

広帯域VLBIシステムGala-Vの開発 ～VLBIによる遠隔周波数比較～



電磁波計測研究所
時空標準研究室
副室長
関戸 衛

Abstract

新しい秒の定義を実現するためには、各国の光周波数標準器の周波数を精密に比較する必要があり、大陸をまたぐ遠距離の周波数比較には、宇宙測地技術が有効である。我々はVLBI技術を周波数比較に応用するため、原子周波数標準器を開発している機関に設置可能な、小型で広帯域のVLBIシステムを開発している。2014年前半に小型アンテナを産業技術総合研究所(NMIJ)に設置し、原子時計を開発している研究機関どうし(NICT-NMIJ)をテストベッドとして、技術開発を進めている。VLBIを使った方法ではGPSを使った比較の場合に避けられない「Day Boundaryのクロックのとび」が原理的にないことなどの特徴があり、長期のスパンではGPSより高い計測精度が期待でき、検証を進めている。



図1 産総研(つくば)に設置した小型アンテナ(左)と、NICT2号館屋上の小型アンテナ(中央)、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(右)。

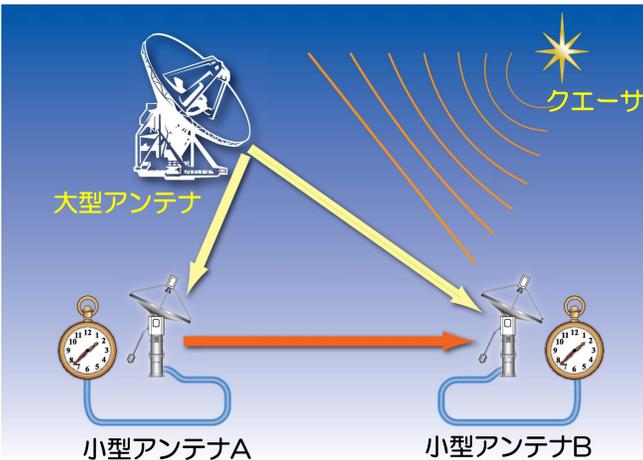


図2 大型アンテナを介して、小型VLBIアンテナ間の周波数比較を行う、VLBI周波数比較の概念図。

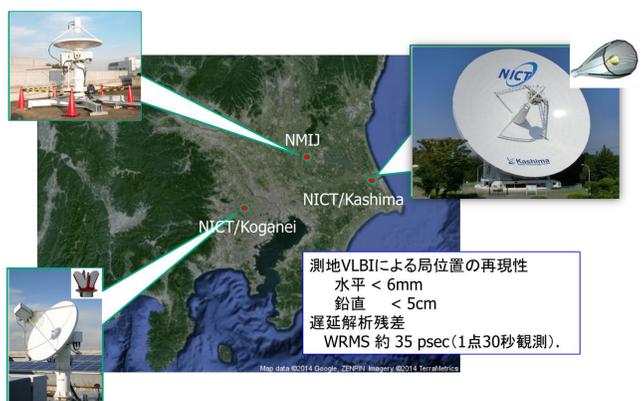


図4 2014年3月に小型アンテナの一つMARBLE1を産総研に設置し、UTC(NICT)-UTC(NMIJ)の比較ができるようになった。

1. 小型・大型アンテナを組み合わせた電波天体の受信

周波数標準器を開発している研究機関の間でのVLBIによる周波数比較を実用化するためには小型で移設可能なシステムが必要である。一方、VLBIで観測する天体の電波は携帯電話の電波より16桁程度も弱く、十分な信号対雑音比SNRで観測するためには、システムは極めて高い感度を要求される。移設可能な小型のアンテナをではゲイン小さいという点で不利であるが、観測帯域幅を大きく取り、大型アンテナと組み合わせて観測することにより(図1)、2台の小型アンテナ間の周波数比較が実現可能である(図2)。VLBI観測の信号対雑音比(SNR)とアンテナ直径の関係を下記に示す。大型アンテナと組みわせると、小型アンテナでも数億光年彼方の電波星の信号を使って、ピコ秒精度の遅延計測ができる。

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

D: アンテナ直径
T_{sys}: 受信機・システム雑音温度
η: アンテナ開口効率
B: 受信帯域幅 [Hz]
T: 積分時間 [sec]

2014年3月に小型アンテナを、原子標準器を開発している産総研つくばの計量標準総合センター(NMIJ)の建物屋上に設置した(図4)。NMIJとNICT(2号館屋上)の小型アンテナの位置を、4月～5月にかけて3回のVLBI観測によって決定した(図3)。直径1.6mの小型アンテナであってもVLBIにより水平5mm鉛直4cm前後の再現性でアンテナ位置の測定ができる。

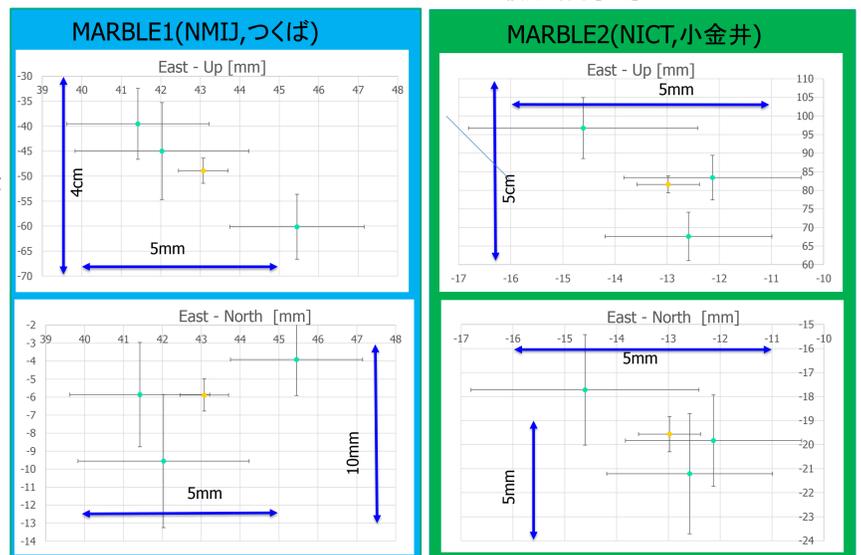


図3 産総研(つくば)の小型アンテナMARBLE1と、NICT2号館屋上の小型アンテナMARBLE2のアンテナ位置を測地VLBI解析で求めた結果。

2. VLBIを使った周波数比較(NICT-NMIJ)

NICT小金井および、産総研(NMIJ)の小型アンテナと鹿島34mアンテナの3局を使って4月～5月に行ったVLBI実験の観測データから、UTC(NICT)とUTC(NMIJ)の周波数の比較を行った。同時に観測したGPSの解析結果と合わせて結果を図5に示す。VLBIおよびGPSによって求められたクロックの変動差(NMIJ-NICT)はBPIMが公表しているUTC(NMIJ)とUTC(NICT)との差とよく一致している。GPSの計測結果には、GPS衛星軌道の推定結果の不連続性によるDayBoundaryのクロックジャンプがあるが、VLBIの観測にはそのようなクロックの不連続が入ることは、原理的にないので、長期間の周波数比較結果において、GPSを上回る精度で周波数比較を行うことが期待できる。今後、長いインターバルでの実証実験を行い、このことを確認したい。

3. 今後の展望

上記の報告は、X-band(1GHz帯域)1CHのみの計測結果である。現在、当初の計画である広帯域(3-14GHz)のVLBI観測を可能にするための受信フィードの開発を進めており(氏原氏の発表参照)、より高い遅延計測精度と観測感度の実現を目指して開発を進めている。

4. 謝辞

GPSの観測と解析結果は同研究室の瀧口氏、後藤氏、市川氏に協力いただいた。小金井の小型アンテナと鹿島34mアンテナはJGN-Xの10Gbpsのネットワークで接続されており、大容量の観測データを迅速に伝送・処理するために高速ネットワークを活用させて頂いている。その整備に当たってはJGN-XのNOC池田貴俊氏や情報システム室の難波邦考氏、高橋留美氏に多大な協力を頂いています。ここに感謝します。

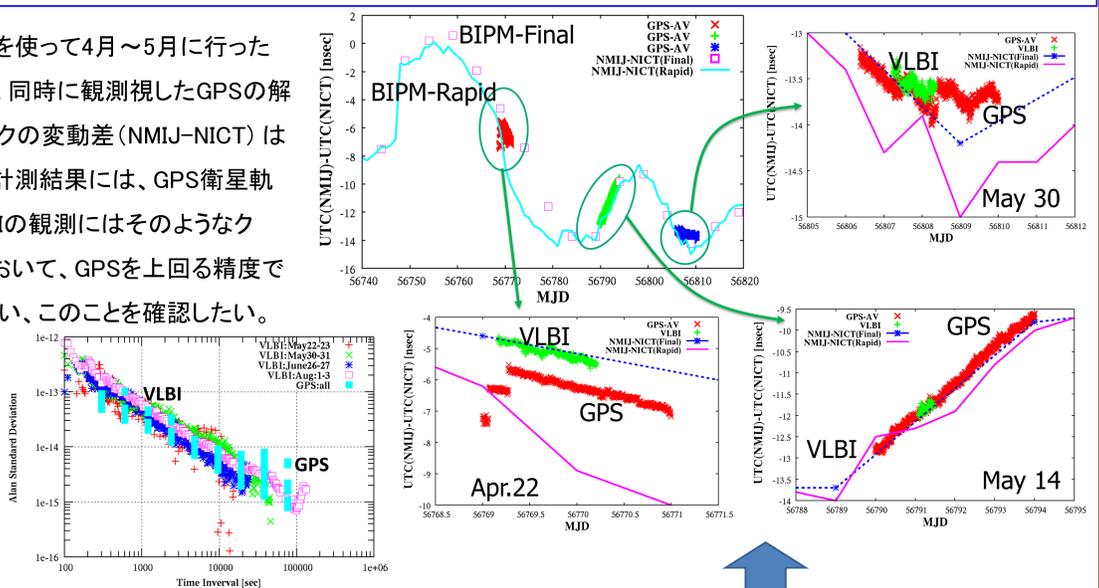


図6 X-band1バンド(1GHz帯域)で計測したVLBI(小型アンテナ間)の周波数比較性能をGPS(PPP解析)の結果と比較したアラン標準偏差の値。現在両者の計測精度はほぼ同程度であるが、我々のVLBIシステムでは最終的に4バンドを合成することでGPSを上回る周波数比較性能を目指している。

図5 計測されたUTC(NMIJ)-UTC(NICT)のクロック差。4月～5月の小型アンテナ間のVLBI観測によって求めた結果は、GPSとともに、BIPMから報告されているUTC(NMIJ)-UTC(NICT)のClock差とよく整合している。時刻差の絶対値は校正していないので、VLBIとGPSのデータの縦軸の位置はBIPMの公報最終値(Final)にあわせて適宜シフトして表示している。