

V懇 将来計画WG 測地・地球（太陽系）

題目：内核自由章動の検出を目指した高感度時空計測の構築にむけて
Quest for spatial measurement with microsecond accuracy.

これで良いか？
流体核自由章動のリバイズ等も含まれる

国立天文台 水沢VLBI観測所 寺家孝明
Sep-25, 2020, VERA UM

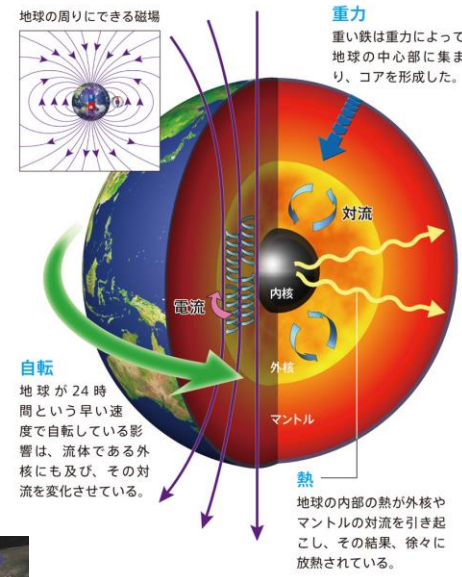
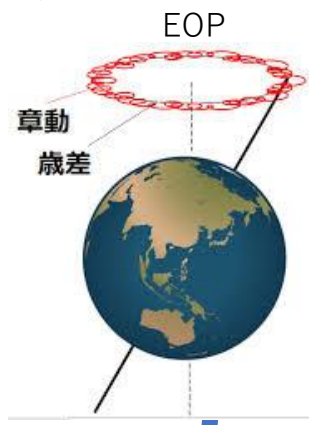
マイクロ秒角の角度計測と波及する観測対象 (この中でEurekaを探求)



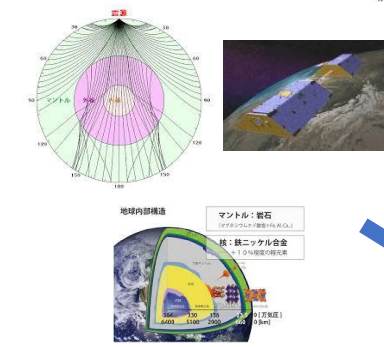
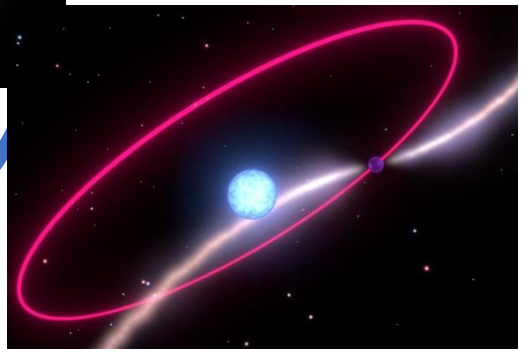
銀河回転—時刻系



慣性系の再定義
太陽系の銀河系内運動再定義



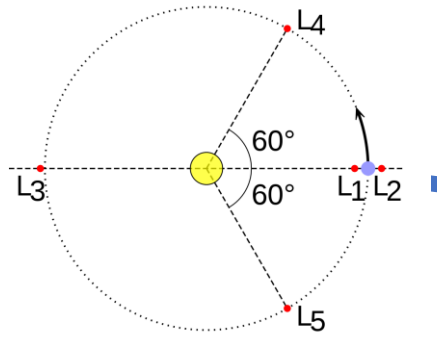
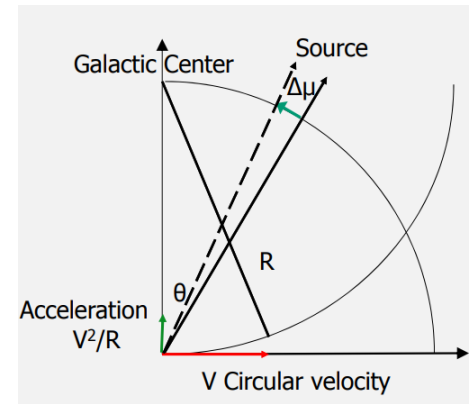
地球内部の形状と運動
地熱史, 地磁気史



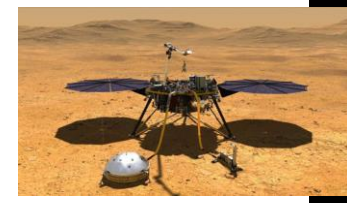
惑星, 衛星の章動・秤動計測, 内部構造, 進化, 熱活動



GA, GA constのリバイズ



人工惑星による太陽系天体の運動計測

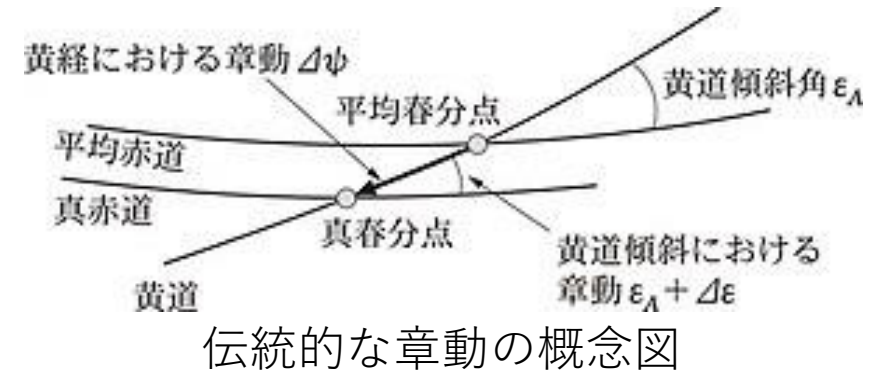
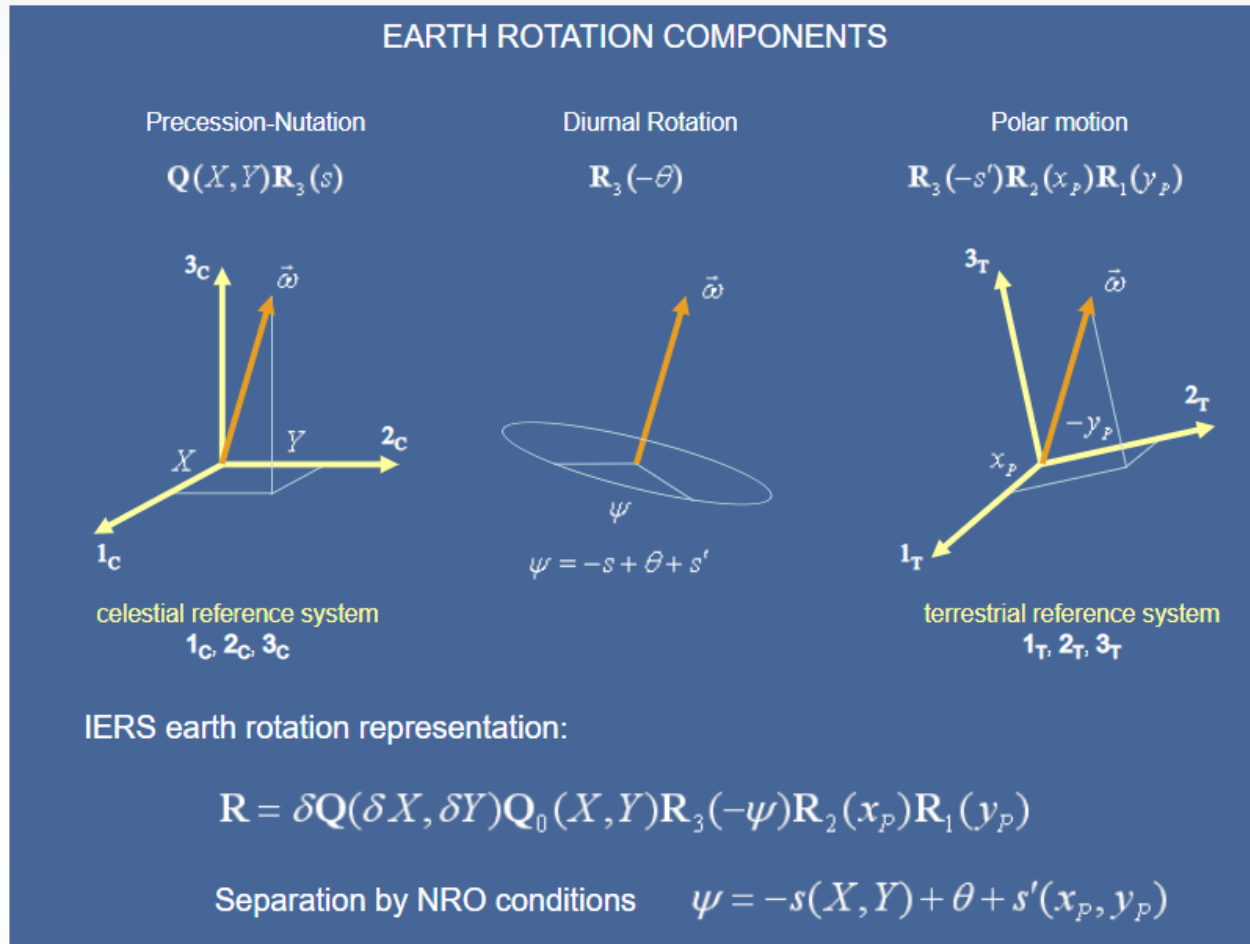


2010年8月21日



2010年11月18日

EOPの表記

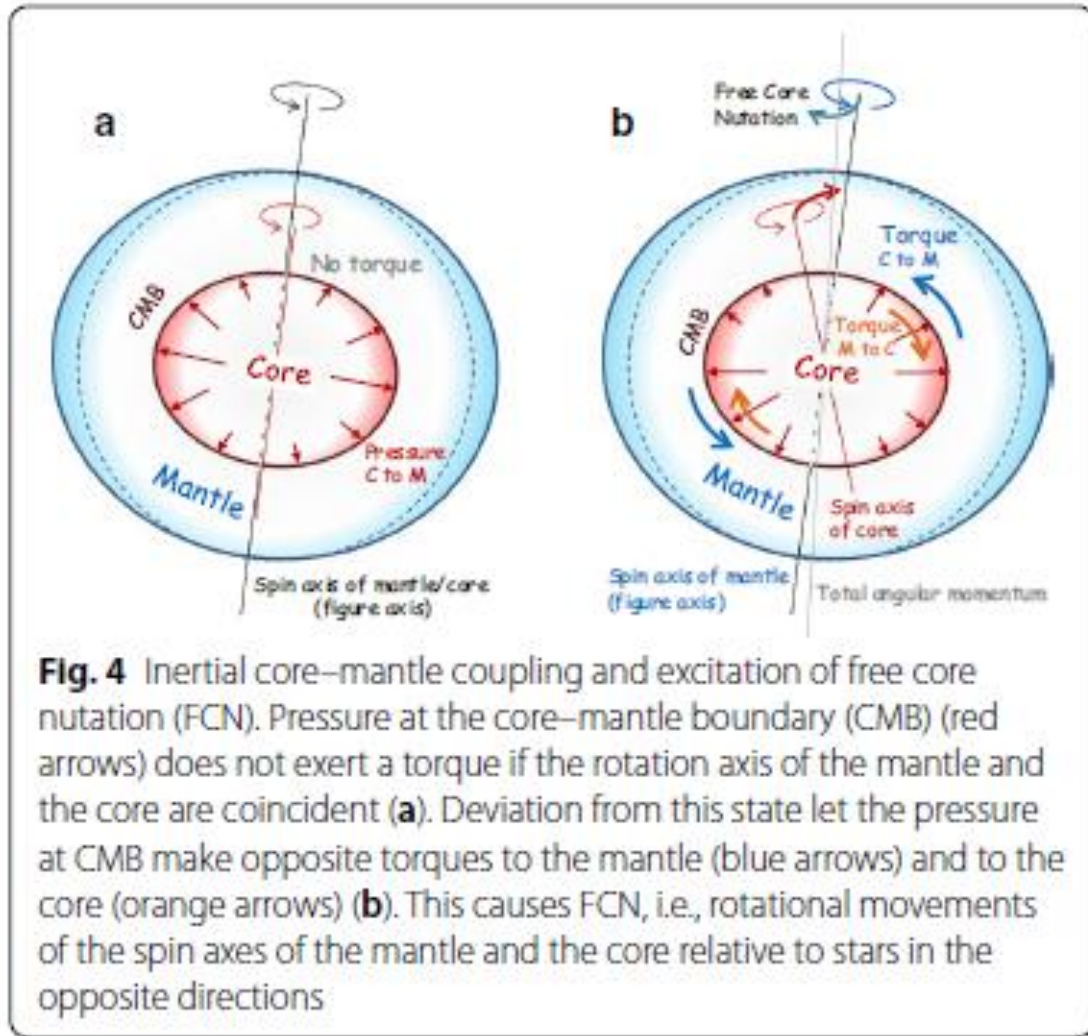


- 伝統的な章動の表し方の場合、 $\delta \psi$ は $\delta \epsilon$ よりも推定感度が落ちる欠点があった。
- CIP（平均黄道面に対する垂線）からの傾きとして表記した結果、 δX と δY は $\delta \epsilon$ （黄道面と赤道面の傾き）とほぼ同じ大きさの感度（位相は逆）で計測できるという利点が生じる。

Dermanis and Tsoulis, 2007, IERS Workshop on Conventions 20-21

- 歳差・章動の実角－予測角はGCRSとGTRSの間の変換マトリクスの中で $\delta Q(\delta X, \delta Y)$ で表される。これはCEPのCIPに対する傾きの偏差。

自由章動 (FCN)



Heki, 2020, EPS

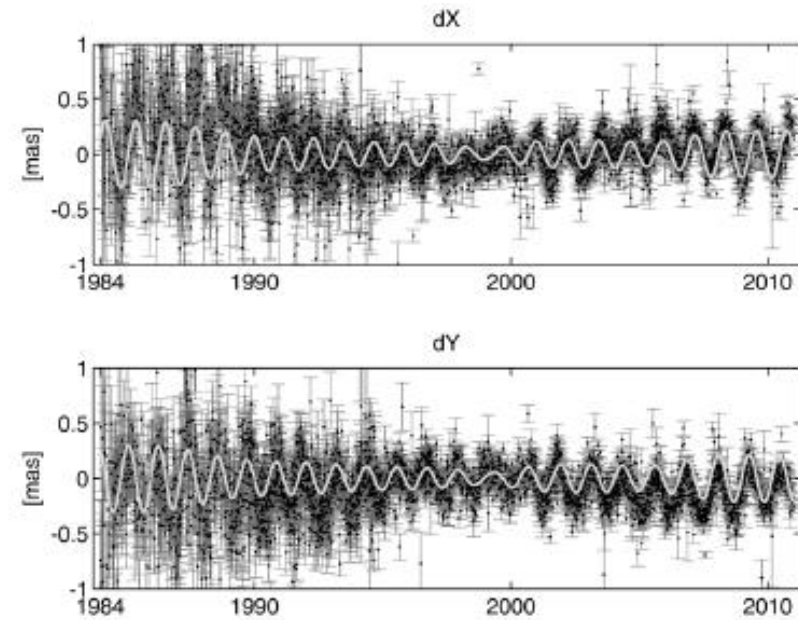


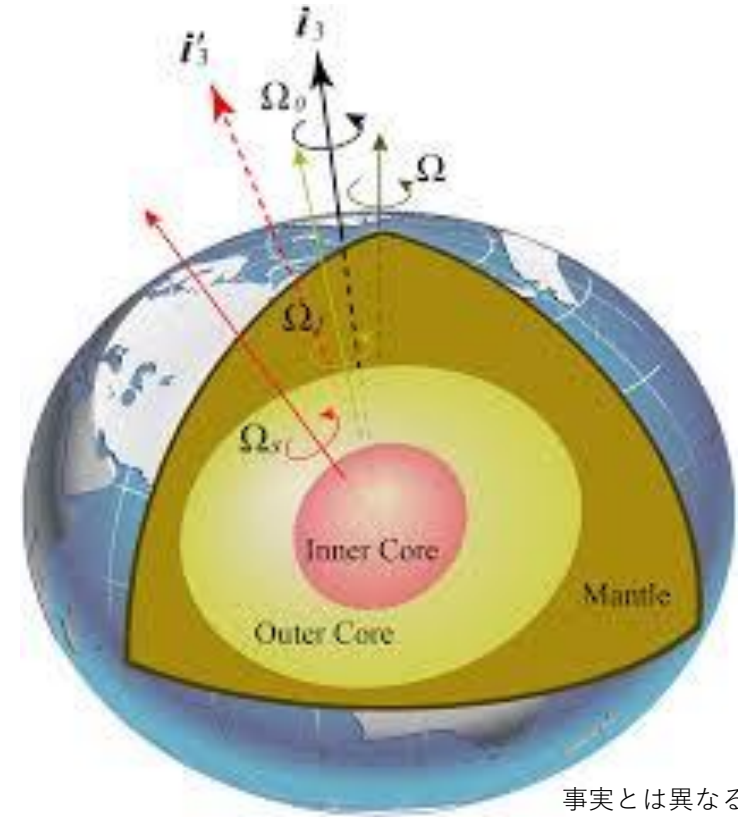
Fig. 2. CPO with respect to the IAU 2006/2000A precession-nutation model (grey) together with the FCN model (light grey) estimated in this work. Before 1986.0 and after 2009.0, the model is extrapolated.

- 振幅：dX Ac 64.1, As 34.0, dY Ac 64.6 As 33.9 micro asc
- 周期：-431.18~-431.27dayが最新の推定値
- 振幅が40年（18.6年の倍数？）で変化？. 白道-黄道の昇交点移動に何らかの関係があるのか？
- 周波数成分は単一ではなく、マルチトーンの可能性あり
- Dissipation Process
- 431日の周期は一定か？

FICN (Free Inner Core Nutation)

This motion is very similar to the FCN, but, concerns the outer and inner core. It has never been observed and theoretical calculations predict a very weak resonance effect on Earth tides and nutations. The period is retrograde diurnal in the terrestrial frame and prograde long-period in the celestial frame (of about 470 days). (Dehant et al. (1993), and others). **The parameters involved are the flattening of the inner core, the densities of the inner core and outer core, and the deformation of the Inner Core Boundary (ICB) due to the fluid dynamic pressure on the ICB.** In a very detailed analysis of VLBI data, Mathews et al. (JGR, 2001) have determined a FICN period and damping from its resonance in the nutations. They obtain a period of 1025 days.

<http://sbc.oma.be/frinconu.html>



事実とは異なる場合がございます

地震（自由振動）により励起するという説も有り，常に同じ振動状態では無いかもしれない。
MCBでの応力軸偏差分布と同じように，ICBでの流体圧による応力軸偏差分布が変化することが，
FICNの起動力？内角の首振りトルクの中で何割がマントルまで染み出すのか？

FICN検出の試み — — — おそらく10マイクロ秒角未満の振幅のFICNを検出できるか？

Lambert, *et al.*, 2012, IVS GM Proceedings

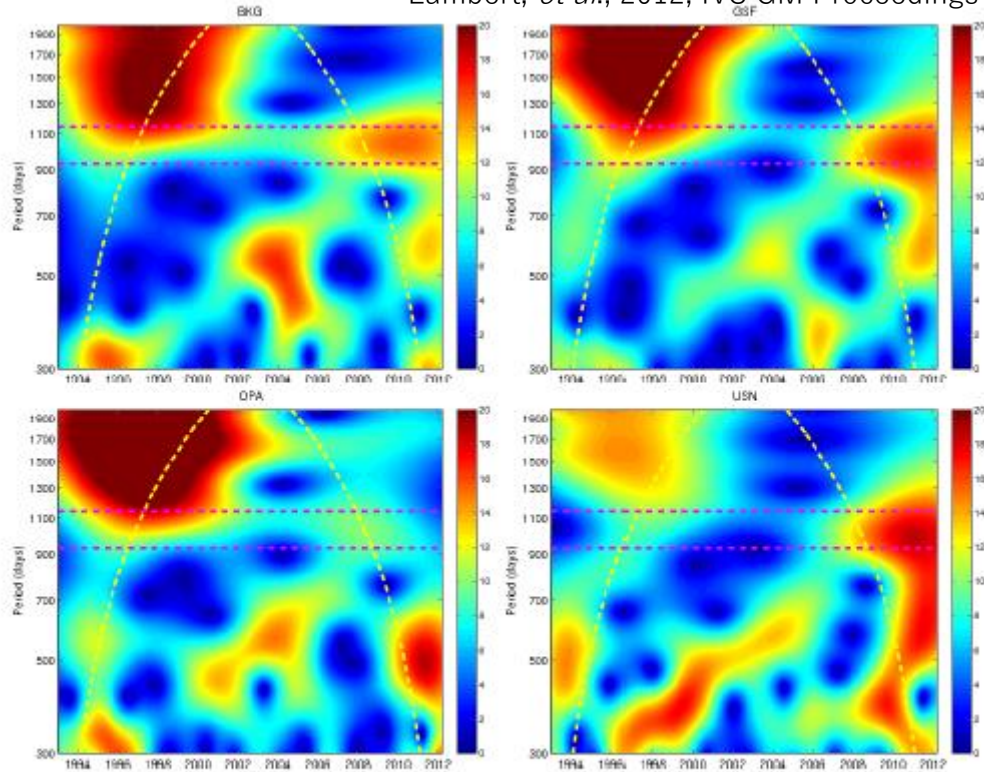


Figure 2. Wavelet spectra of four operational nutation series. The horizontal dotted lines show the FICN frequency band around 1034 days following Mathews *et al.* (2002). Amplitude unit: μas .

複数のVLBI章動角推定シリーズのウェーブレットスペクトル。MHBで示された周期帯（赤横ドット線）に2008年頃からピークがあるように見える。

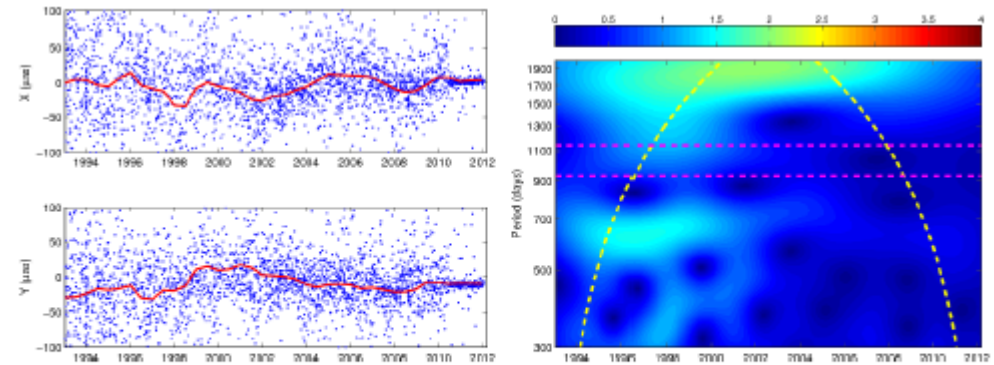


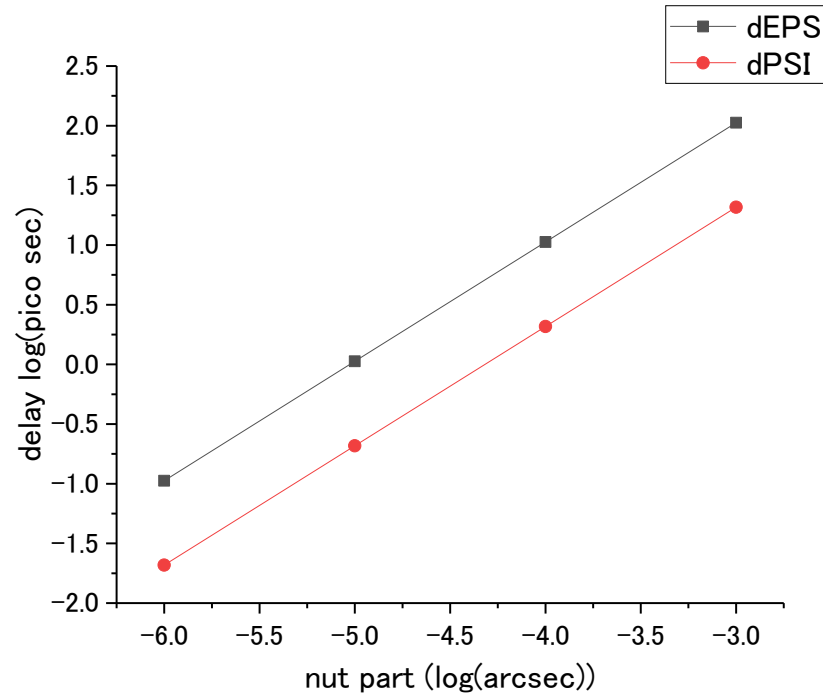
Figure 3. Nutational signature of the unstable radio sources (left), and prograde band of its wavelet spectrum (right). The horizontal dotted lines show the FICN frequency band following Mathews *et al.* (2002). Amplitude unit: μas .

観測電波源の構造の変化が、EOPの解に影響を与える事項を考慮して、構造の変化が大きい電波源を外した場合の章動角推定移動平均値からウェーブレット解析を行った場合の結果

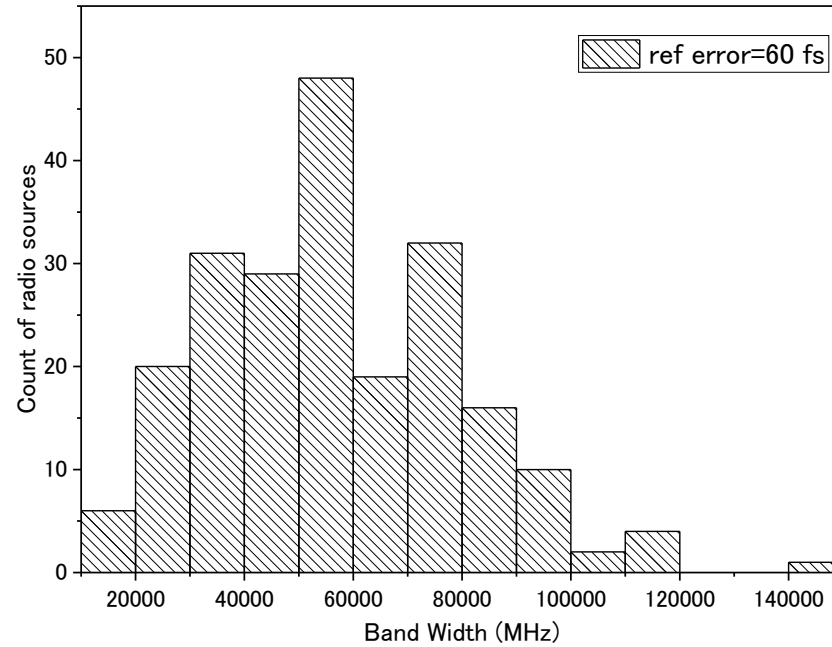
FICNの周期帯からピークが消えた。

章動角計測誤差が大きすぎる。ネットワークの形状も適正か？

章動角計測の感度とネットワークの形状の関連性—— 2



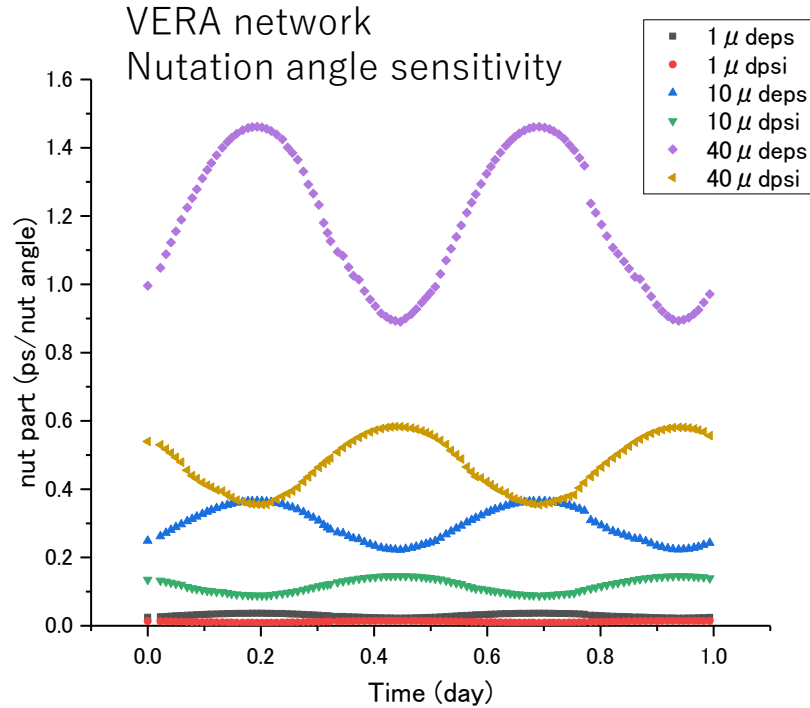
章動角の大きさに対して必要な遅延の精度
 $1 \mu \text{ ascl}$ にはdEPSで100 fsの精度が遅延に必要
 dPSIに至っては30 fsの精度が必要.



60fsの白色雑音誤差を得るために必要な帯域幅
 VERA基線, Q帯, 電波源は広帯域K/Q帯連続波源フリンジサーベイ
 (Jike, et al., 2018, 10th IVS GM)から選択.

基線	基線長 km	感度 ps/ $\mu \text{ ascl}$
VERA	2000	0.1
Global	10000	0.5
人工衛星	40000	2.0
地球-月	300000	15

100GHzの帯域幅や惑星間VLBIは、最終的な目標として……
ここ数年で現実的な観測仕様は？

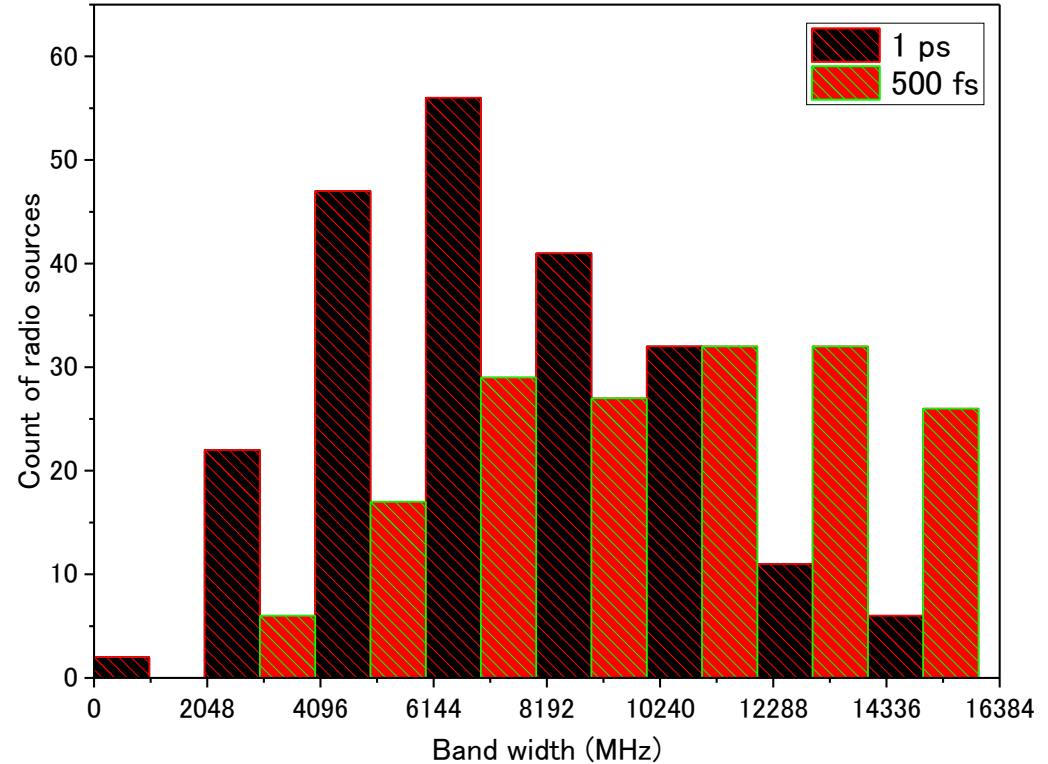


遅延の精度が 10^{-14} オーダーはそろそろ現状の基準信号発生器の限界に近い。Hメーザーも短期安定度はOCXOの安定度に依存。

まずは、白色雑音誤差で目標精度に達しないと、歯が立たない。

40 μ ascの精度を目指すならば、誤差 1 psでも可能性が出てくる。40 μ ascは現在のglobal VLBIで得られる章動角計測の2倍の精度をVERA基線で達成することになる。global基線の場合、8~10 μ ascの精度に相当。

Q帯 広帯域フリンジサーベイより。



誤差1 psは8GHzの帯域幅で100以上の電波源を確保、更に、誤差500 fsでも12 GHzまであれば、100以上は確保される。構造効果指数が1 (Charlot et al., 2010, AJ)の電波源もほぼ網羅されており、構造変化による章動角への影響を削減することは可能と考えられる。

調査を進めるたびにVGOSの考えに近くなります。差別化は？

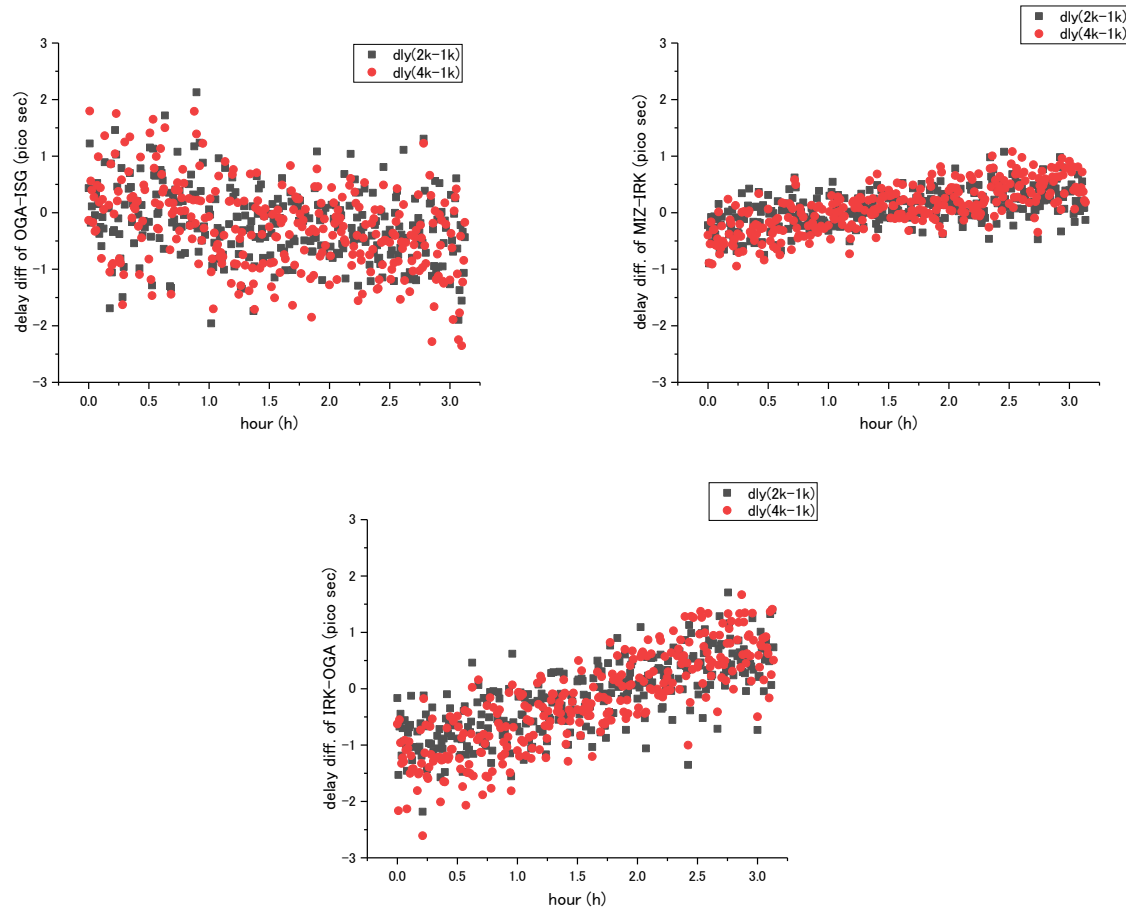
遅延計測精度とネットワーク感度のまとめ

- $1 \mu\text{asc}$ の推定に感度を持つためには、汎地球ネットワークで300~500 fs, VERA基線では60~100 fsの遅延決定精度が必要.
- 60 fsの遅延決定精度を保証できる帯域幅は100 GHz必要であり, 将来の希望性はあるが, まだ現実的ではない.
- まずは, VERAで40 μasc の章動角決定精度を目指す. そのためには1 psの精度を遅延観測値で保証する必要がある.
- 電波源のコンパクトネスや構造変化を抑えるためには高周波 (22GHz, 43GHz~) が良いか? 22GHz帯はCRFが整備, 43GHz帯の輻射構造マップは整備されつつある.
- 1 psの遅延計測が出来たならば, 人工衛星や月-地球間VLBI等, 太陽系の広さを用いた時空計測手段へ計測決定精度を適用することで, $1 \mu\text{asc}$ の角度計測能力を持つことが出来るだろう.

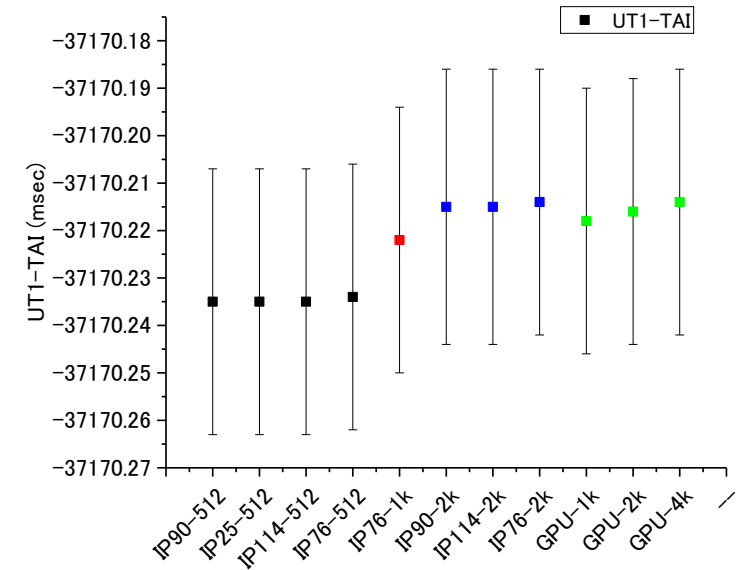
--- 月-地球間距離を数 mmの精度で計測する技術に相当.

地上と月面では時間の進み具合も違うはず. 相対論.
月面力学時とTCG, TCBの接続をどうする?

Definiteness of the solution generated from the correlator

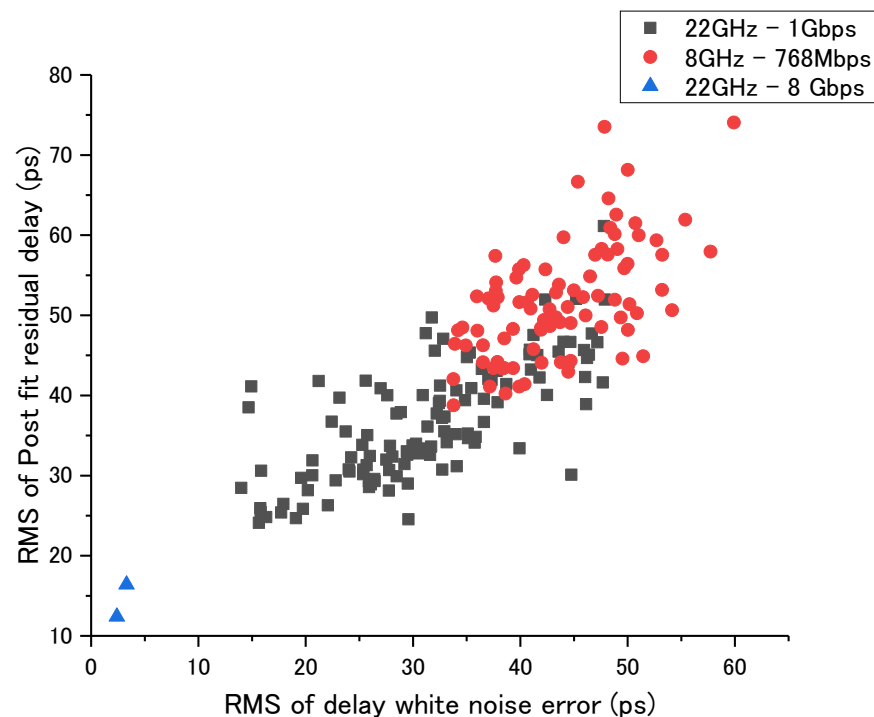


Delay differences when the same data is correlated with different numbers of FFT points



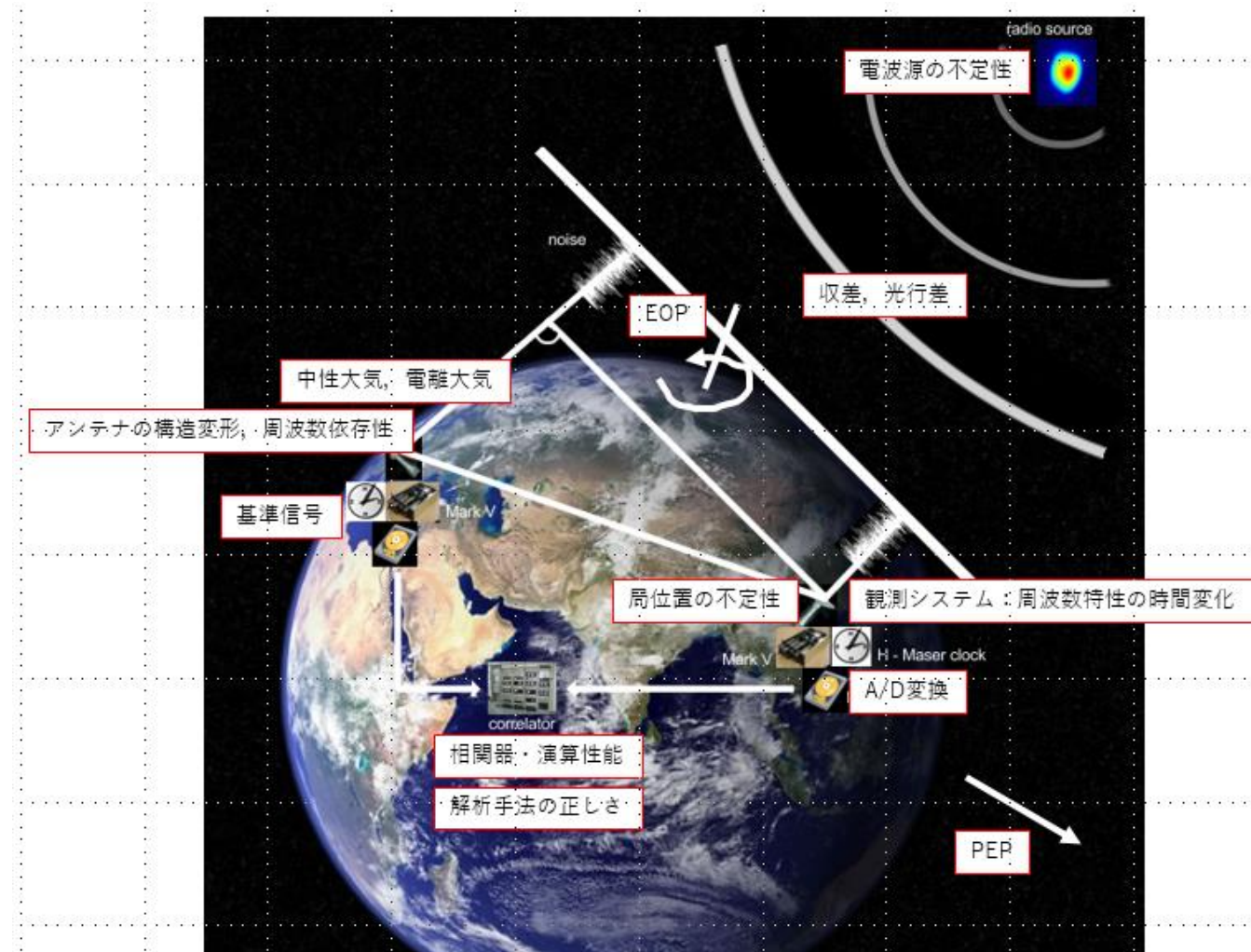
- There seems to be no relationship between SNR and the magnitude of the post-fit residuals.
- In gico3, it seemed that the larger the number of FFT points, the kurtosis of the residual distribution increases. If the FFT points are 512 or 1k on an 8-core CPU, there is likely to be additional noise different from the others.
- For UT1, the solution steps according to the number of FFT points. kfxcom is also smaller than gico3, but the steps are confirmed. Investigation of the relationship between FFT and time synchronization error is yet to begin.

しかし、誤差1 psまでの道のりは……



VLBIのpost-fit残差の分布はlogistic分布。白色雑音成分以外の誤差要因が混じっており、その大きさはr.m.s.で凡そ12 psと予測。

中性・電離大気周波数揺らぎ，局内位相揺らぎ，AD変換ジッタ，相関処理付加誤差，電波源構造の周波数による不定性から発生する位相揺らぎ，等。



- これらすべての中で発生する周波数揺らぎについて、数秒から数時間の間の変化
- ランダムウォークから不定バイアスの周波数揺らぎを較正する補法の確立

誤差の削減や観測目標展開のstrategy

周波数揺らぎの時間特性に視点を置いて……

- 白色雑音成分は時間・周波数積分で対処。ランダムウォーク、不定バイアス成分は補正で対処するしかない。
- ピコ秒の精度に対応する補正方法（時間レゾリューション、周波数レゾリューション）。
- 帯域内位相特性の時間変化は、観測帯域内8GHz内で0.01 rad rmsが要求ライン
- 周波数変化のトレーサビリティは、数分～観測時間。Scan間の周波数特性変化を結合すること。
- 相関処理が研究の科学的要求に見合う性能であるかどうかを確認し、演算性能の向上を図る。

- 1, トータルエラーバジェットとして、試験基線で10 ps, そして1 psに向かい、最終的にfsオーダーに相当する角度計測感度を目指す。
- 2, 観測装置としては、地球上の基線で精度向上を図る。
- 3, 太陽系探査機, 月面干渉計, 外惑星・衛星の章動計測へ展開。

地上での遅延精度

10 ps

4 ps

1 ps

100 fs

試験装置で手段の確立

グローバル展開

地球周回衛星, 人工惑星を使った計測

月-地球干渉計

太陽系内天体の章動計測

観測システム上の限界: 別の観測手法への転換

角度計測性能

40 μ asc

10 μ asc

1 μ asc

地道な解決が必要。戦略に必殺技やエクスカリバーはありません。

地上のVLBIでは行きつかなくても、惑星章動の計測へと範囲を広げる事が方針として最良だと思われます。

サブミリ波, 赤外, 光学電干渉法や素粒子を使った計測? VLBIよりも信頼性の高い観測手法は……, 次世代の時空計測研究者に期待。

相対論測地, 次世代の時空計測 (赤外, 光への移行, 光格子時計, 時間・周波数のRefが変わるか?) の可能性を探ることが重要かと思われます。

次世代周波数基準を用いた新たな時空計測

研究提案まとめ

課題

- FCNのリバイズ, FICNの発見

観測目標

- マイクロ秒角オーダーの時空角度計測能力を目指す

観測要求

- 直近で10 ps, 一先ずの目標として1 psより小さい誤差の精度で遅延時間を計測することが可能な観測手法と解析手法
- FCNの振幅の長期変動のモニターを考えると数10年スケールの観測が必要.

装置要求

- 22GHz, 43GHz帯, 帯域幅は8GHzBW以上.
- トータル位相揺らぎが数分から数時間の周期で0.01rad r.m.s. (post-correction).
- 相関処理のトータル付加誤差が500 fs未満であること.
- 相関係数の演算有効桁が小数点以下8桁よりも小さい値であること. 広帯域データの相関係数のダイナミックレンジに対応できること.