

VLBI 周波数比較への応用とGALA-V システムの開発(VII)

関戸衛, 岳藤一宏, 氏原秀樹, 近藤哲朗, 宮内結花, 堤正則, 川合栄治, 長谷川新吾, 瀧口博士, 市川隆一, 花土ゆう子, 小山泰弘, 小室純一, 寺田健次郎, 難波邦考, 高橋留美, 岡本慶大, 青木哲郎, 池田貴俊
渡部謙一, 鈴山智也

情報通信研究機構
産業技術総合研究所

Abstract

NICTは、長距離の周波数比較を目的として、GALA-Vと名づけた新しい広帯域VLBIシステムを開発を進めている。これまでに開発した広帯域受信可能な小型アンテナ(MARBLE1:1.6m, MARBLE2:1.5m)をそれぞれ産総研つくばとNICT小金井に設置し、まずX-bandでUTC(NICT)とUTC(NMIJ)の比較実験を行い、その後より精度を向上させるために広帯域観測システムを開発を進めてきた。2015年夏に3.2-14 GHzが受信可能なNINJAフィードを開発して34mアンテナに搭載し、また、3-14GHzの広帯域の信号を合成して電離層遅延を推定すると同時に高精度な群遅延量を可能にする、バンド幅合成ソフトウェアの開発を進めてきた。NICT以外では国内で唯一広帯域観測が可能な国土地理院の石岡13m局と、広帯域VLBIの試験観測を実施し、1秒の観測で1ピコ秒を切る高い精度の遅延計測技術を実現した。計測された遅延量は、大気の流れによるものと思われる変動を示し、そのアラン標準偏差はKolmogorovの乱流移動モデルから計算されるアラン標準偏差と整合した結果となった。

1. はじめに

NICTは、遠距離周波数比較を目的とした広帯域VLBIシステム(GALA-V)の開発を進めている。比較対象の原子周波数標準器の信号を基準信号とした小型アンテナでVLBI観測を実施し、基線解析により遠く離れた原子時計のクロック差を推定する。GALA-Vプロジェクトではアンテナの受信感度と遅延計測精度を向上させるためIVSの進める次世代測地VLBIシステムVGOSと同様の3-14GHzの非常に広い帯域で電波星からの電波を受信し、従来の方法より高い観測精度を実現する。

2. GALA-V観測システムの特徴

GALA-V観測システムは、VGOSと共同観測可能な仕様を保ちつつ、以下の優れた独自技術を持徴としている。

- 既存の大型アンテナを広帯域観測可能にする広帯域フィードを開発
- RFダイレクトサンプリング方式による、広帯域遅延計測の安定化
- 位相校正信号PCALによらず、天体の信号を使った位相校正と広帯域バンド幅合成
- 観測周波数帯域をゼロ冗長配置することによる遅延計測の最適化

【広帯域フィード：IGUANA-H、NINJAの開発】

各国のVGOS局が採用している広帯域フィードEleven Feed, QuadRidge Flared Horn(QRFH)は広いビーム幅を持つため既存の大型電波望遠鏡には搭載できない。我々はカセグレン光学系をもつNICT鹿島の34mアンテナを広帯域観測に利用するため、ビーム幅が34度程度の細いビームを持ち、かつ、広帯域の受信が可能なフィード IGUANA-H とNINJAフィードを独自開発して34mアンテナに搭載し(図2)、広帯域VLBI観測を可能にした。

【RFダイレクトサンプリング方式】

群遅延量とは周波数に対する位相の傾きであり、広帯域の群遅延計測を行うには、測定系の位相の直線性が重要である。現実にはアンテナから記録計まで含めて3-14GHzの広い帯域で位相の直線性を持つ観測装置は困難であり、直線位相特性を再現するための位相校正が極めて大切である。VGOSの標準的な観測システムは、Up/Down Converterで中間周波数まで周波数変換して記録を行う。周波数変換器の位相を含む信号伝送経路の位相校正のために、パルス列の信号(comb トーン)を使った従来どおりの位相校正(PCAL)を採用しているが、パルス発生機の安定性や、PCAL装置を駆動する基準信号をアンテナまで送る遅延の変動を別途計測する(DCAL)が必要であり、系が複雑となって誤差要因の分離も困難となる(図3)。

GALA-Vシステムでは、16GHzで動作する高速サンプリングK6/GALASを利用してRF信号を直接A/D変換する「RFダイレクトサンプリング」方式を使う。この方式では、位相変動の要因となるアナログ部を少なくし、位相情報が保存されたデジタルデータにしてから信号処理をするため、位相安定性が格段に向上するおかげで、従来のPCAL信号を使わず、天体の受信信号そのものを使って位相校正を行うことが可能となる。RFダイレクトサンプリング方式による広帯域バンド幅合成の詳細については本セッションポスター [SGD23-P05]を参照されたい。

3. 国土地理院石岡局13m - NICT鹿島34m の超広帯域VLBI実験

国内唯一のVGOS互換の性能を持つ国土地理院石岡13mアンテナと、鹿島34mの間で広帯域VLBIシステムを使った32時間の測地VLBI実験を実施した。観測日時等の諸条件を表1に示す。観測データはソフトウェア相関器GICO3で処理を行い、広帯域バンド幅合成によって電離層TEC量と遅延量を求めた。電離層の分散性遅延を含む相関位相は以下の式でモデル化され、観測された相関位相にFITすることで、構成天体方向のTEC量に対する相対的な δ TECが推定される(図5(a))。
$$\phi(f) = \alpha \frac{\delta TEC}{f} + \delta \tau f + \phi_0$$
 図5(b)は各Scanごとに求められた δ TEC量を時系列でプロットしている。鹿島-石岡の46km程度の基線では電離層はほぼ共通であると考えられるが観測の結果方向によっては数TECU程度の差がみられることがわかる。

強い電波源である3C273Bの観測データで1秒ごとに計測された遅延量の時系列プロット(図6(a))とそのアラン標準偏差(図6(b))から、(1)1秒の観測で1ピコ秒を切る精度の遅延計測が実現していること、(2)200秒程度の時間で10 psec程度の変動があることがわかる。このアラン分散は、Kolmogorovの乱流が風によって流れているモデルの電波干渉計で観測される位相揺らぎのアラン分散(Thompson, Moran, Swenson 1994, Armstrong & Sramek 1982))

$$\sigma_y(\tau) = 4.8 \times 10^{-13} \tau^{-1/6} \sim 2 \times 10^{-15} \tau^{-1/6}$$
 でほぼ説明できるため、大気揺らぎの影響と考えられる。今後、さらに国内の周波数比較の実績と国際基線の試験観測によるデータ処理系の拡充を進める。

表1. 石岡13m-鹿島34m VLBI観測の諸条件

観測日、時間	2015y226d04h40m-227d14:59m(32h20m)
Scan	1188scan(30sec.), 2scan(1200sec.)
周波数配列 [MHz]	3200-4224, 4600-5624, 8800-9824, 11600-12624
データ収集系	K6/GALAS, K6レコーダ
観測モード	2048Msps-1bit-4band
偏波	直線V-V

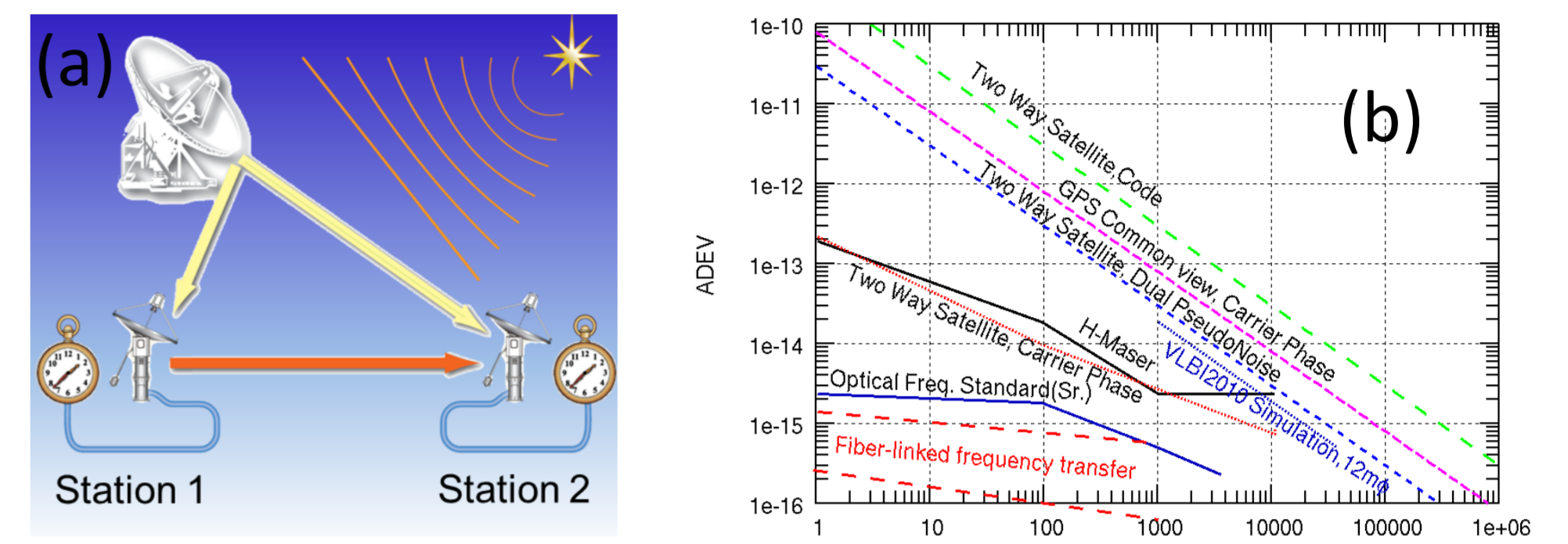


図1 (a)VLBIによる周波数比較プロジェクトGALGA-V システムの概念図。(b)宇宙技術を使った周波数比較の精度: 衛星双方向(TWSTFT), GPS, VLBI



図2 34mアンテナに設置されたNINJAフィード(左)とIGUANA-Hフィード(右)。

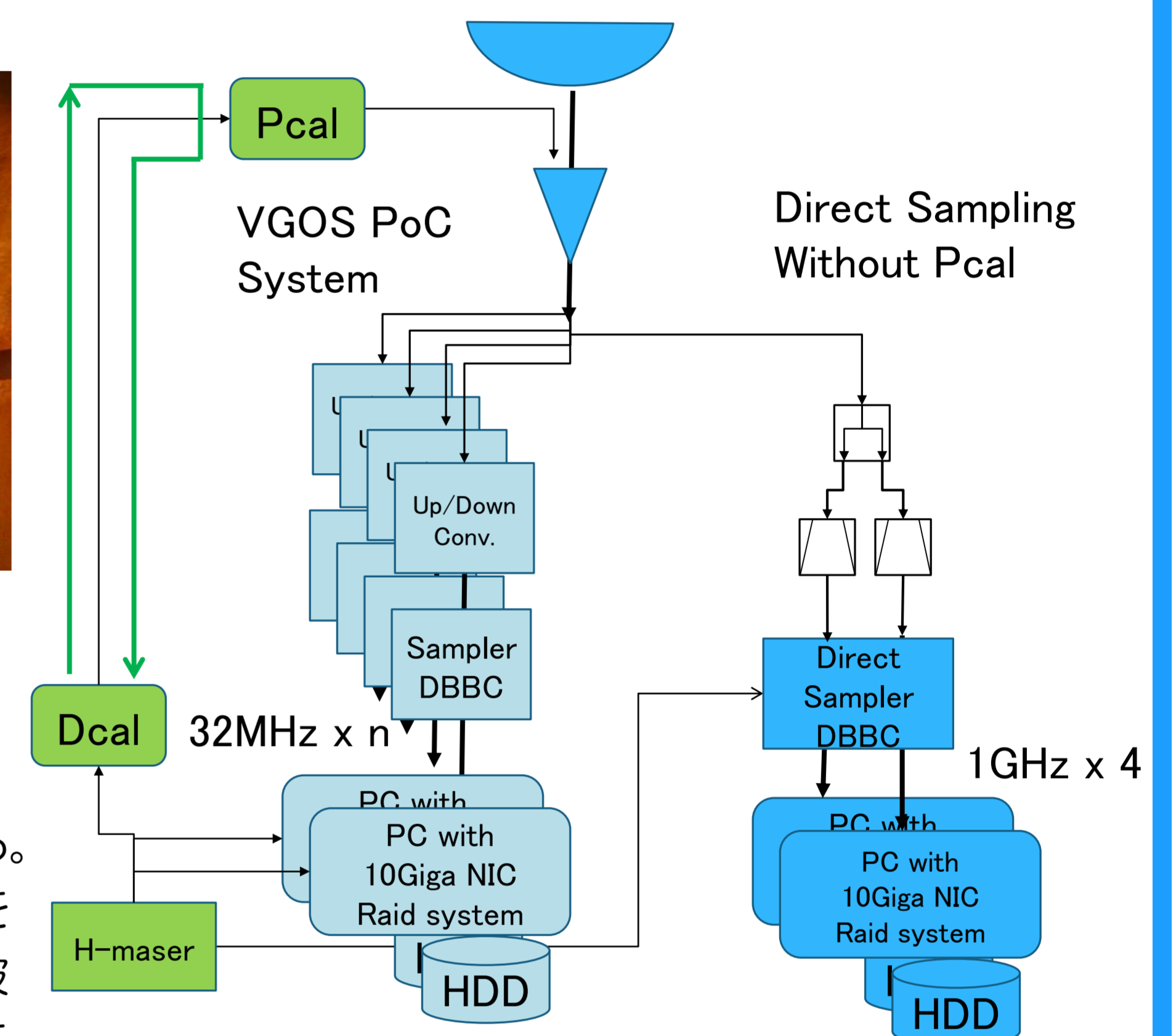


図3 VGOSの標準的な信号経路(左: 水色)と、GALA-VのRFダイレクトサンプリングによる信号取得経路(右: 青色)。



図4 RFダイレクトサンプリングに使用する高速サンプリングK6/GALAS。

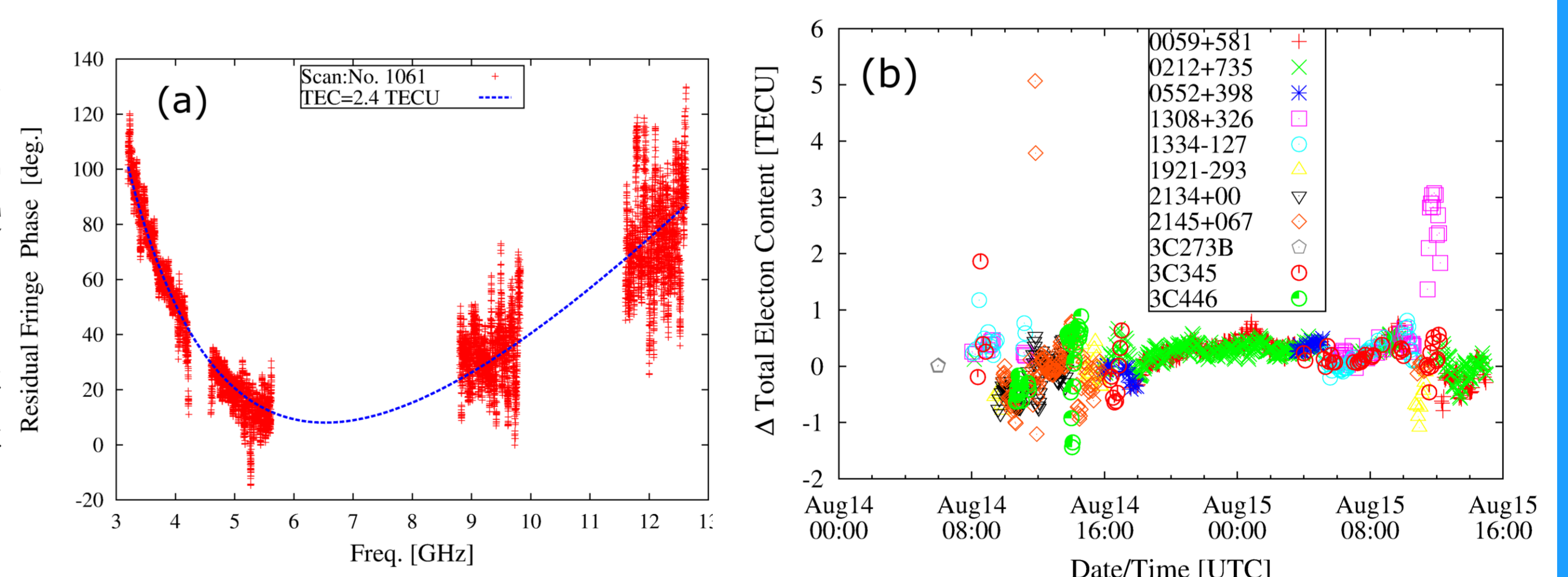


図5 (a)天体を使った位相校正により位相接続され、電離層の影響が周波数-位相特性から推定される。(b)32時間のVLBI実験で推定された各Scanの(校正Scanに対する)相対的電離層TEC量。

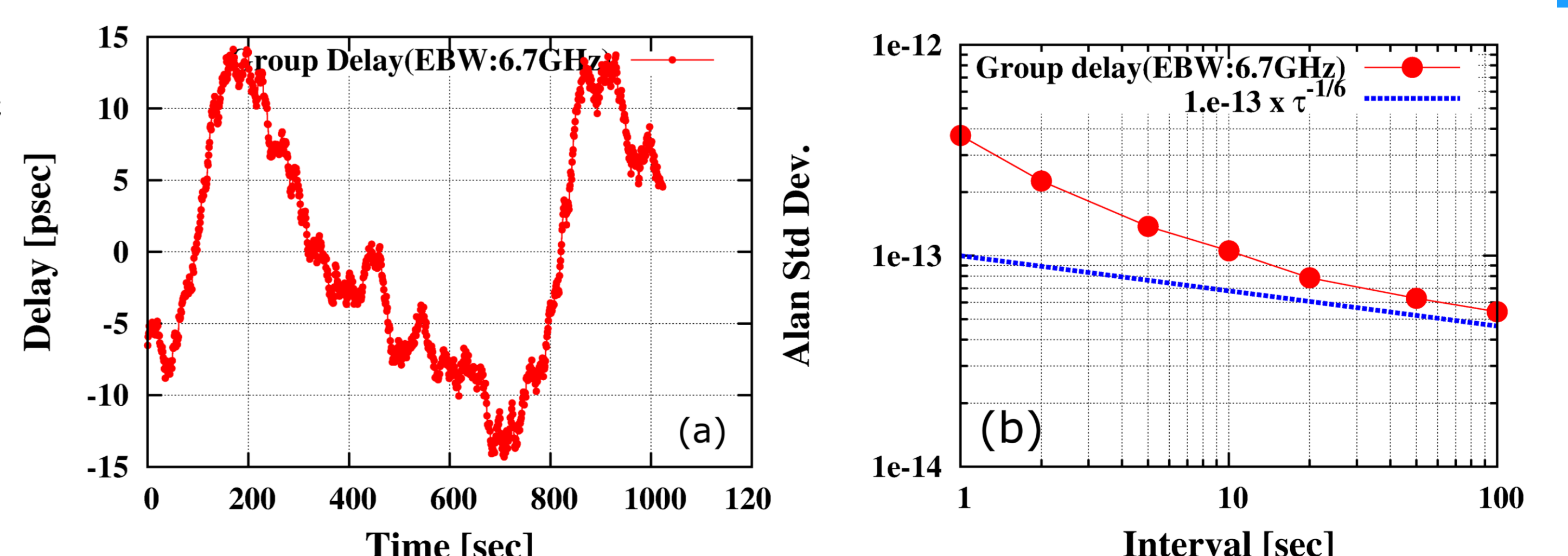


図6 (a)広帯域VLBI観測によって得られた遅延計測値の時系列(ゆっくりとした変動は2次の多項式FITで除いてある)。(b)時系列遅延データのアルラン標準偏差。青い線は $\sigma_y(\tau) = 10^{-13} \tau^{-1/6}$ を示す。