

Development of Broadband VLBI System

関戸衛¹, 岳藤一宏¹, 氏原秀樹¹, 近藤哲朗¹, 堤正則¹, 宮内結花¹, 川合栄治¹, 長谷川新吾¹, 瀧口博士¹, 花土ゆう子¹, 小山泰弘¹, 福崎順洋², 小室純一¹, 寺田健次郎¹, 難波邦考¹, 高橋留美¹, 岡本慶大¹, 青木哲郎¹, 池田貴俊¹, 渡部謙一³, 鈴木智也³

(1)国立研究開発法人情報通信研究機構 (2)国土交通省国土地理院, (3)産業技術総合研究所 計量標準総合センター

Abstract

NICTはGALA-Vと名づけた新しい広帯域VLBIシステムを遠隔周波数比較を目的として開発している。遠隔地で小型アンテナに接続された原子標準器の周波数同士をVLBI観測により比較するものである。小型アンテナの受信感度における不利を従来に比べて10倍広い周波数帯域を観測することで補償する。我々はカセグレンフィードである34mアンテナに搭載するための広帯域フィードIGUANA-H(6.5-15GHz)とNINJA(3.2-14.4GHz)を独自開発し、産業技術総合研究所とNICT小金井の間でUTC[NMIJ]-UTC[NICT]を比較し性能評価を行っている。更に、国土地理院が茨城県石岡市に新たに設置した、次世代測地VLBI観測システム(VGOS)用の13mアンテナと鹿島34mアンテナの間で8GHzのバンド幅で広帯域VLBI実験を行い、1秒間の観測でサブピコ秒の精度で遅延計測ができることを世界で初めて実証した。

2. Technology Development of the Broadband VLBI System

現在入手可能な広帯域フィード(Eleven Feed[1],QRFH[2])はいずれも120度程度の広いビーム幅を持っているため、次世代の測地VLBIシステムとしてIVSが推進するVGOSシステムのアンテナは全てRing-Focusという特殊な光学系を採用している。Ring-Focusは受信機を副反射鏡のすぐ近くに設置するもので、これらのフィードを採用する限り広帯域の電波望遠鏡は新規建設が必要となる。我々は、カセグレンタイプの鹿島34mアンテナに搭載するためIGUANA-Hフィード(6.5-15GHz)、NINJAフィード(3.2-14.4GHz)と名づけた2種類の広帯域フィードを独自開発した。これらのフィードは広い帯域にわたって34mアンテナに対応した約34度のビーム幅を持つ。受信された直線偏波の信号は周波数変換なしにRF信号のまま広帯域の光伝送装置を使って地上の観測室に伝送され、ダイレクトサンプラK6/GALAS(図3)によりRF信号のまま16GHzの速度で直接サンプリングを行って、デジタル信号に変換する。サンプラのデジタルフィルタ機能により1GHzバンド幅の信号がVDIFフォーマットの packets として10GBase-srのインターフェースから出力され、Network越しにPCで受信され記録される。K6/GALASの仕様パラメータを表1に示す。

表1. ダイレクトサンプラK6/GALASの仕様

サンプリングレート	16384MHz
量子化ビット	3 bits
アナログ入力数	2
最大入力周波数	16.4 GHz
出力量子化ビット数	1 or 2 bit
出力ポート数	4 ports
出力インターフェース	10GBASE-SR
出力データフォーマット	VDIF/VTP/UDP



図2 NICT鹿島34mアンテナの受信機室に設置されたNINJAフィード(左)及びIGUANA-Hフィード(右)。



図3 ダイレクトサンプラK6/GALAS

4. Broadband VLBI Experiment with Ishioka VGOS station

国土地理院はIVSの提唱する次世代の測地VLBIシステムであるVGOS(VLBI2010 Global Observing System)システムに対応した新しいVLBIアンテナを石岡市に建設した。我々のGALA-Vシステムは、VGOSシステムとの共同観測を念頭にVGOSと互換性を持つように設計開発を進めてきた。石岡13mアンテナは、広帯域化した鹿島34mにとって広帯域VLBI観測可能な日本における唯一の相手局である。我々は鹿島34-石岡13m基線を使って、6-10GHzおよび11,13GHzの周波数の信号を6つの1GHz幅のデータとして取得し、トータル8GHz幅の世界初となるバンド幅合成処理に成功した(図6)。SNRから計算される理論的遅延計測精度は30フェムト秒にも達し、実際に1秒毎の遅延計測値のばらつきRMSは0.6psecを得た。図7は1秒ごとに測定された遅延量の時系列で、赤、緑、青のそれぞれのプロットは合成したバンド幅の違い(4, 6, 8GHz)に対応している。合成する帯域幅が広がるにしたがって計測値のばらつきが小さくなっているのがわかる。帯域幅が変わっても系統的な遅延の時間変動は変化せず、これは大気遅延のふらつきが観測されているものと解釈できる。もしこれが事実であれば、大気遅延の変動をサブピコ秒の精度の群遅延で計測した初めての例である。

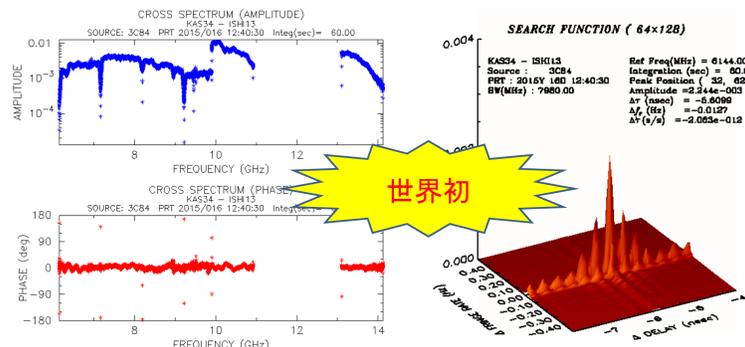


図6. 8GHz幅の相関処理の結果得られた相互相関スペクトルの振幅と位相を左の図に、帯域幅合成された遅延分解関数の遅延-遅延変化率平面上の振幅を右の図に示している。SNRから計算される遅延計測精度はこの場合(60秒観測)で27フェムト秒に達する。

1. Introduction

図1はGALA-Vシステムの概念図を示す。VLBI技術を使って原子時計の周波数比較を行うため、GALA-Vプロジェクトでは移設可能な小型アンテナを原子時計の開発研究機関に設置する。VLBI観測の信号帯雑音比(SNR)は観測周波数の帯域幅と二つの電波望遠鏡の感度の積に比例する(式1)ので、広帯域観測と大型アンテナとの共同観測によって、小型アンテナを使っても周波数比較のための十分なSNRが実現できる。

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

D: Antenna Diameter T_{sys}: System Temperature η: Antenna Efficiency
B: Receiving Bandwidth [Hz] T: Integration Time [sec]

GALA-Vシステムでは、広い周波数帯域の電波干渉と、データ処理後のバンド幅合成により得られる精度の高い遅延観測量を考慮して、ゼロ冗長間隔に並べた4.0GHz, 5.6GHz, 10.4GHz, and 13.6GHzにおいて4つの1GHz周波数幅の信号を取得する方式を採用している。これにより、実効周波数帯域幅は従来の約10倍の3.8GHzに達し、サイドローブの小さな高い遅延計測精度が実現できると見込まれる。

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

図4にNICT小金井本部と、つくばの産総研計量標準センターに設置した2つの小型アンテナを示す。これら2つのアンテナはETS-Lindgren社から市販されているQuad Ridge Horn Antenna (QRHA)を使用し、広帯域の観測が可能となっている。周波数比較性能を確認するため、



図4 GALA-Vシステムの3つの電波望遠鏡。産総研に設置した1.6m アンテナ(上左)、NICT/小金井本部に設置した1.5m アンテナ(上右)、およびNICT鹿島の34mアンテナ(下)。

UTC[NICT]の1GHzバンド幅のVLBI観測により実施し、GPSの計測結果、及びBPIMから公表されているUTC-UTC(k)との比較を行った(図5)。図5の結果は、VLBIの計測がGPSの結果やBPIMから提供されている結果と整合していることを示している。この比較では帯域幅1GHzを使った観測であり、更に広帯域のVLBI観測を行うことによって計測精度の改善が期待できる。

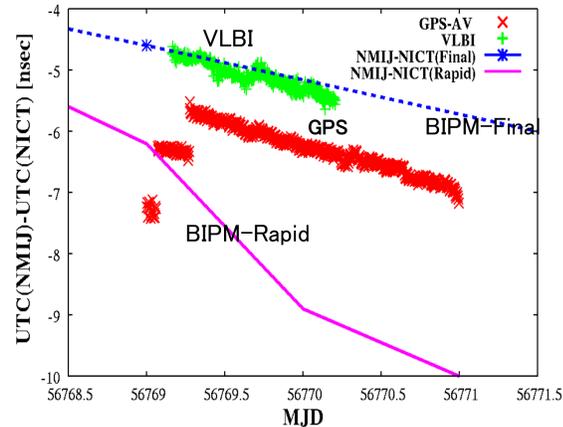


図5. UTC[NMIJ]-UTC[NICT]をVLBI, GPSの計測、及びBIPMから提供されるUTC-UTC(k)の値で比較した結果。

表2.異なるバンド幅でデータを合成した際の1秒間の遅延計測値について、平均値の周りのRMSを示す。

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

References

- Yang J., et al., "Cryogenic 2-13 GHz Eleven Feed for Reflector Antennas in Future Wideband Radio Telescopes" IEEE Trans. Ant. & Prop., Vol. 59, NO. 6, pp.1918-1934, 2011.
- Akgiray A., et al., "Circular QuadrupleRidged Flared Horn Achieving Near-Constant Beamwidth Over Multioctave Bandwidth: Design and Measurements" IEEE Trans. Ant. & Prop., Vol. 61, NO. 3, pp.1099-1108, 2013
- Kimura, M., "Development of the software correlator for the VERA system II", IVS NICT-TDC News No.28, pp.22-25, 2007.
- Kondo, T., & K. Takefujii, "On a Wide-Band Bandwidth Synthesis", NICT-TDC News No.34, pp.23-27, 2014.
- Rodriguez, V., "A Multi-octave Open boundary Quad-ridge Horn Antenna for Use in the S- to Ku-band", Microwave Journal, Vol. 49, pp.84- 92., 2006.

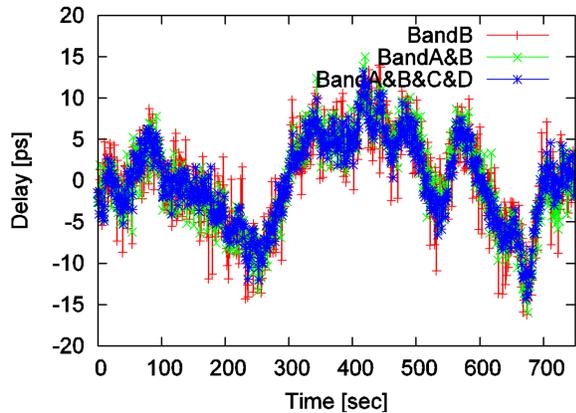


図7.帯域幅合成して得られた遅延(1秒積分)の観測値。赤、緑、青はそれぞれ2GHz,4GHz,8GHzの帯域を合成したデータである。