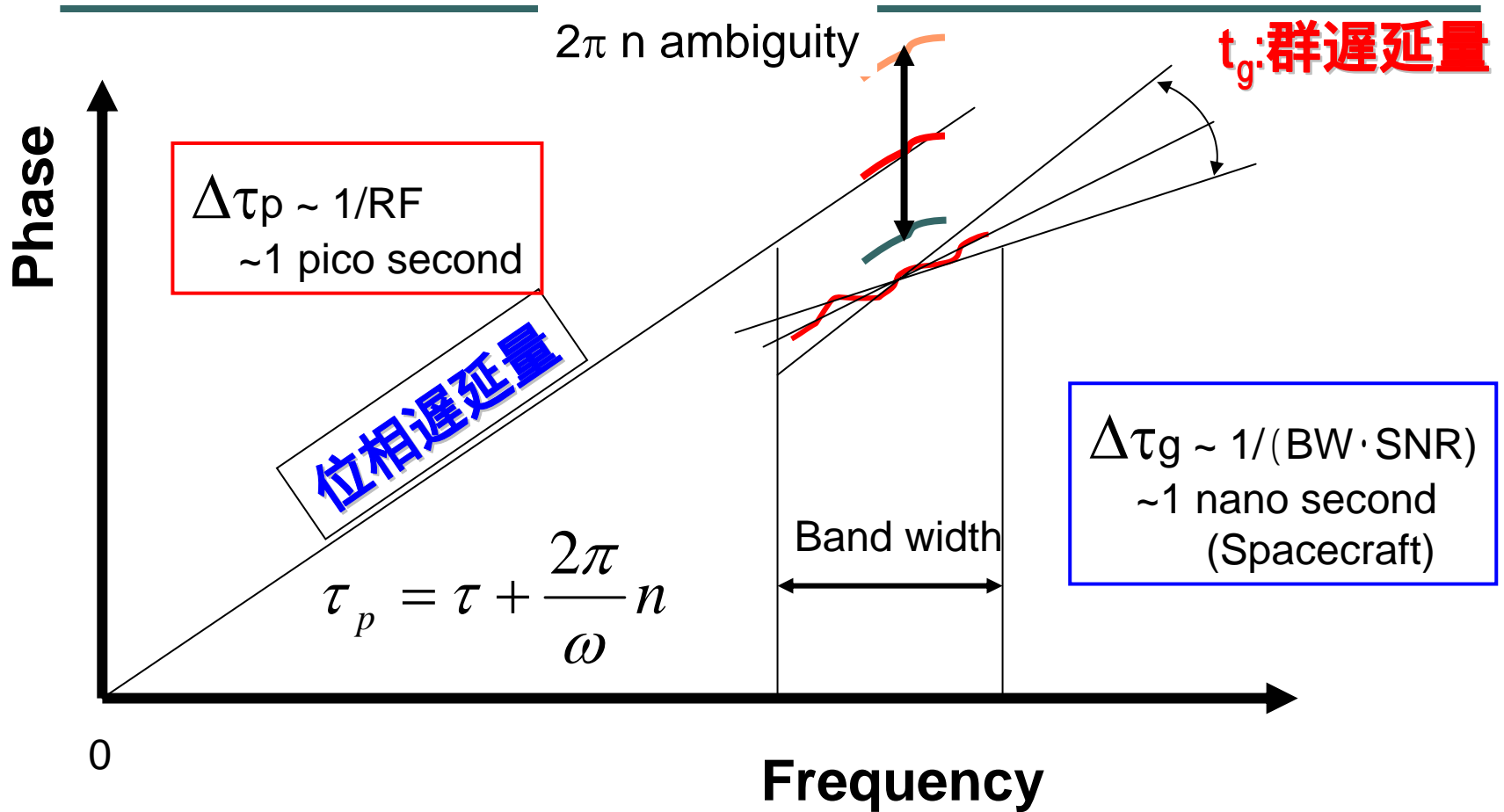


← 1MHz →

Fringe

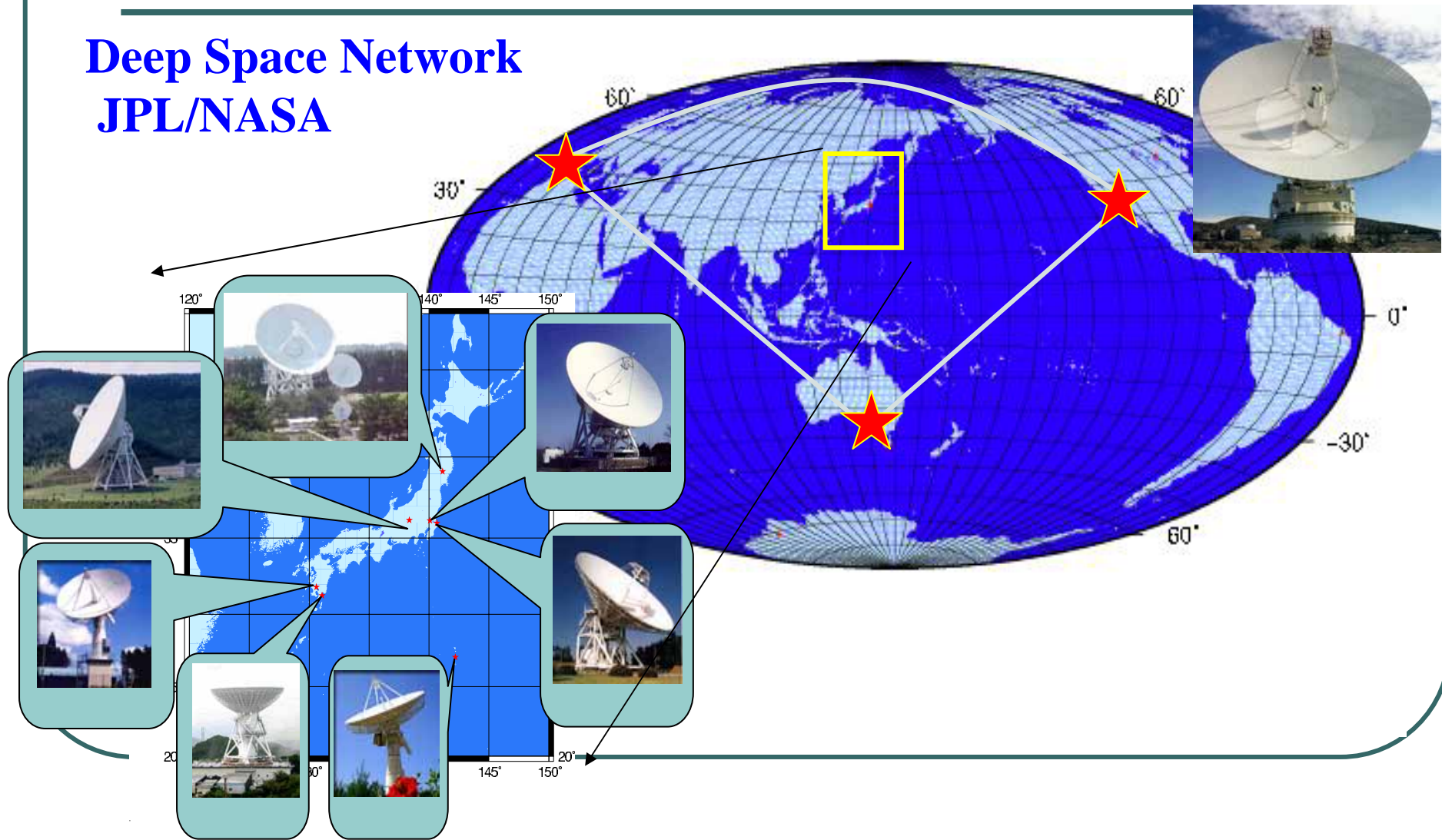


VLBI 觀測量: 群遲延 & 位相遲延

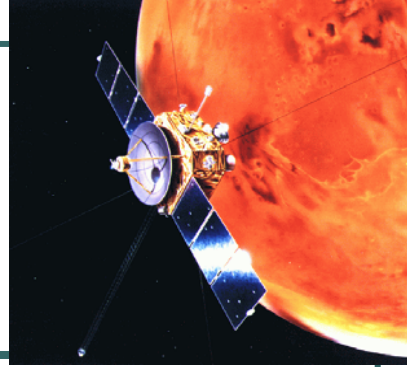


Deep Space Network and Japanese Domestic VLBI stations

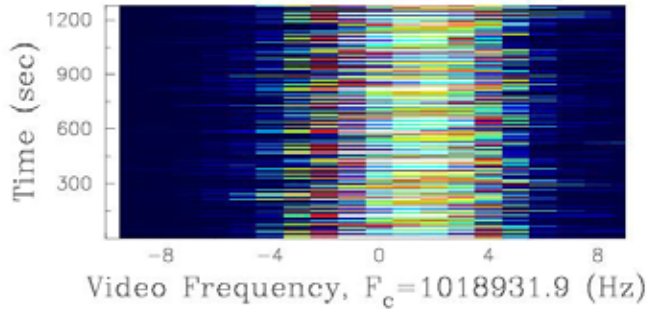
Deep Space Network JPL/NASA



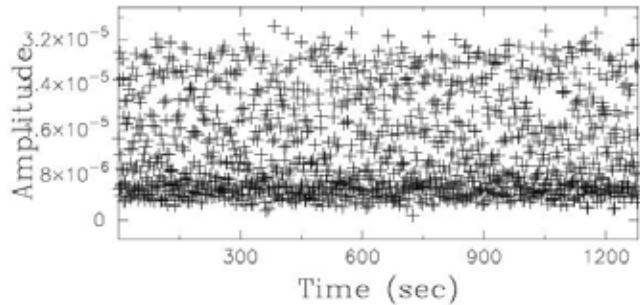
Alternative Choice: 位相遅延量



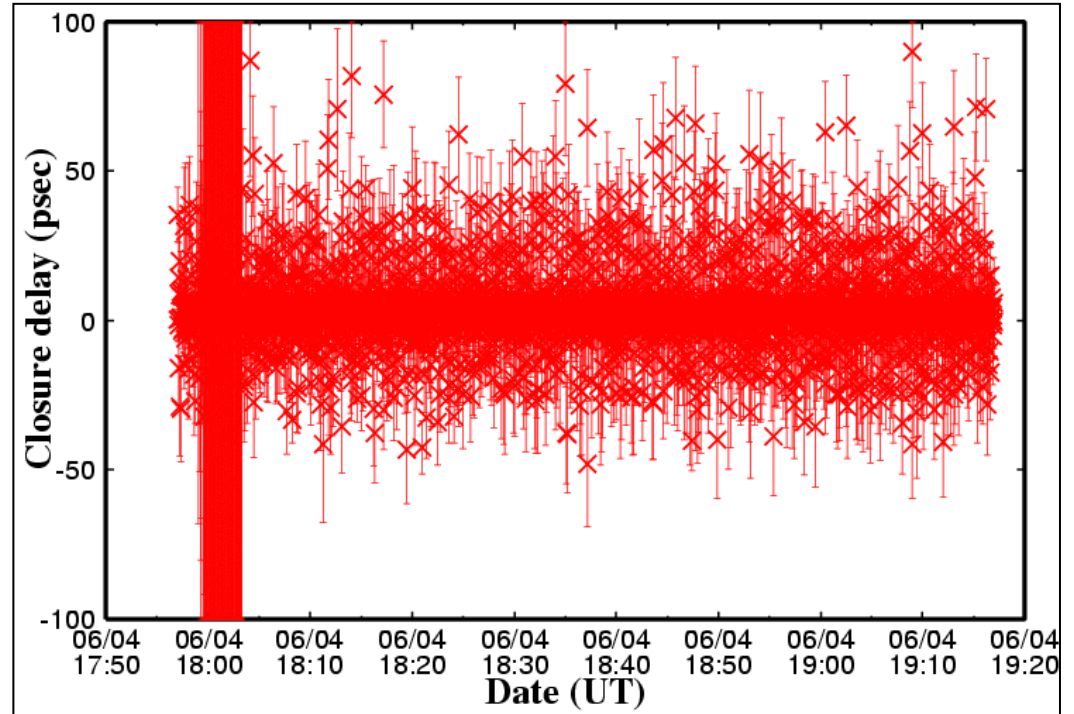
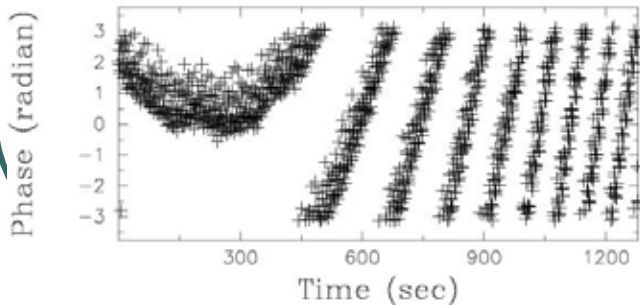
Dynamic Cross Spectrum: Rate Corrected ch=1



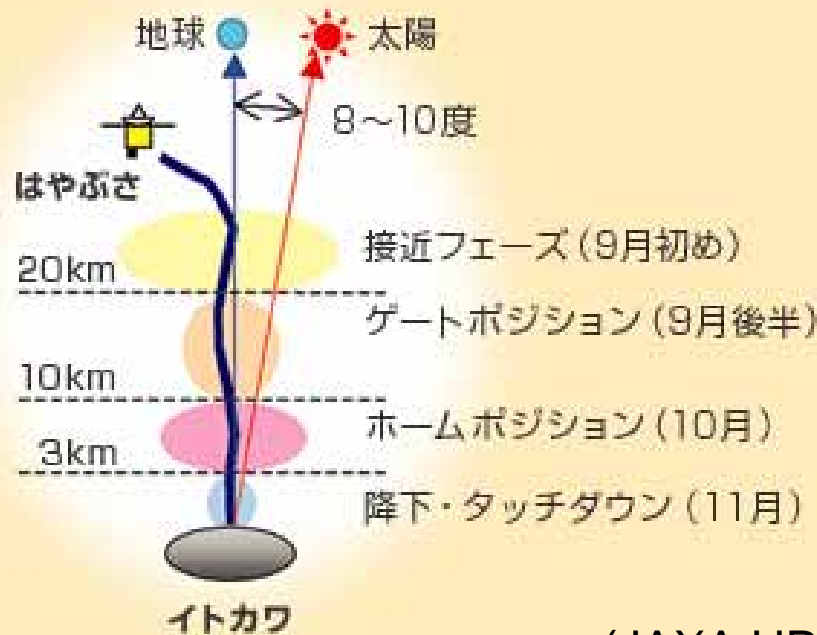
Dynamic Cross Spectrum: Rate Corrected ch=1



Dynamic Cross Spectrum: Rate Corrected ch=1



Hayabusa's Touchdown Approach to ITOKAWA in Nov. 2005

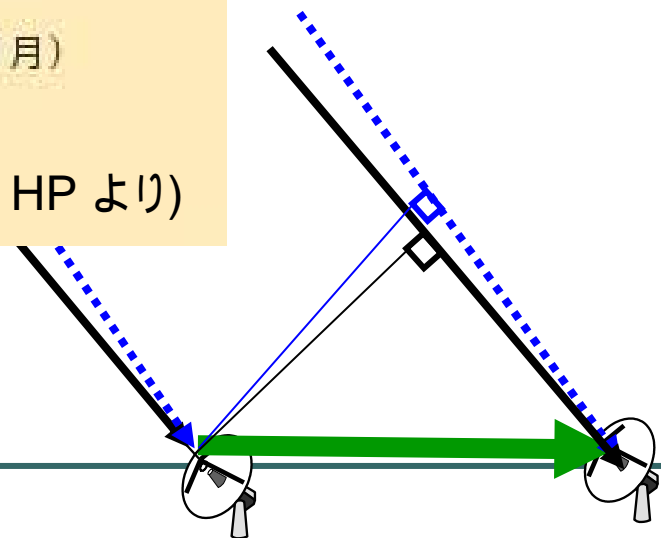


- VLBI Observation
- Nov. 4th
 - Nov. 12th
 - Nov. 19th
 - Nov. 25th

(JAXA HP より)

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

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



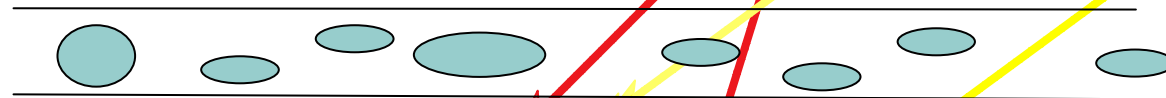
Delta-VLBI is for Calibration of Atmosphere, Clock offset

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

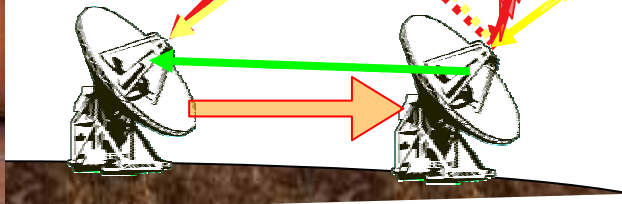


Ionosphere

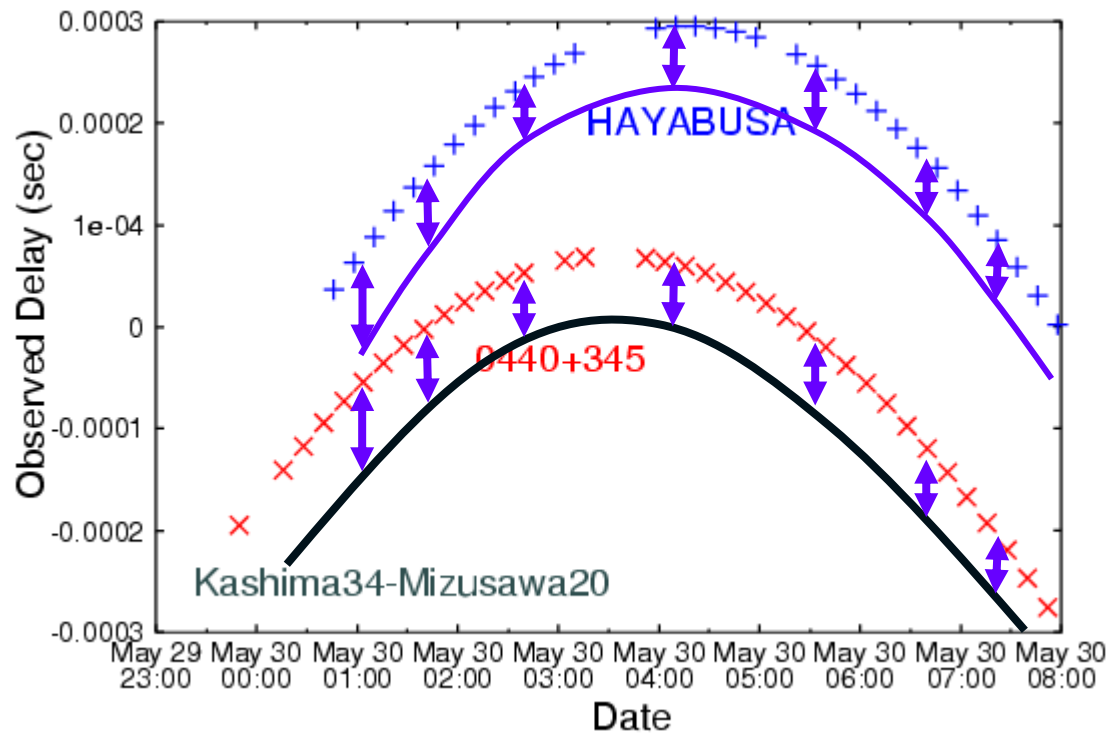
Atmosphere



Atomic
Clock
(H-Maser)

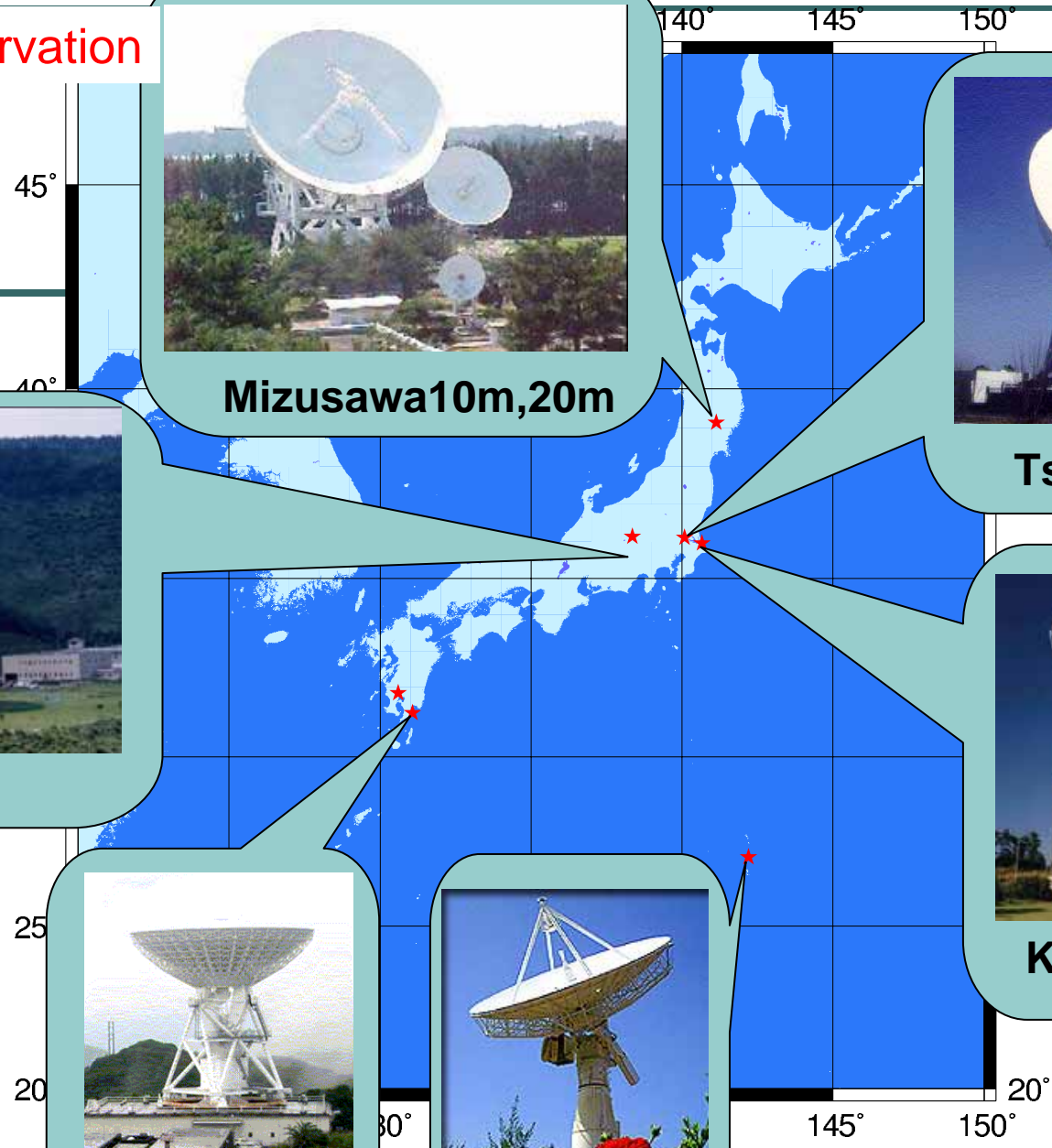


Delta-VLBI: データ処理の手順



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

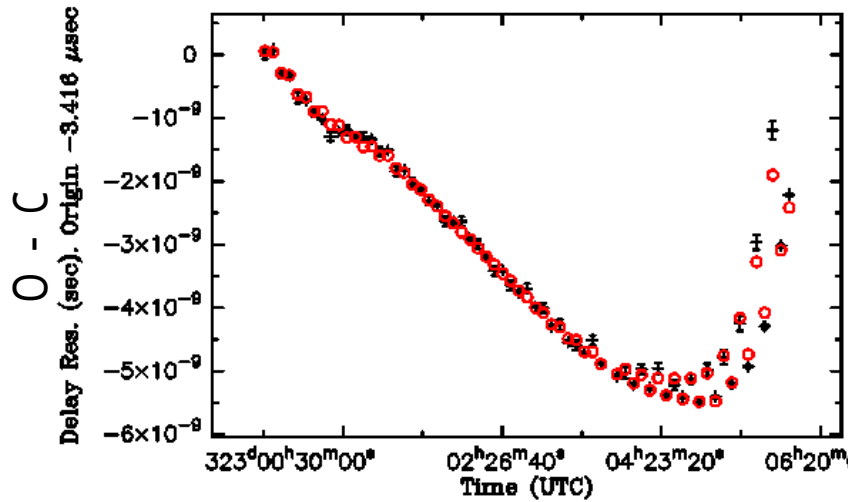
O:Kashima34, T:Tsukuba32m, C: Chichijima10m, M: Mizusawa 20m

VLBIによる遅延量の補正

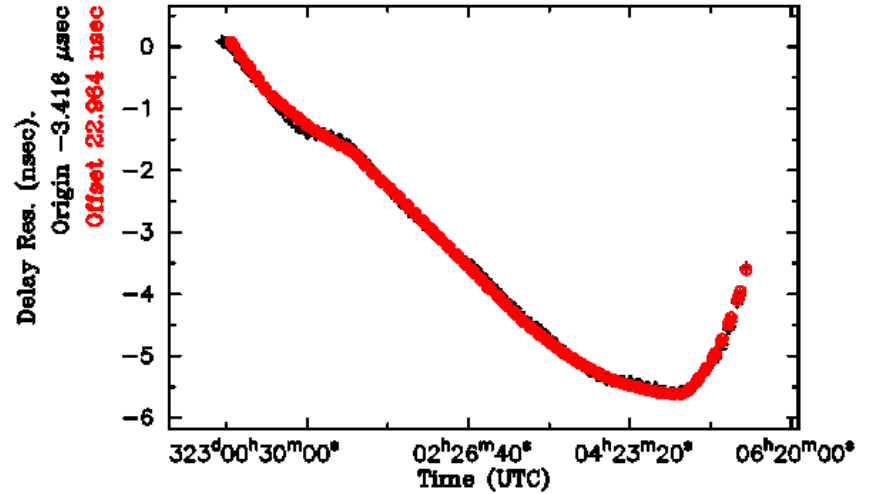
VLBIによりどの程度の精度(確度)で遅延量が計測できるか？

2005/11/19 鹿島34-水沢20基線

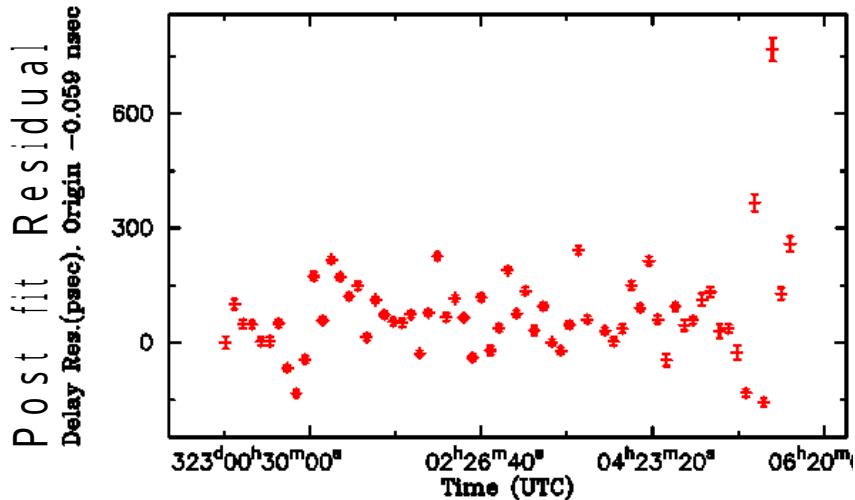
基準電波源へのモデルフィット



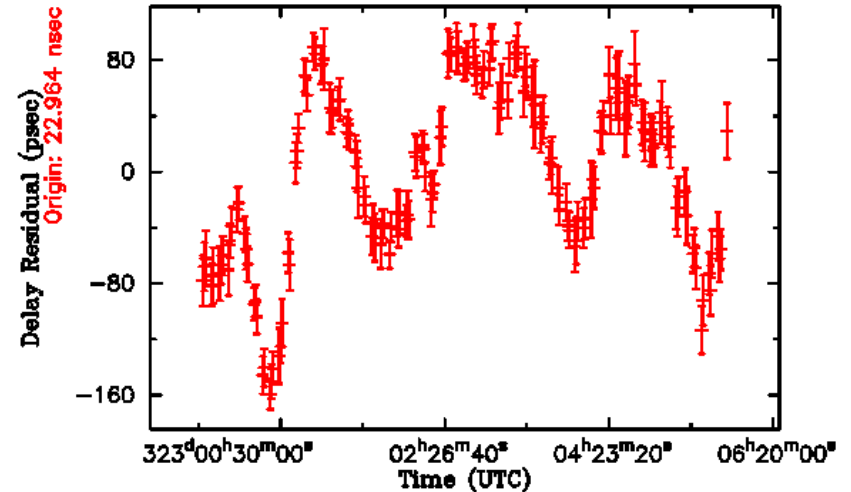
HYBSへのモデル適用 (nsec)



Reference Delay Post-Fit-Residual



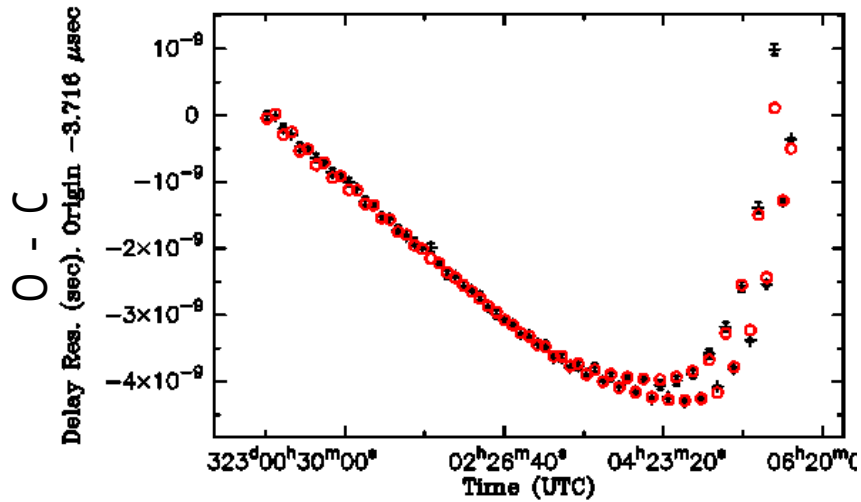
Target Delay Post-Correction-Residual



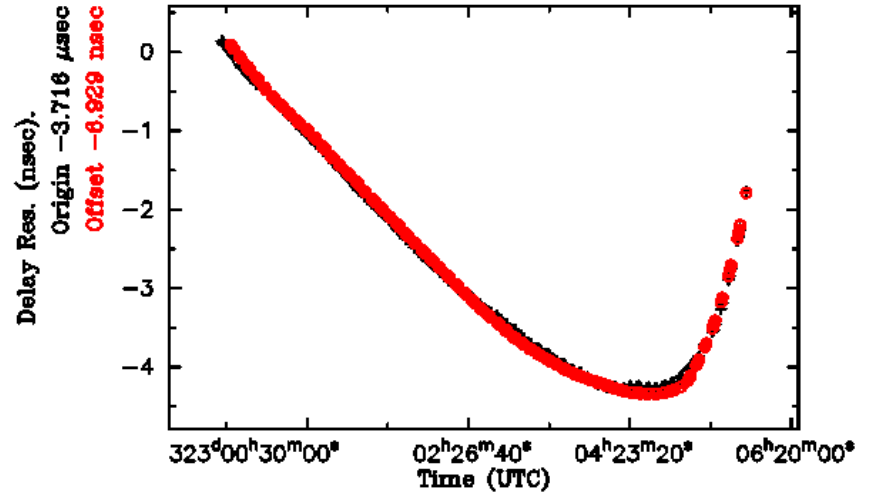
$$\tau = \tau_0 + \dot{\tau}(t - t_0) - \tau_{atm,x} fm(El_x) + \tau_{atm,y} fm(El_y)$$

2005/11/19 つくば32-水沢20基線

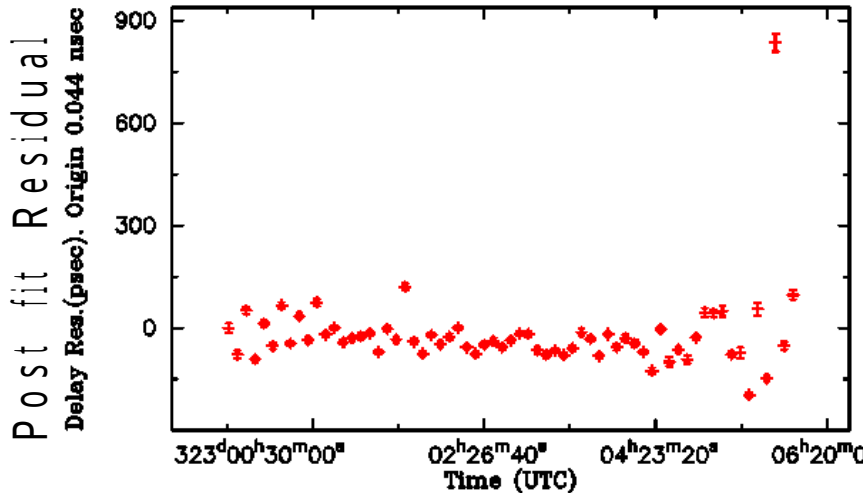
基準電波源へのモデルフィット



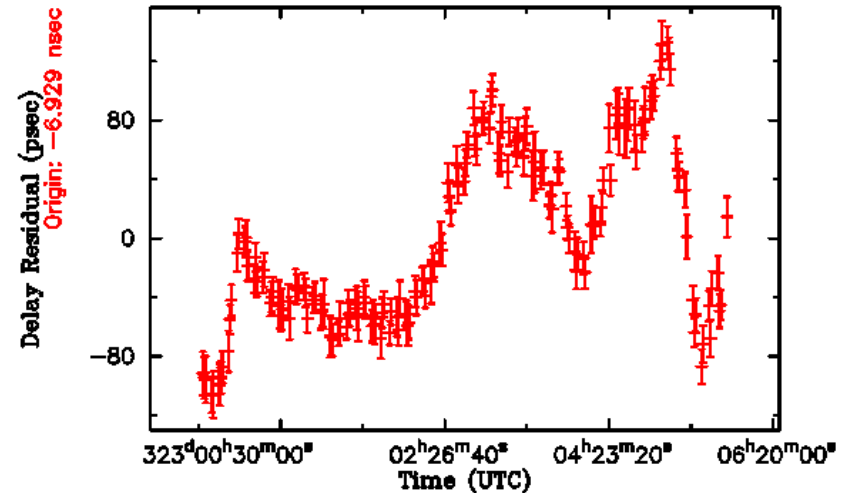
HYBSへのモデル適用 (nsec)



Reference Delay Post-Fit-Residual



Target Delay Post-Correction-Residual



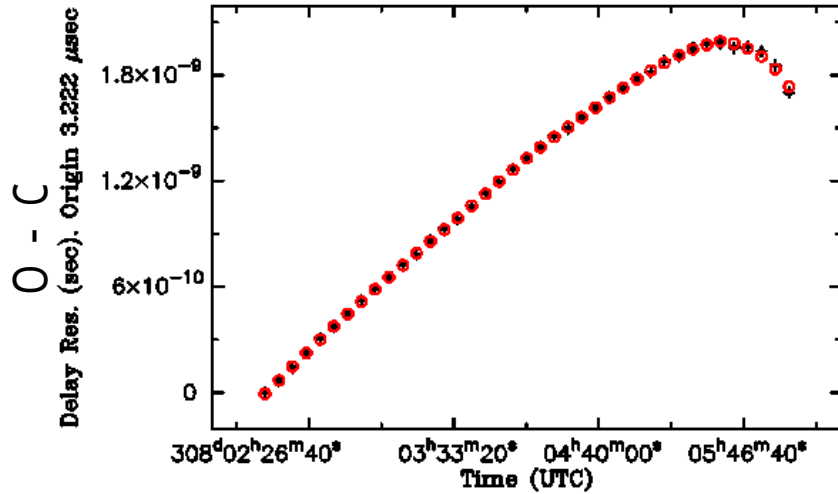
$$\tau = \tau_0 + \dot{\tau}(t - t_0) - \tau_{atm,x} fm(El_x) + \tau_{atm,y} fm(El_y)$$

マルチエポック折れ線

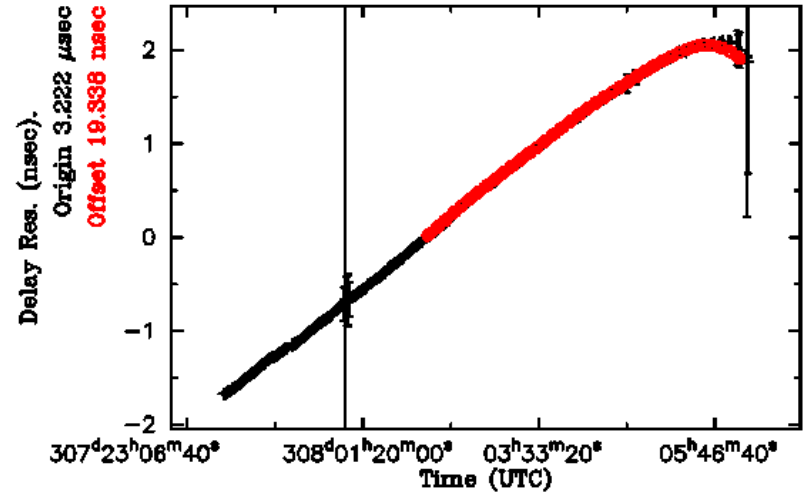
2005/11/4 鹿島34-つくば32基線

大気補正に
地上THP使用

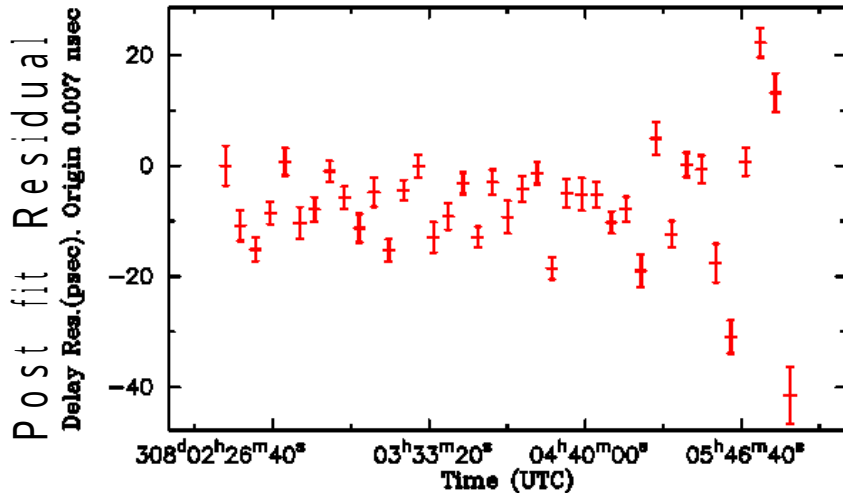
基準電波源へのモデルフィット



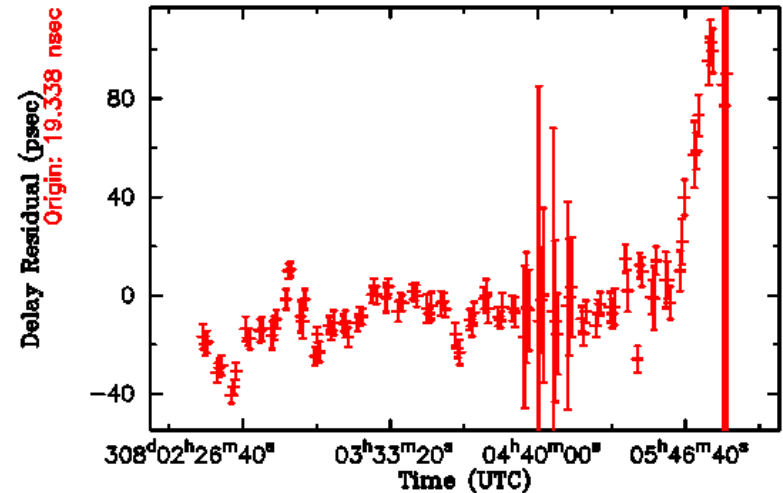
HYBSへのモデル適用 (nsec)



Reference Delay Post-Fit-Residual



Target Delay Post-Correction-Residual

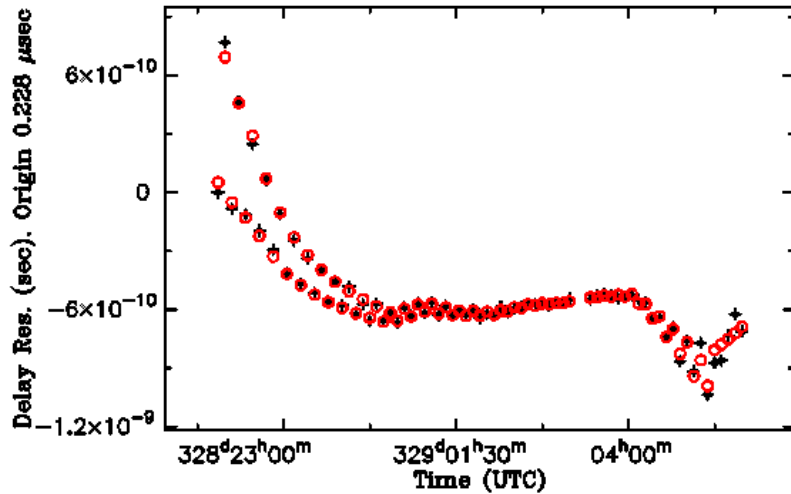


$$\tau = \tau_0 + \dot{\tau}(t - t_0) - \tau_{atm,x} fm(El_x) + \tau_{atm,y} fm(El_y)$$

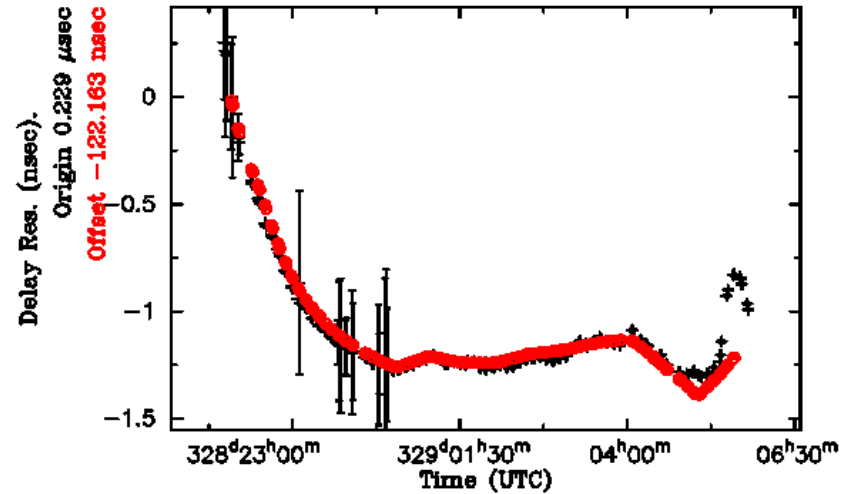
マルチエポック折れ線

2005/11/25 鹿島34-つくば32基線

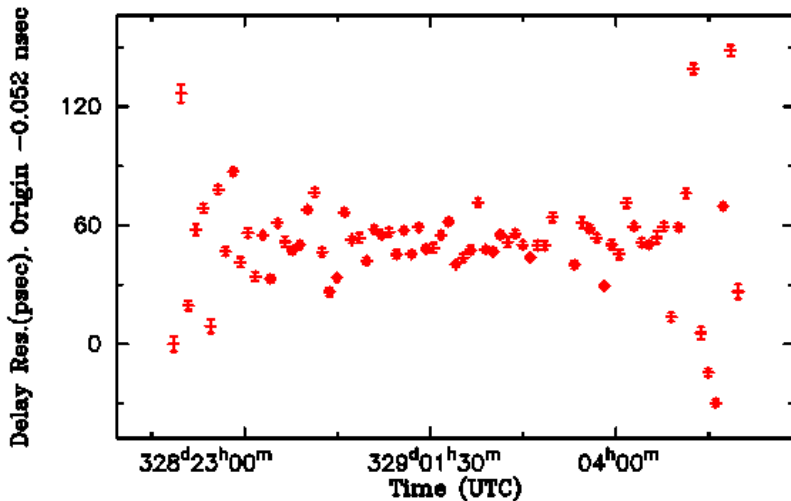
基準電波源へのモデルフィット



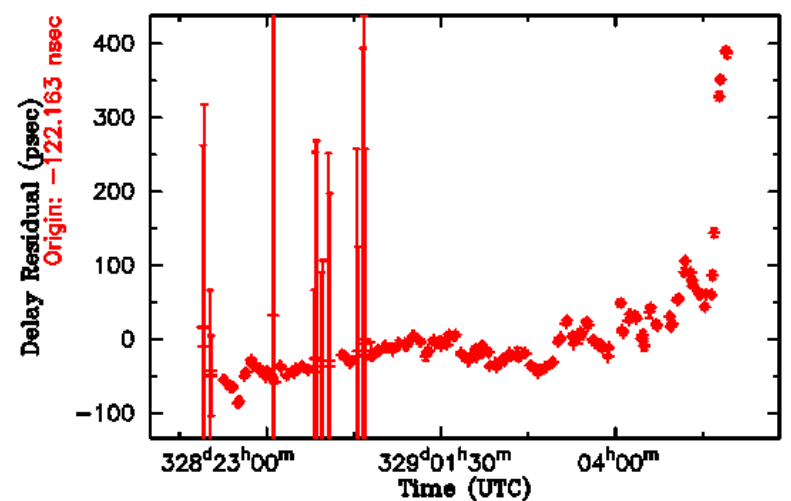
HYBSへのモデル適用 (nsec)



Reference Delay Post-Fit-Residual



Target Delay Post-Correction-Residual



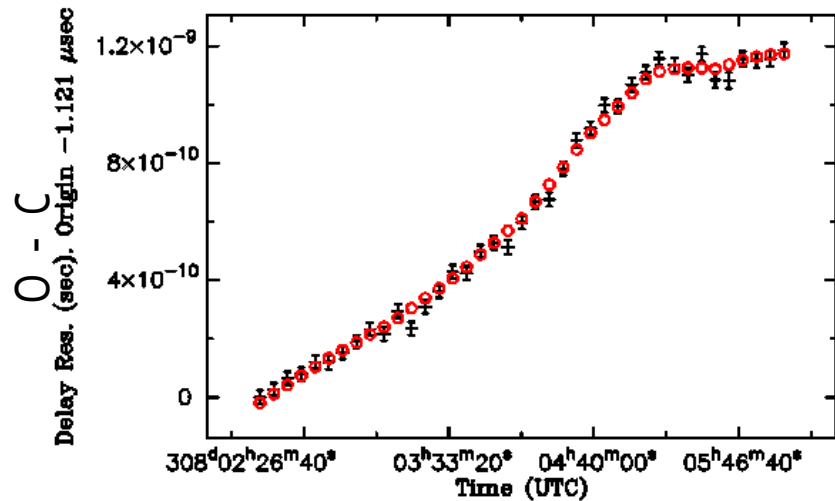
$$\tau = \tau_0 + \dot{\tau}(t - t_0) - \tau_{atm,x} fm(El_x) + \tau_{atm,y} fm(El_y)$$

マルチエポック折れ線

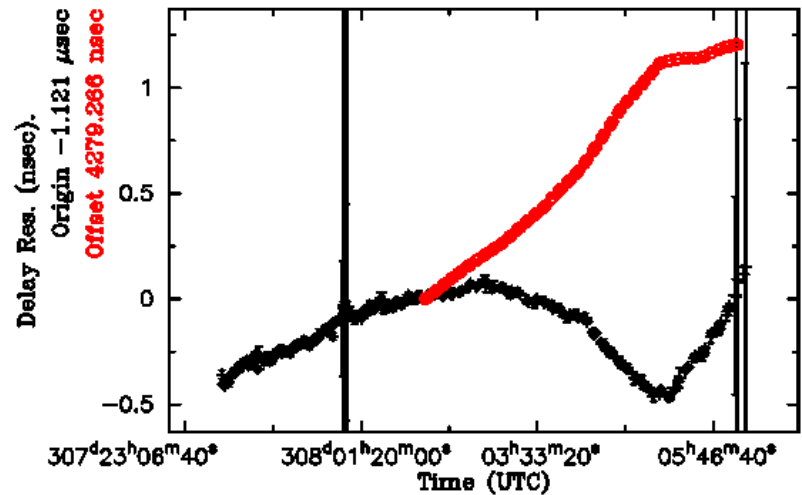
2005/11/4 つくば32-父島11基線

大気補正に
地上THP使用

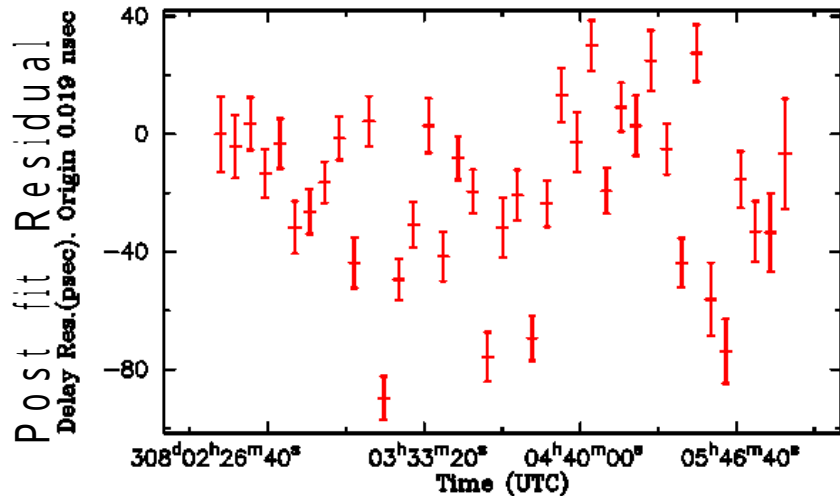
基準電波源へのモデルフィット



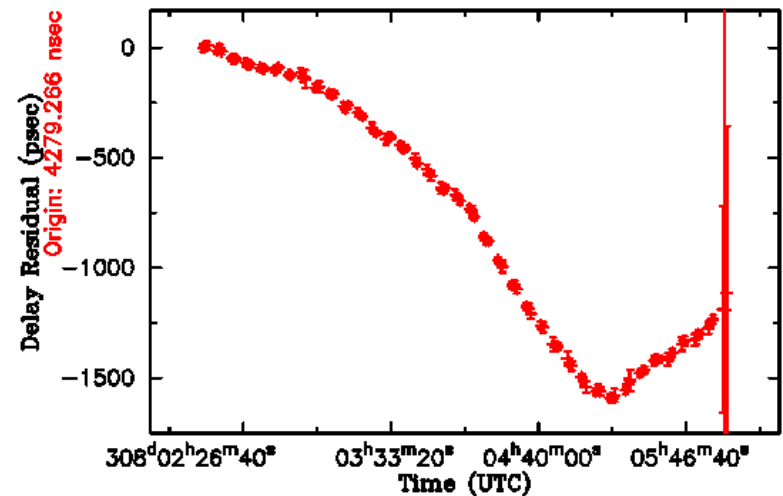
HYBSへのモデル適用 (nsec)



Reference Delay Post-Fit-Residual



Target Delay Post-Correction-Residual



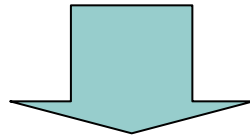
$$\tau = \tau_0 + \dot{\tau}(t - t_0) - \tau_{atm,x} fm(El_x) + \tau_{atm,y} fm(El_y)$$

マルチエポック折れ線

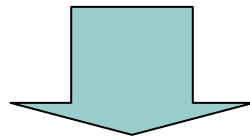
Delta-VLBI: データ処理の手順

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

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

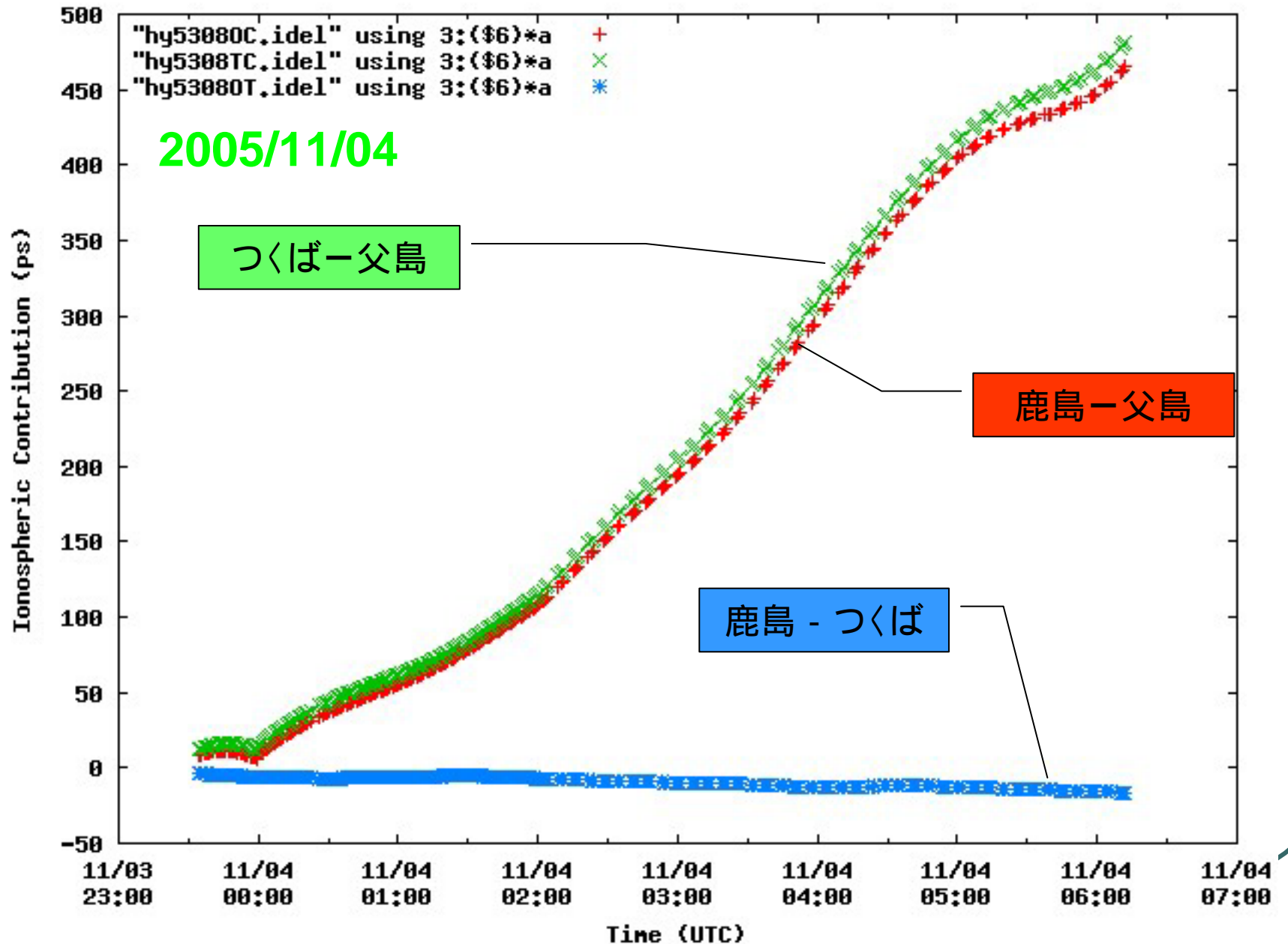


$$\tau_{QSO}^O - \tau_{QSO}^C = \tau_{clock} + \tau_{atm} + \tau_{ION} + \dots$$



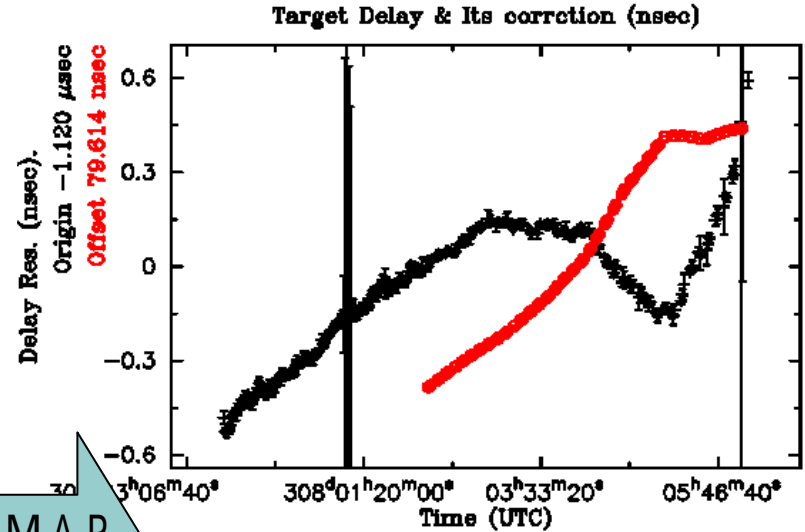
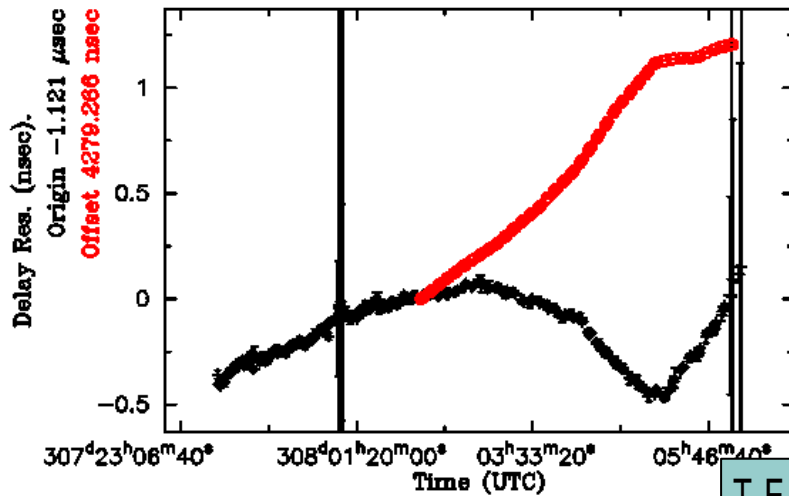
$$(\tau_{HYBS}^O - \tau_{HYBS}^C) - (\tau_{QSO}^O - \tau_{QSO}^C) = \Delta\tau^{Rsd}_{HYBS} - 2\tau_{ION} + \alpha$$

GIM/CODEを使って計算された電離層遅延量(HAYABUSA)

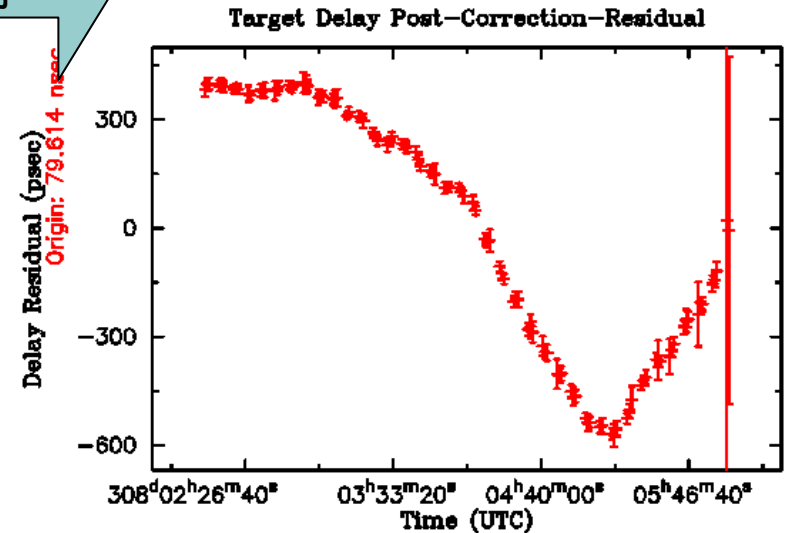
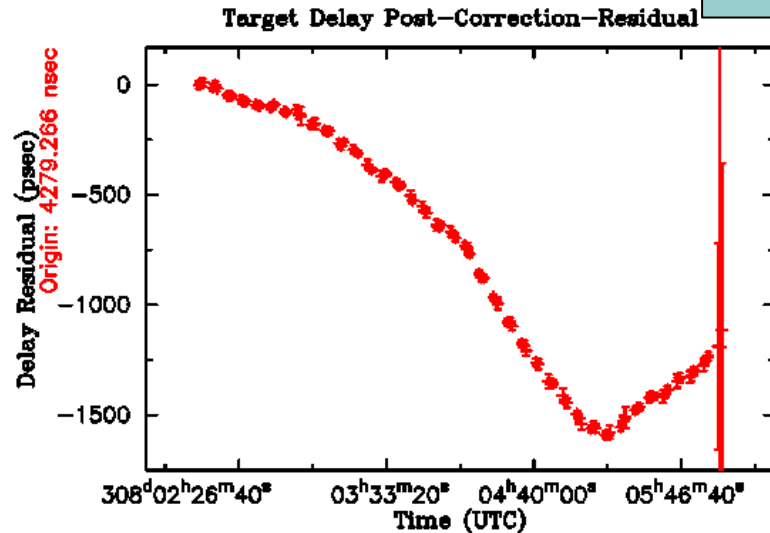


2005/11/4 つくば32-父島11基線

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

クエーサのフリンジ位相

