

広帯域 VLBI システムによる測地・周波数比較実験報告

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⁾, 瀧口博士⁽²⁾, 長谷川 新吾⁽¹⁾, 市川 隆一⁽²⁾, 小山 泰弘⁽²⁾, 花土 ゆう子⁽²⁾,
渡部 謙一⁽³⁾, 鈴山 智也⁽³⁾, 川畑 亮二⁽⁴⁾, 福崎 順洋⁽⁴⁾, 石本 正芳⁽⁴⁾,
若杉 貴浩⁽⁴⁾, 梅井 迪子⁽⁴⁾, 豊田 友夫⁽⁴⁾, 小室 純一⁽²⁾, 寺田 健次郎⁽²⁾,
難波 邦孝⁽²⁾, 高橋 留美⁽²⁾, 岡本 慶大⁽²⁾, 青木 哲郎⁽²⁾, 池田 貴俊⁽²⁾

(1):情報通信研究機構 鹿島宇宙技術センター

(2):情報通信研究機構 小金井本部

(3):産業技術総合研究所 計量標準総合センター

(4):国土地理院

2016年2月10日

1 はじめに

NICT は、原子時計間の周波数比較を目的とした小型広帯域 VLBI システムの開発を進めている [1, 2]。この広帯域システム GALA-V は国際 VLBI 事業 (IVS) が推進している次世代の広帯域 VLBI システム VGOS(VLBI Global Observing System)[3] と同様に 3-14GHz の周波数帯域から 4 つの 1GHz 幅の信号を受信・記録する。周波数比較局には、移設可能な小型アンテナを使用し、大型アンテナと共同観測することによって小型アンテナの弱点である受信感度を補って高精度の遅延計測を実現する。

これまでに、細いビーム幅 (HPFW~ 34 deg.) を持つ広周波数帯域フィードを独自開発し [4]、カセグレン光学系の電波望遠鏡である 34m アンテナに搭載して広帯域化を実現した。また高速サンブラ [5] を使った RF ダイレクトサンプリング方式 [6] により、安定した高精度の観測が可能となり、この相関処理結果から高精度に遅延を決定する広帯域バンド幅合成ソフトウェアを開発して、1 秒間の観測でサブピコ秒精度の遅延計測ができるシステムを構築した [7]。

システムの実証実験のため、小型アンテナ 2 基 MARBLE1, MARBLE2 をそれぞれ NICT 小金井本部 2 号館屋上と産業技術総合研究所 (つくば) の計量標準センターに設置し、この基線をテストベッドとして UTC(NMIJ)-UTC(NICT) の周波数比較ができる試験環境を準備してきた。NICT 小金井の MAR-

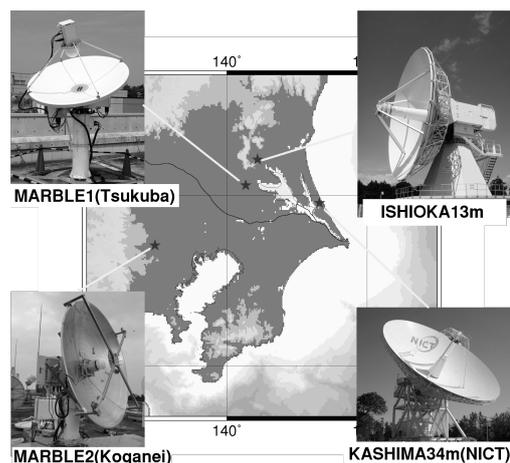


図 1: 2016 年末現在、広帯域観測可能な日本国内の VLBI アンテナは、国土地理院の石岡 13m アンテナ、鹿島 34m アンテナと小型アンテナの MARBLE1(つくば)、MARBLE2(小金井) の 4 基である。

BLE2 については、2016 年 3 月に直径 1.5m のプライムフォーカス光学系を直径 2.4m のカセグレン光学系に改修した。これにより、4 倍以上感度が改善されたことをその後の実験で確認している。

VGOS システムの仕様に対応する広帯域の受信が可能な VLBI アンテナは、国内では 2014 年に国土地理院が整備した石岡測地観測局の 13 m アンテナ、NICT の鹿島 34m アンテナ、及び小型 VLBI 局である MARBLE1(1.6m) アンテナ及び MARBLE2(2.4m) アンテナ

ナである (図 1)。それぞれのアンテナの搭載フィードと受信周波数範囲及び性能を表 1 に示す。

2016 年は、広帯域の観測が可能な国内のアンテナを使ってシステムの安定と計測精度の評価のため 24 時間以上の VLBI 観測を複数回実施してきた。以下で、この実験で得られた結果等について報告する。

2 広帯域 VLBI 観測の結果

2.1 測地観測結果

GALA-V プロジェクトでは、2016 年内に 10 回の測地・周波数比較の実験を実施した (表 2)。周波数比較を目的とする VLBI 観測の場合も、測地 VLBI 観測と同様に方角の異なる多くの天体を切り替えて遅延量を計測する。得られた計測結果は測地 VLBI の標準データベースである Mark3DB 形式で保存し、NASA/GSFC が開発した VLBI 解析ソフトウェア Calc Ver.11/Solve Ver.2014.2.21 を使って解析を行った。通常の測地 VLBI 実験が 24 時間であるのに対して、我々の目的は原子時計の比較であるため、観測時間が 30 時間以上の長時間の観測を行っている。通常の VLBI 観測と異なり、GALA-V プロジェクトでは大型-小型基線のデータから併合遅延関係を利用して小型-小型アンテナ間の遅延量を求め、これを解析に使用する。基準局 R と小型アンテナ A、B 局との遅延時間 $\tau_{RA}(t_R)$ 、 $\tau_{RB}(t_R)$ を使って、基準エポック t_R における AB 基線の遅延時間 $\tau_{AB}(t_R)$ を表す式は、1 次近似式として次式で与えられる。

$$\tau_{AB}(t_R) = \tau_{RB}(t_R) - \tau_{RA}(t_A) - \dot{\tau}_{RA}(t_R) \times \tau_{RA}(t_R). \quad (1)$$

観測局 Kashima 34 (O)、MARBLE1 (A)、MARBLE2 (B) の参加する観測では、OA、OB 基線で遅延量を計測し、(1) 式により AB 基線の遅延データを算出して解析する。AB 間の基線解析残差の例 (11 月 25-28 日の観測データ) の時系列プロットと、そのヒストグラムを図 2 に示す。誤差伝搬則に従えば OA、OB 基線のそれぞれの遅延誤差の二乗和が AB 基線のデータの誤差に伝搬する。しかし我々の広帯域 VLBI 実験の実際の解析残差の Root-Mean-Square (RMS) は OA、OB、AB 基線それぞれ、15.6ps、14.2ps、14.2ps であり、(1) 式によりそれぞれの線形形で算出された遅延量の解析残差は増加していない。このことは図 2 のヒストグラムの分布幅が広がっていないこと

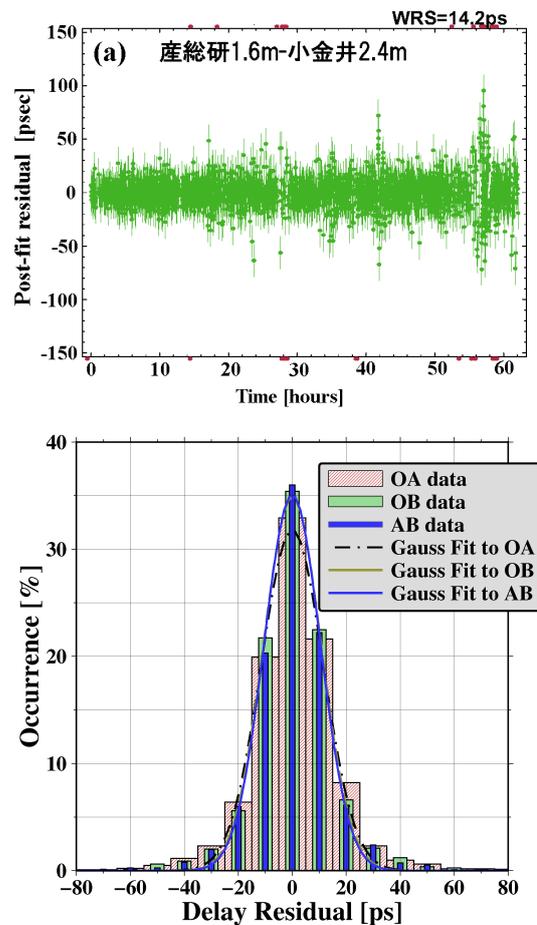


図 2: 2016 年 11 月 25-28 日の観測結果において、(a) 式 (1) により得られた遅延量の AB 基線の解析残差プロットと、(b) 残差のヒストグラムを OA、OB、AB 基線で比較した。

からも確認できる。今回の広帯域観測の場合、SNR から推定される OA、OB 基線の遅延の計測精度は約 1ps 以下であり解析残差の広がりより十分小さい。さらに、重力変形や長い信号伝送系などによる大型アンテナ特有の遅延誤差が相殺されることで、OA・OB 基線よりもむしろ AB 基線のほうが解析残差の改善が期待できる。このように広帯域観測 VLBI では、口径 1.6m の超小型 VLBI アンテナであっても、大型アンテナと組み合わせた観測により、遅延計測精度は十分小さな値となり、純粋に大気の不定性誤差が測地解析の精度を支配するまで、精度向上が実現できる。

併合遅延により得られた AB 基線のデータを解析

表 1: 国内の広帯域 VLBI 局のアンテナ性能

アンテナ名称	フィード (製作)	受信周波数域	搭載時期	LNA	SEFD	Tsys*
鹿島 34m	IGUANA-H (NICT)	6.5-15GHz	2014-2015	常温 LNA	1000-1500 Jy	150-200 K
	NINJA (NICT)	3.2-14GHz	2015-	常温 LNA	2000 Jy	100-200 K
石岡 13m	ELEVEN (Chalmers Univ. of Tech.)	2-14GHz	2015	冷却 LNA	1200-8000 Jy	
	QRFH (Caltech)	2-14GHz	2016	冷却 LNA	1500-3000 Jy	
MARBLE1	FHA(Rindgren Co.Ltd)	1-14GHz	2013-	常温 LNA	1-3 MJy	200-400 K
MARBLE2	FHA(Rindgren Co.Ltd)	1-14GHz	2013-2016	常温 LNA	1-3 MJy	250-400 K
	NINJA(NICT)	3-14GHz	2016-	常温 LNA	0.2-0.3 MJy	100-200 K

表 2: 2016 年に実施した小型アンテナ間の VLBI 実験

2016 年 観測日	観測局	Scan 数 (Used/Total)	観測時間	Scan 当たりの平均時間
1 月 26-27 日	鹿島 34-小金井-産総研	1330/1500	46 時間	110 秒
2 月 12-13 日	鹿島 34-小金井-産総研	1250/1600	47 時間	106 秒
2 月 28-29 日	鹿島 34-小金井-産総研	1050/1450	49 時間	122 秒
5 月 16-17 日	鹿島 34-小金井-産総研	1220/1410	31 時間	79 秒
6 月 24-25 日	鹿島 34-小金井-産総研	1800/1850	49 時間	95 秒
7 月 10-11 日	鹿島 34-小金井-産総研	1960/2003	48 時間	86 秒
8 月 23-24 日	石岡 1 3-小金井	1372/1385	43 時間	112 秒
9 月 12-13 日	石岡 1 3-小金井-産総研	1600/1640	35 時間	77 秒
11 月 25-28 日	鹿島 34-小金井-産総研	2193/2237	62 時間	86 秒
12 月 9-12 日	鹿島 34-小金井-産総研	2022/2063	62 時間	109 秒

して得られた基線長データの時系列を図 3 (a) に示す。2 月 12 日の観測及び、7 月 10 日の観測の結果は、ほかの観測結果と、それぞれ、5mm、10mm ほどずれた結果となっているが、現在のところこの原因は不明である。全体のトレンドとして年間 4.4mm の短縮が見られるが、A 局、B 局とも建物の屋上に設置しており、A 局 (つくば) の場合アンテナを建物にアンカー固定していないため、地殻変動としての議論はここでは困難であるが、この系統的なトレンドを差し引くと、2 月 12 日および、7 月 10 日のデータを除いて、基線長の再現性は $\pm 2\text{mm}$ 程度あると考えられる。基線長結果のばらつきの原因としては、一連の実験が受信帯域を拡大するための受信機開発と並行して観測を行っているため、必ずしも一様な条件で実施したものではないことが挙げられる。周波数配列やアンテナ焦点調整が進むにつれ、年の後半にはより高い受信感度と遅延計測精度にシステム全体が改善しており、今後安定した状態で測地観測精度の評価により再現性の確認を行いたい。

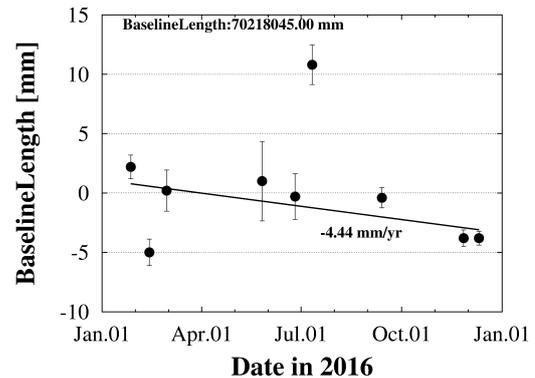


図 3: 2016 年の GALA-V 実験の AB 基線のデータを解析して得られた AB 基線長の時系列。

2.2 周波数比較結果と今後の課題

測地 VLBI の解析ソフトウェア SOLVE では、2 次多項式と一定インターバルの折れ線関数の和をモデルとして、基準局に対する他の局のクロックが推定される。我々は推定されたクロックに Post-fit 残差を

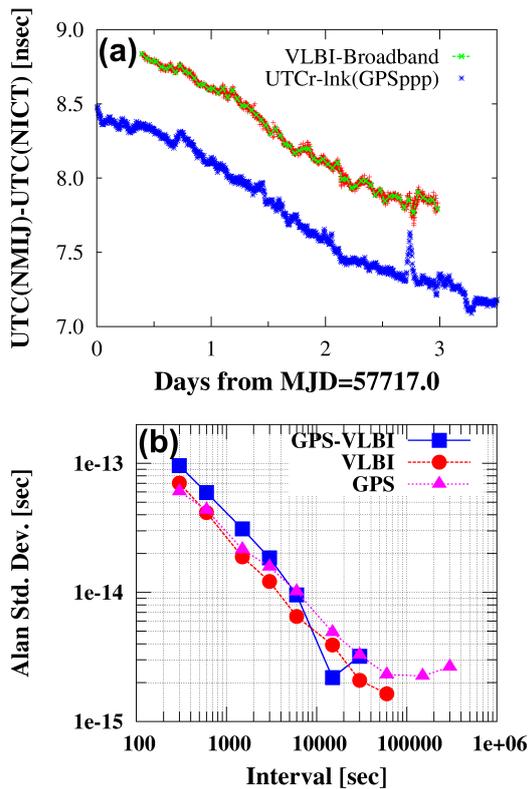


図 4: (a)GPS と VLBI で比較した UTC(NMIJ)-UTC(NICT) のクロック差の変化と、(b)GPS、VLBI それぞれの時系列及びその差の時系列から計算したアラン標準偏差。

加えて VLBI 計測による 2 局のクロック差の測定値とする。解析対象のデータは上に述べたように OA・OB 基線から併合遅延関係により算出された AB 基線のデータである。測定結果の例として 2016 年 11 月 25-28 日の UTC(NMIJ)-UTC(NICT) のクロックの比較を、AB 基線の VLBI の結果と、GPS-ppp による比較結果 (BPIM からの公表値)、及びそれぞれのデータ列のアラン標準偏差のプロットを図 4 に示す。

VLBI は電波源の位置が基本的に不変であり、GPS の軌道推定に見られる衛星位置不連続などの問題がない点で GPS より有利である。一方、記録容量の限界から VLBI の連続観測は長くても 3 日程度に制限されるという欠点がある。この点については、サンブラのクロックを比較対象の原子時計にロックしたまま連続運転すれば、実験の間が数週間空いても間欠的な VLBI 観測により原子時計の位相の動きを長期にモニタすることが可能である。今後、1ヶ月以上のインターバルでのこのような原子時計間の比較実証実験を行っていく計画である。

プロジェクトではこれまで国内の NICT-NMIJ 間のクロックの比較を行ってきた。最終的なプロジェクトの目標である大陸間基線での周波数比較のため、今後海外の周波数標準器を持つ機関に小型アンテナを設置し、クロック比較を行うことを検討している。国際長基線の場合には (a) 受信機の直線偏波の位置角が並行しておらず時間的に変化するため、VV、HH、VH、HV の従来の 4 倍の相関処理を行い、異なる偏波の遅延量の合成を行う必要がある。(b) 天体の構造の影響について注意と研究が必要である。

参考文献

- [1] 関戸衛、他、“広帯域 VLBI システムの開発”, 2015 年度 VLBI 懇談会シンポジウム, 2016.
- [2] Mamoru SEIDO, et al., “An Overview of the Japanese GALA-V Wideband VLBI System”, IVS 2016 General Meeting Proceedings, NASA/CP-2016-219016, pp.25-33, 2016.
- [3] Petrachenko, B. , et al., “Design Aspects of the VLBI2010 System”, NASA Technical Memorandum NASA/TM-2009-214180,2009, ftp://ivscc.gsfc.nasa.gov/pub/misc/V2C/PR-V2C_090417.pdf.
- [4] Ujihara, H., “Development of Wideband Feed for Kashima 34mAntenna”, Radio Science, submitted, 2016.
- [5] Oyama.T, et al., “The first simultaneous mapping of four 7 mm SiO maser lines using the OCTAVE system”, Publ., Astr. Soc. Japan, **68** (6), p.105, doi: 10.1093/pasj/psw099, 2016.
- [6] Takefuji,K., et al., ”High-order Sampling Techniques of Aliased Signals for Very Long Baseline Interferometry”, Publ. Astron.Soc. Pacific, **124**, pp.1105-1112, 2012.
- [7] Kondo, T. and K. Takefuji, “An algorithm of wideband bandwidth synthesis for geodetic VLBI”, Radio Sci., **51**, doi:10.1002/2016RS006070, 2016.