

周波数比較のための広帯域VLBIシステム開発

関戸 衛、岳藤一宏、氏原秀 樹、近藤哲朗、堤正則、宮内結花、川合栄治、長谷川新吾
時空標準研究室



電磁は計測研究所
時空標準研究室
副室長

関戸 衛

Abstract

NICTでは、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システムの開発を進めている。移設可能な小型アンテナに接続された原子周波数標準器の周波数は、遠隔地の小型アンテナとのVLBI観測によってそれに接続された周波数標準器の周波数と比較される。従来のVLBI観測(約1GHz幅)に対して、10倍の観測帯域(3-14GHz)を観測することで受信感度が向上し、大型アンテナもVLBI観測に参加することで、1.6m程度の小型アンテナでも10mクラスのアンテナと同程度の遅延計測精度が実現できます。

開発した小型アンテナをUTC[NICT]を維持する小金井本部2号館屋上とUTC[NMIJ]を維持する産業技術総合研究所の計量標準センターに設置し、UTC[NICT]-UTC[NMIJ]の比較実験を開始しています。

観測感度改善のためVLBI観測に参加するカセグレン光学系をもつ34mアンテナでは独自設計による広帯域フィード(IGUANA-H(6.5-15GHz)、NINJA(3.2-14.4GHz))を開発して搭載し、広帯域化を実現しました。この観測周波数は、IVS(国際VLBI事業)が進める次世代測地VLBIシステムVGOSと互換性を持ち、世界各国が建設を進めているVGOSシステムとの協同観測が可能です。

データ取得系では、新しいRFダイレクトサンプリング技術を使って、広い帯域を一度に取得し、広帯域のバンド幅合成ソフトウェアの開発によりフェムト秒オーダの遅延計測が可能になりつつあります。

国土地理院が2014年に完成した石岡VGOS局と、広帯域VLBIの試験観測を実施し、観測システムの検証実験を行っています。

2. Technology Development of the Broadband VLBI System

[広帯域フィードの開発]

現在入手可能な3-14GHzを同時受信できる広帯域フィードは、ElevenフィードやQRFHフィードがあるが、いずれもビーム幅が120度程度もあり、これらのフィードを採用したドイツ、スペインなどのVGOSアンテナは、リングフォーカスと呼ばれる、副反射鏡から焦点までの距離が極めて短い特殊な光学系を採用し、新規建設されている。我々は、カセグレン光学系をもつ既存の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つ、広帯域フィード IGUANA-H とNINJAフィードを開発して34mアンテナに設置し(図2)、広帯域VLBI観測を可能にした。詳しくは氏原さんのポスター25を参照されたい。



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)。

2オクターブにも及び広帯域の受信信号は、従来のVLBIで使用しているような受信系での円偏波合成が困難なため、直線偏波のまま周波数変換することなく、広帯域の光伝送装置で観測室まで伝送し、データの取得を行う。広帯域であるためトータルパワーが大きく、システム全体が線形領域で動作するように飽和点電力1dBの大きなアンプを使うなど注意が必要である。

[高速サンブラK6/GALASと 超広帯域バンド幅合成]

データの取得は、アナログ周波数変換なしにRF信号を直接サンプリングする「ダイレクトサンプリング」方式を使用している。これは、16GHzの周波数でA/D変換を行い、ナイキストゾーンの8GHz幅から任意の1GHz幅の信号をデジタル信号処理で取り出す方式である(図4参照)。K6/GALASはダイレクトサンプリングを行い、VLBIデータの国際標準フォーマットであるVDIF形式でデータを出力する。表1にK6/GALASサンブラの性能仕様を示す。

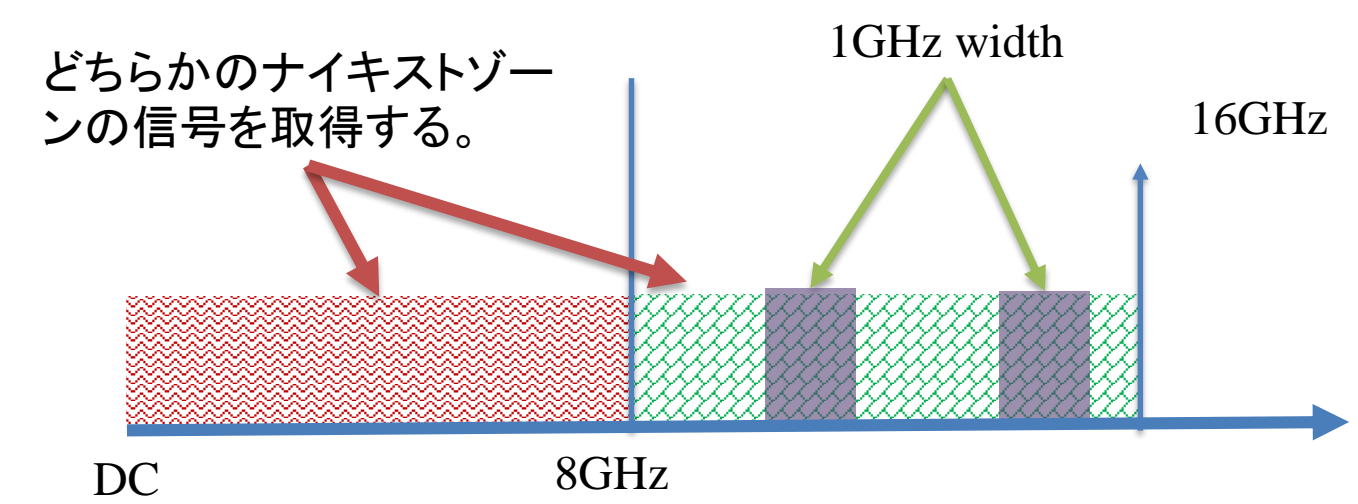


図4 RFダイレクトサンプリング+DBBCの説明図。ナイキストゾーンに帯域制限されたRF信号を16GHzの周波数で直接AD変換し、サンブラ内部のFPGAを使ったデジタル周波数変換によって任意の1GHz幅の信号を取得する。

表 1. サンブラ K6/GALASの性能パラメータ

Sampling rate	16384MHz
サンプリングビット数	3 bits
RF入力ポート数	2
最大入力周波数	16.4 GHz
出力量子化ビット	1 or 2 bit
出力ポート数	4
出力ポートインタフェース	10GBASE-SR
出力データフォーマット	VDIF/VTP/UDP

この「RFダイレクトサンプリング」方式は、8GHz幅の帯域内の信号を全てA/D変換してからデジタルフィルタによる帯域制限を行うため、複数の1GHzバンド間の位相関係が安定しており、従来のアナログ周波数変換で必要不可欠な位相校正信号(P-CAL)を必要とせずに、広帯域のバンド幅合成が可能となる、きわめて優れた特徴がある。

2015年1月に国土地理院石岡局の協力を得て、鹿島34m-石岡13mの基線において、6-14GHzの周波数を使って世界初の8GHz幅の広帯域VLBI観測を実施し、超広帯域のバンド幅合成に成功した(図5)。60秒間の観測から得られる計測精度は30フェムト秒(3.e-14sec)に達し、1秒毎の遅延量からは、大気の変動による影響と見られる、数十秒で数ピコ秒の変動が計測された。この超広帯域バンド幅合成では、強い天体の相互相関スペクトルをリファレンスとして位相特性の補正に利用した。観測データからもRFダイレクトサンプリングの手法は、帯域間の位相安定性に優れていることが示されている。

表 2. 1秒毎の遅延計測値の精度が周波数帯域幅を拡大することで改善していることを示す。

Bandwidth [GHz]	RMS [ps]
1	3.08
2	2.01
4	0.96
8	0.60

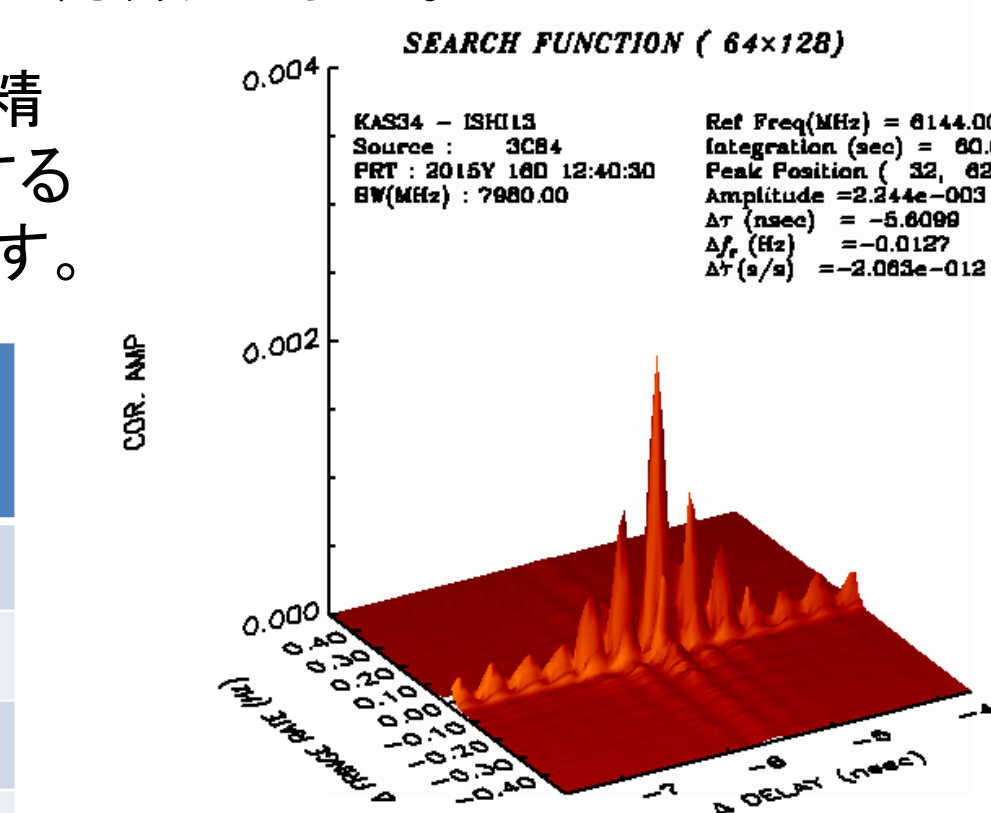


図5. 8GHzのバンド幅を合成して得られた遅延分関数(フリンジ)

1. Introduction

可搬型広帯域VLBIシステムによる周波数比較プロジェクトGALA-Vの概念図を図1に示す。移設可能な小型アンテナを周波数標準機関に設置し、より感度の高い大型アンテナとの協同観測によって小型アンテナ間の周波数比較を実現する。VLBI観測の信号帯雑音比SNRは下記の式(1)で与えられ、一方のアンテナの受信感度が低くてももう一方のアンテナの感度が高ければVLBI観測が成立する。更にGALA-Vシステムでは、チャンネル当たりのデータ取得帯域幅が従来の32倍以上の広帯域の観測を行います。これにより、アンテナ面積がこの倍率だけ拡大したに等しい感度の向上が期待できる。

$$SNR \propto SD_1 D_2 \sqrt{\frac{\eta_1 \eta_2}{T_{sys1} T_{sys2}}} BT \cdots (1)$$

S: 天体のフラックス密度[Jy]
D: アンテナ直径
T_{sys}: アンテナシステム雑音温度
η: 開口効率
B: 受信帯域幅 [Hz]
T: 観測積分時間 [sec]

GALA-Vシステムの基本観測モードとしては、4.0GHz、5.6GHz、10.4GHz、および13.6GHzの4つの帯域で1GHzの帯域幅のデータを取得する。バンド幅合成により約10GHzにわたる周波数帯域幅の信号を合成し、有効帯域幅3.8GHzで群遅延計測を行う。これは従来の測地VLBI観測の10倍の帯域幅であり、同じSNRの条件の下で10倍の遅延計測精度向上が期待できる。

3. Comparison between UTC[NICT]-UTC[NMIJ] with Gala-V

広帯域小型VLBIによる周波数比較技術を確立・実証するため、UTC[NMIJ]を維持する産総研の計量標準センターとNICT2号館屋上に小型アンテナを設置し(図7)、UTC[NMIJ]-UTC[NICT]の比較実験を実施している。産総研、NICTは共に定期的にBIPMのUTCに対する比較を行っており、その結果がBPIMから公表されている。図8にVLBIとGPSによる測定結果および、BPIMからの公表値を示す(縦軸位置は任意にシフトして表示している)。

VLBI、GPSともに、NMIJ-NICTの周波数差を測定できていることがわかる。GPSの場合には衛星の軌道情報にDay Boundaryのジャンプが発生することが知られており、VLBIの場合にはこのような誤差要因が原理的にはないため、長時間の計測で精度の劣化が少ないと期待される。今後、GALA-Vシステムを使った観測で、長期の周波数計測を実証・確認していく予定である。

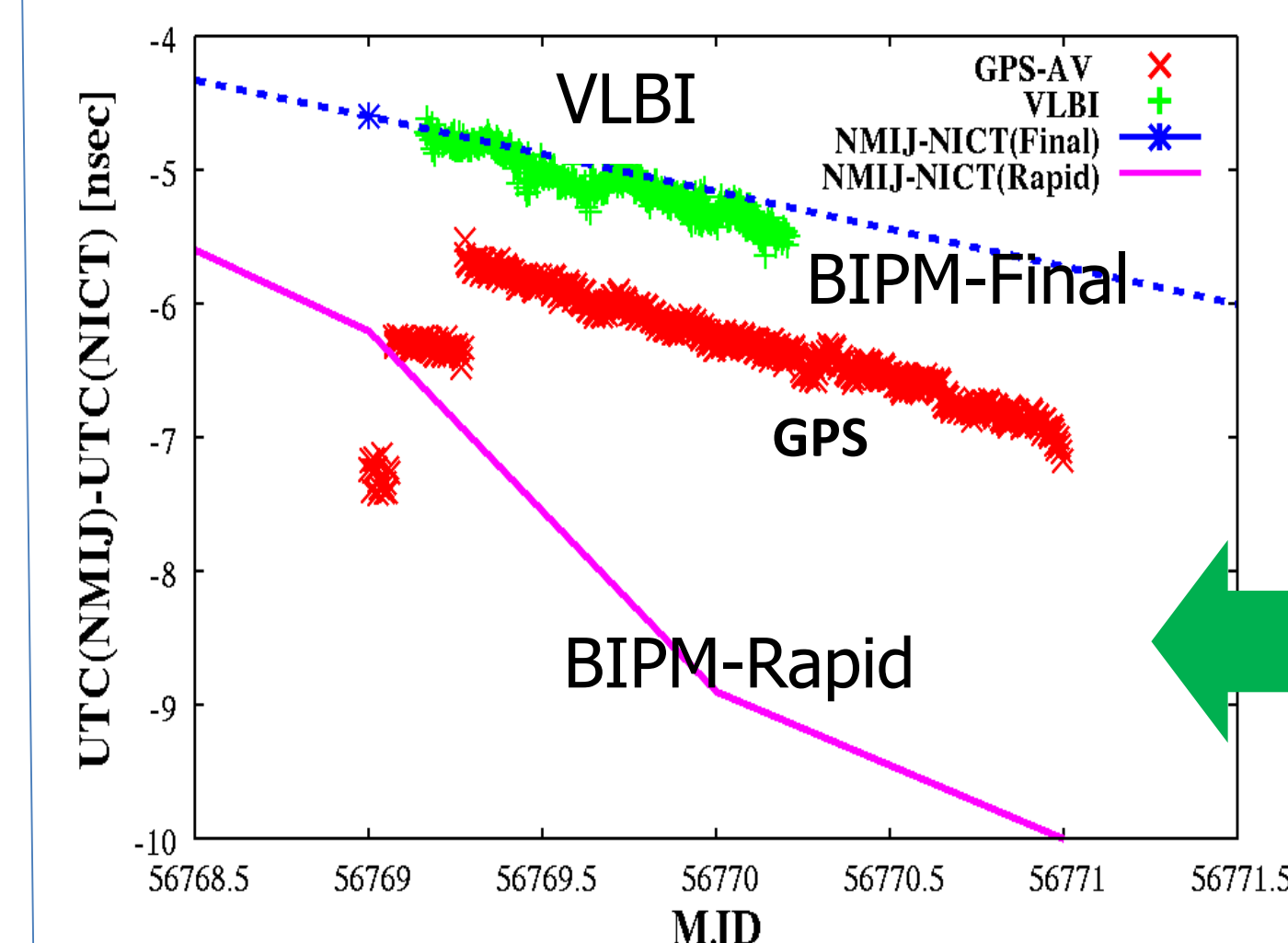


図7 産総研(つくば)に設置した小型アンテナ(上左)と、NICT2号館屋上の小型アンテナ(上右)、および小型アンテナの感度をブーストする役割を果たす鹿島34mアンテナ(下)。

図8 UTC[NMIJ]-UTC[NICT]の比較をVLBIによる測定(緑)およびGPSで計測した結果(赤)を示している。両者とも縦軸方向の位置は見やすい様に任意にシフトしている。点線と実践は、産総研、NICTがそれぞれBIPMと定期的に実施しているUTCの比較結果の公表値(RapidとFinal)を示す。VLBI、GPSともにBIPMのFinal値の傾斜(周波数)を計測できていることがわかる。

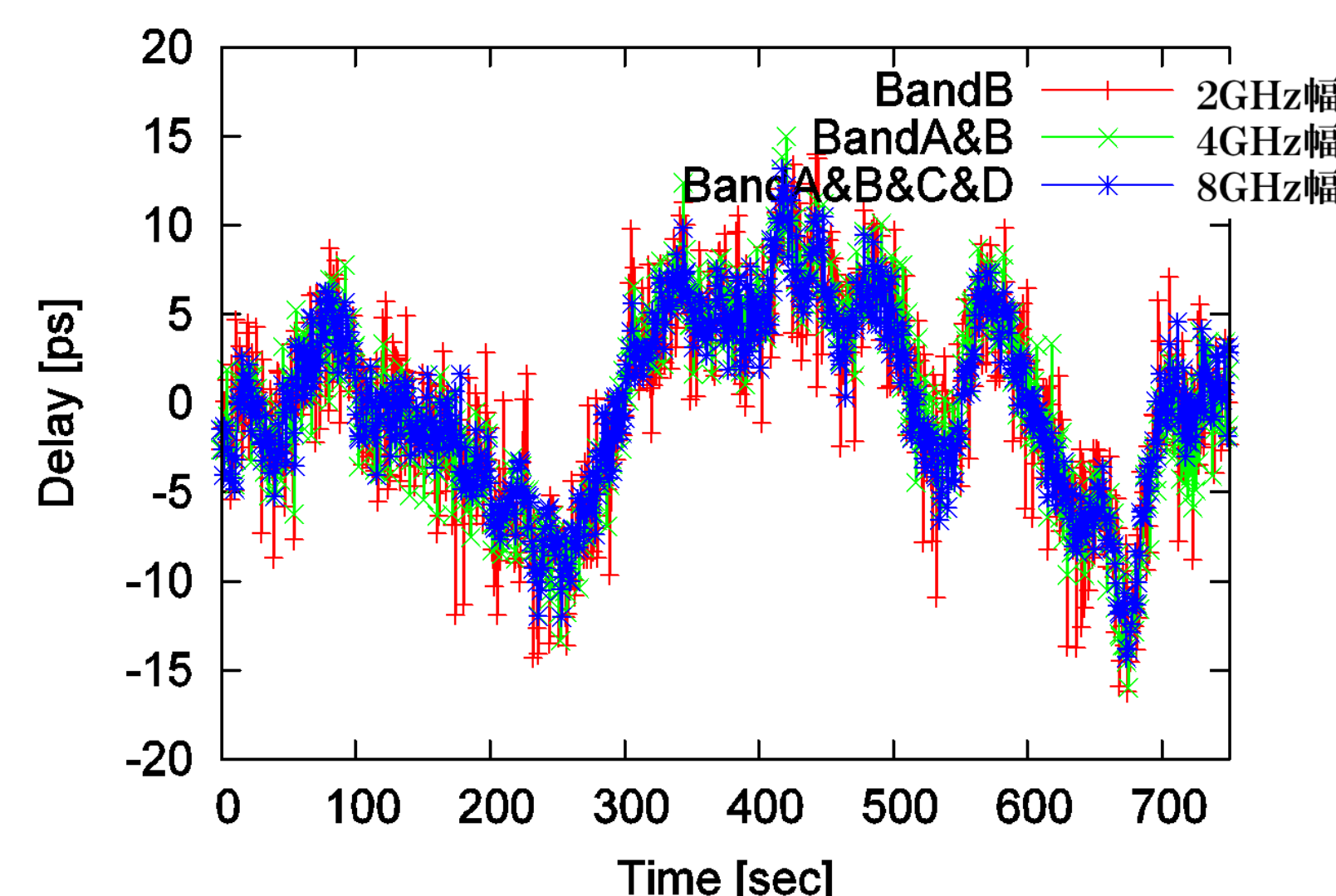


図6. 鹿島-石岡基線の8GHz帯域VLBI観測で計測された1秒毎の遅延量(大局的な変動を除いたもの)。帯域幅に依存せず、数十秒の時間スケールで数ピコ秒の変動が見られ、これは大気の影響が見えていると考えられる。