

Development Status of Broadband VLBI System (Gala-V) -(II)

関戸衛¹、岳藤一宏¹、氏原秀樹¹、堤正則¹、宮内結花¹、長谷川新吾¹、近藤哲朗¹、
川合栄治¹、市川隆一¹、瀧口博士¹、後藤忠広¹、渡部謙一²、鈴山智也²、小山泰弘¹

1) 情報通信研究機構 時空標準研究室

2) 産業技術総合研究所 周波数システム研究室

概要

NICT では、VLBI 技術を使って大陸間距離で周波数比較を実施することを目的として、可搬型小型 VLBI アンテナと大型アンテナを組み合わせた広帯域の VLBI システム Gala-V の開発を進めている。広帯域観測システムは、観測周波数範囲を次世代の測地 VLBI システムとして IVS(国際 VLBI 事業) が提唱している VGOS(VLBI Global Observing System) と互換性と共同観測を念頭に開発を進めており、国土地理院の VGOS システム開発のサポートも行っている。2014 年には、NICT が独自開発したフィードを鹿島 34m アンテナに搭載して広帯域 (6.5-15 GHz) の直線偏波 VLBI 観測が可能となった。小型アンテナの一つを産業技術総合研究所 (つくば NMIJ) の建物屋上に設置し、情報通信研究機構 NICT(小金井) に設置しているもうひとつの小型アンテナとあわせて、測地 VLBI 実験により水平精度 5mm で局位置を定めた。その後、鹿島 34m アンテナを仲介として、NICT と NMIJ それぞれの標準機関が維持する UTC 間の時刻・周波数比較の予備実験を開始している。これまでのところ従来の 8 GHz の周波数を使った VLBI 観測で NICT と NMIJ のクロックを比較しており、GPS と同程度の周波数比較を実現している。今後は新たに開発した広帯域フィードを使った観測と、広帯域のバンド幅合成の開発を進めていく。

1 プロジェクト概要

時間・周波数の計量標準の分野では、現在使用されているセシウム原子時計に代わる新しい周波数標準器として、光の周波数をカウントする光原子時計の開発が進んでいる。周波数の定義の高制度化のため、国際的な周波数比較が重要となっている。我々のグループでは建物の屋上に設置可能な可搬型の小型 VLBI アンテナと大型アンテナを組み合わせた、広帯域の観測システムを開発・整備しており [1]、2014 年には原子時計を開発している NICT 小金井本部と、産業技術総合研究所 (つくば市) にそれぞれ小型アンテナを設置して、測地 VLBI 観測により局位置を定め、周波数比較実験を開始した。

2 広帯域観測システムの鹿島・つくば、小金井への整備

NICT で独自開発した広帯域フィードの試作機 1 号を 34 m アンテナに設置し、2014 年前半で、6.7 GHz と 12.2 GHz の初フリンジを検出した [2]。更に広帯域のフィードの開発を進めており、詳細については 2014 年度 VLBI 懇談会シンポジウムの報告 [3] を参照されたい。データ取得システムについては、2013 年度の VLBI 懇談会シンポジウムで報告したよ

うに [1]、1 GHz 前後の中間周波数に周波数変換して ADS3000+ を使って取得するシステムと、ダイレクトサンブラ GALAS により周波数変換なしにデータを取得する方法を併用している。遠隔操作で運用する小型アンテナにおいてはシステムの簡易化のため GALAS によるダイレクトサンプリング方式を採用し、34 m アンテナでは周波数変換後に ADS3000+ を使ってデータ取得を行なっている。現在までの実験では、従来測地 VLBI で使用されている 8 GHz の周波数で帯域幅 1024MHz の測地 VLBI 観測を行い、産総研 3-7 棟と NICT 小金井 2 号館の屋上に設置している小型アンテナの位置を決定した。現在までの整備状況と 4 月 22-23 日、5 月 22-23 日、5 月 30-31 日の 3 回の測地実験によって得られた局位置 (鹿島 34 m アンテナの位置を基準とした) を表 1 に示す。

3 VLBI 周波数比較 (NICT-NMIJ)

24 時間の測地 VLBI 実験:(4 月 22-23 日、5 月 22-23 日、5 月 30-31 日) の他に、NICT と NMIJ のそれぞれの標準機関が維持している UTC[NICT] と UTC[NMIJ] を比較するため、8 月 1-3 日には 3 日間連続した VLBI 実験を実施した。クロックの比較解析

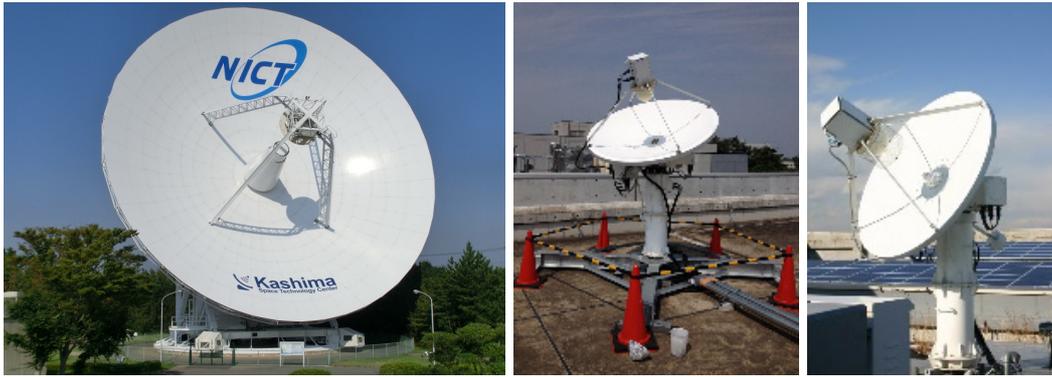


図 1: Gala-V プロジェクトで広帯域 VLBI 観測のため整備しているアンテナを示す。左から 34m アンテナ (鹿嶋市)、MARBLE1(つくば市)、MARBLE2(小金井市)。

表 1: Gala-V システムの整備状況. GALAS はダイレクトサンプラ OCTAD-G の別名であり、RF 周波数の信号を直接サンプリングし、デジタルフィルタによって 1 GHz の帯域を抽出・記録する。局位置は Kashima34 を固定して、MARBLE1,MARBLE2 の局位置を推定し、測定再現性は水平 5mm, 鉛直 3cm 程度である。

観測局	Kashima34	MARBLE1	MARBLE2
Freq. Range	6.5-15 GHz	3.5-14 GHz	3.5-14 GHz
偏波	V-linear	V-linear	V-linear
データ収集系	DownConv+ADS3000+	GALAS	GALAS
X[mm]	-3997650058.0	-3962276706.9	-3942062034.9
局位置 Y[mm]	3276690071.0	3308884002.6	3368277053.9
Z[mm]	3724278461.0	3733538092.9	3702003875.0

では、小型アンテナである MARBLE1、MARBLE2 の基線の VLBI 遅延量を解析するのであるが、センシティブリティの制約から小型アンテナの間の直接の観測は成立しないため 34m(O)-MARBLE1(A),34m(O)-MARBLE1(B) の基線の観測データの線形結合から MARBLE1(A)-MARBLE1(B) の基線の遅延量を求めて解析を行う。使用した遅延量の線形結合には以下の式を使用した。

$$\tau_{AB} = \tau_{OB} - \tau_{OA} - \frac{d\tau_{AB}}{dt} \times \tau_{OA} \quad (1)$$

天体の構造の影響を無視すると、地上の大陸間基線の場合でも誤差は 0.2 ps 以下である。

8 月 1-3 日に行った観測データの τ_{OA}, τ_{OB} の解析を行った場合の遅延残差と、線形結合によって得られた τ_{AB} のデータの解析残差について、ヒストグラムを比較してみると、図 2 の左パネルのように、ガウス分布に従って分布し、線形結合によって得られた τ_{AB} の解析残差は分散の幅 $\sqrt{2}$ 倍程度広がっているこ

とがわかる。クロックの変動の時系列データを、同図の右パネルに示している。VLBI によって推定されたクロック変動は、GPS の結果や、BIPM(国際度量衡局) が取りまとめている UTC-UTC[NICT], UTC-UTC[NMLJ] から得られる UTC[NICT]-UTC[NMLJ] の変動とよく一致している。GPS には、GPS 衛星の軌道の不連続性によると思われる飛びがみられる。8 月 1-3 日の VLBI の途中のデータが欠落しているのは、VLBI 観測の失敗によるデータのロスが一部生じたためであり、GPS のようなクロックの測定で飛びが発生しているわけではない。VLBI 観測の場合には GPS に見られるようなクロックのジャンプは原理的に発生しないという利点があり、今後このことを実証していく予定である。

図 3 に、4 月 22-23 日、5 月 22-23 日、5 月 30-31 日、及び 8 月 1-3 日のすべての期間のクロック変動データを使って求めた修正アラン標準偏差 (MDEV と略す) を示している。

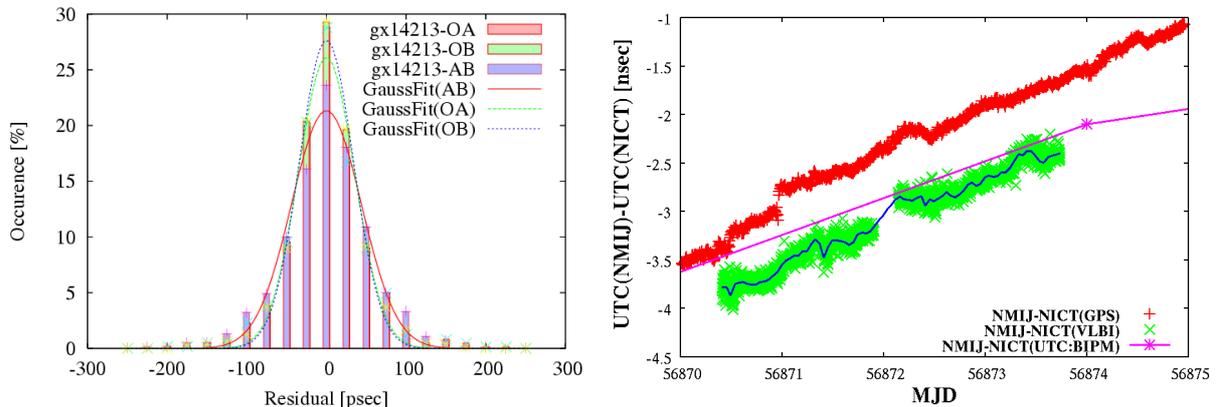


図 2: 8月 1-3 日の VLBI 観測データについて、OA,OB 基線の遅延解析残差と、式 (1) を使って線形結合で作成した τ_{AB} のデータの解析残差のヒストグラムを左のパネルに、推定されたクロック変動を右のパネルに示す。クロックの変動は、GPS 観測によって得られたデータと、BIPM がとりまとめたデータから、UTC[NICT]-UTC[NMIJ] もプロットしている。

4 今後の予定

現在までの VLBI 観測は、34 m アンテナについては従来の 8 GHz 冷却受信機を使用した VLBI 観測である。34m アンテナにも広帯域フィードと常温の LNA を搭載しており 6.7 GHz, 10 GHz 12.2 GHz などいずれの周波数でもフリンジを検出している。今後の周波数比較実験では広帯域の VLBI 観測と、その信号のバンド幅合成による高精度な遅延計測のソフトウェア開発等を進めていく。

また、国内では 2014 年に国土地理院石岡局の VGOS アンテナが完成し、NICT はこの VGOS 局の立ち上げ作業を支援している。石岡局と、34m アンテナの間で SNR のよい広帯域観測を行い、データ処理ソフトの開発のため必要となる試験観測データ等を取得する。

鹿島 34 m アンテナな独自開発の広帯域フィードにより、既存の大型アンテナとしては米国 Haystack 観測所に次いで世界 2 番めに広帯域受信ができる施設となった。国際的には VGOS の広帯域フィードを搭載したアンテナは、米国国内の Westford(MIT

Haystack 観測所)、GGAO(NASA/GSFC) で試験観測が実施されている他は、大陸間基線の VLBI 観測はまだ実施されていない。現在、KOKEE(米国 USNO)、Wettzell(ドイツ BKG) が広帯域フィードを搭載した観測の立ち上げを行なっているが、我々は NICT の 34 m アンテナで広帯域の VLBI として世界初の大陸間 VLBI 観測を実現することを目標として、米国との VLBI 実験を計画している。

参考文献

- [1] 関戸 他, “広帯域 VLBI システム Gala-V の開発”, 2013 年度 VLBI 懇談会シンポジウム集録, pp.42-44, 2014.
- [2] 岳藤 他, “GHz バンド幅の広帯域 VLBI へ向けて”, 2013 年度 VLBI 懇談会シンポジウム集録, pp.126-128, 2014.
- [3] 氏原秀樹, “広帯域フィードの開発”, 2014 年度 VLBI 懇談会シンポジウム集録, this issue, 2015.

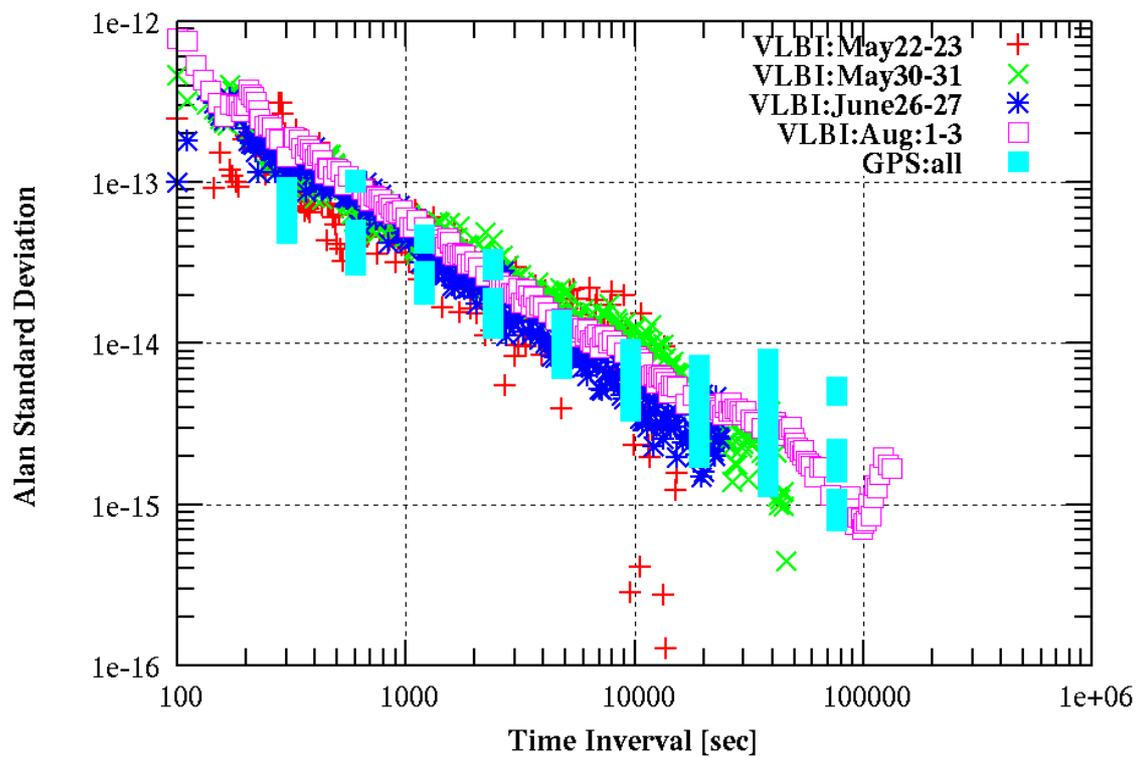


図 3: 4月 22-23 日、5月 22-23 日、5月 30-31 日、及び 8月 1-3 日のクロック変動のデータから、修正アラン標準偏差 (以下 MDEV と略する) を計算した結果を示す。VLBI データはインターバルが一定でないので、MDEV を計算する際にデータがない点については前後の測定点の直線補間の値を使って計算した。GPS のデータから計算した MDEV もあわせて表示している。GPS の場合、一定間隔 (このデータの場合 300 秒) のデータが得られる MDEV の値は 300 秒の 2 倍、4 倍、8 倍等のインターバルについて計算しており、棒グラフ状に見えるのは、複数の実験期間データをすべて重ねあわせているためである。