

5-4 日伊基線で実施した広帯域 VLBI 実験のデータ処理

5-4 *Data Processing of the Broadband VLBI Experiment with Japan-Italy Baselines*

岳藤 一宏 近藤 哲朗

Kazuhiro TAKEFUJI and Tetsuro KONDO

約 9000 km 離れた日本とイタリアに設置した直径 2.4 m の小型アンテナ間の超長基線干渉計 (Very long baseline interferometer, 以下 VLBI) による測地結果を得るために、鹿島 34 m 局 (鹿島宇宙技術センター：茨城県鹿嶋市) の 34 m アンテナを基準局とした VLBI 実験を行った。2.4 m アンテナの 2 台は Medicina 観測所 (Bologna, Italy) と情報通信研究機構 (NICT) 本部 (東京都小金井市) に設置した。どちらも垂直偏波が受信可能で、鹿島 34 m アンテナのみ垂直偏波と水平偏波が受信である。実験では全受信帯域の 3.2 GHz から 14.4 GHz のうち、1 GHz 帯域を 4 つ切り出して受信する広帯域受信システムを用いて、約 30 時間にわたってクエーサー 20 天体を繰り返し観測した。観測後、視差角 (Parallactic angle) を考慮した直線偏波のデータ補正と電離層による分散性遅延量の精密な補正を行い、約 9000 km の超長基線で世界最高帯域幅 9 GHz (4.8 GHz から 13.8 GHz、有効帯域幅としては 3.1 GHz) のバンド幅合成に成功した。

We have carried out a geodetic VLBI (Very long baseline interferometer) on approximately 9000 km baseline between 2.4 m diameter radio telescopes installed in Medicina, Bologna, Italy, and in Koganei, Tokyo by using a 34 m diameter radio telescope in Kashima as a reference station. We installed vertical polarization receivers to 2.4 m diameter telescopes and vertical and horizontal polarization receivers to Kashima 34 meter telescope. Four 1 GHz frequency bands within the total receiving range of 3.2 GHz to 14.4 GHz were simultaneously extracted, then we observed 20 quasars repeatedly for about 30 hours. After the observation, linear polarization correction considering the parallactic angle and dispersive delay correction due to the ionosphere effect were applied. As the results, we have successfully performed the world's widest bandwidth synthesis over the frequency range of 9 GHz from 4.8 GHz to 13.8 GHz with the effective bandwidth of 3.1 GHz.

1 はじめに

VLBI ではクエーサーなどの電波を 2 つ以上のアンテナで受信する。受信した信号に対して相関処理と呼ばれる信号処理を行うことにより、電波が 2 つのアンテナに到来する時刻差 (遅延時間) を極めて精密に計測できる。一般的な測地 VLBI では、複数のアンテナを用いて、約 24 時間中に ICRF2 天体カタログ [1] に含まれる 20 から 30 程度の天体の観測を繰り返し行うことで、アンテナの相対位置、基準周波数信号の周波数差、大気伝搬遅延、地球回転パラメータなど様々な物理量を推定できる。

VLBI によって求まる遅延時間の精密さは、信号対雑音比 (以下 SNR) と受信する有効周波数帯域幅 (または周波数分散 σ_f) が広がるほど向上する。そこで、バンド幅合成 (Bandwidth synthesis) と呼ばれる、い

くつかの帯域を合成して観測帯域を等価的に拡張する技術が開発された [2]。初期の VLBI 観測では記録できる帯域が kHz オーダーと狭かったが、帯域を拡張するバンド幅合成は計測精度の飛躍的な向上をもたらすため、現在の測地 VLBI においても用いられている。測地 VLBI の次世代規格として策定された VGOS (VLBI Global Observing System) では、3 GHz から 10 GHz 以上の観測帯域から複数の帯域を受信して、広帯域のバンド幅合成処理による帯域の拡張が想定されている。

10 GHz 以上の帯域をサンプリングしてデジタル記録することができる装置はまだ一般的に存在しないこと、また、人工雑音 (例えば、携帯電話による無線通信や WiFi、レーダー信号) を避ける必要があることから、NICT では 10 GHz 以上の観測帯域の中から 1 GHz の帯域を 4 つ切り出して、相関処理した結果を

合成するバンド幅合成の手法を開発した。このような広帯域バンド幅合成は国土地理院石岡 13 m 局と鹿島 34 m 局を用いた国内 VLBI 実験において成功している [3]。

この技術を応用して、NICT では遠隔地にある周波数標準の周波数差の測定に VLBI 技術を用いる技術開発を進めており、直径 2.4 m の小型アンテナをイタリアの Medicina (Medicina 観測所 2.4 m 局) と日本の小金井 (小金井 2.4 m 局) に設置した。2.4 m アンテナは口径が小さく、2.4 m アンテナのペアでは短時間で十分な相関強度を得ることができない。そのため、鹿島 34 m 局の 34 m アンテナと 2 つの 2.4 m アンテナのペアの間で遅延時間を計測し、その差分から 2.4 m アンテナ間の遅延時間を計測する [4]。しかし、日本とイタリアの長距離基線では次の 3 つの問題がある。まず第 1 に、VLBI による空間分解能が高いため大きな構造を持った天体は分解されて SNR が低下するので、観測対象にできる天体はコンパクトなものに限られる。第 2 に、視差角が日本とイタリアで大きく異なり、直線偏波システムで受信した信号をそのまま相関処理をすると SNR が低下する。第 3 に、電離層による遅延が両局で大きく異なり、広帯域バンド幅合成においてクロススペクトルの位相が一定とならず、電離層による遅延を正確に補正する必要がある。本稿では、これら 3 つの問題点の解決を図ったので、その方法と結果について述べる。

2 日伊基線の VLBI 実験の概要

受信システムなどの詳細は、本研究報告の氏原 [5] に譲るが、広帯域受信システムは広帯域フィードを装備しており [6]、3.2 GHz から 14.4 GHz に感度を持つ。ダイレクトサンプラは 16 GHz で高速 AD サンプリグ (Analog to Digital) を行った後に、内部信号処理で任意の 1 GHz 帯域を切り出すことができる。16 GHz でサンプリグを行うため、ナイキスト周波数は 8 GHz となる。サンプリグによるエイリアシングを避けるため、8 GHz 以上の信号を遮断するアナログ LPF (Low pass filter) と 8 GHz 以下の信号を遮断する HPF (High pass filter) をサンプラの前段にそれぞれ入れている。このため、片偏波の 2.4 m 局に配置したサンプラ内部には 2 つの AD 変換入力があり、両偏波の 34 m 局ではサンプラ内部に 4 つの AD 変換入力がある。受信帯域から人工雑音を避けつつ 1 GHz 帯域を 4 つ (中心周波数 5.3 GHz, 6.3 GHz, 8.7 GHz, 13.3 GHz) がダイレクトサンプラで切り出される。約 30 時間の測地 VLBI でクエーサー 20 天体を合計 700 回観測 (1 回の観測の単位をスキャンと言う) した。1

偏波あたりそれぞれの 1 GHz 帯域につき 2 GHz で 1 bit 量子化のサンプリグを行うため、総記録データレートは 8 Gbps (Giga bit per second) となり、3 局 4 偏波分の合計で約 240 TB (Tera Byte) のデータとなる。Medicina と小金井の 2.4 m アンテナのデータは観測後、高速インターネット回線で鹿島に伝送した。そして、3 局の合計 4 偏波の相関処理を行い、続いて広帯域バンド幅合成処理を行った。

主に国内で行ってきた広帯域バンド幅合成 [3] では、まず、全てのスキャンのうち 4 つの 1 GHz 帯域で最も SNR が高いスキャンを選び、他のスキャンの基準となる校正スキャンとする。4 つの帯域間はダイレクトサンプラの前段のフィルタの特性などのため、受信信号の通る経路長が数ナノ秒の遅延差 (バンド間遅延) があり、さらに、1 GHz 帯域内でもクロススペクトルの位相が一定とならず、特性 (バンド内遅延) をもつ。そこで、校正スキャンを基準として各スキャンから差をとることで、バンド間遅延とバンド内遅延を除去する。最終的に 4 帯域のクロススペクトル位相は一定となり、4 帯域をバンド幅合成することで精密な遅延量を得ることができる。ここで注意が必要なのは、広帯域バンド幅合成後に得られる遅延は校正スキャンの遅延分のオフセットを持つことである。また、電離層による遅延も基準となる校正天体スキャンの電離層遅延に対する各スキャンの相対値である。こうして得られた鹿島 34 m 局と 2 つの 2.4 m 局の遅延を基線解析すると、鹿島 34 m 局の局位置を基準にして、それぞれの 2.4 m 局の局位置が推定される。このような VLBI 実験を 2018 年 10 月以降十数回行った。実験により天体の選出や観測時間、総スキャン数が異なるが、これ以降記述する結果には実験コード (プロジェクト GALA-V を 2 文字に短縮した gv と西暦の下 1 桁、通算日で成る、例えば gv8287 や gv9045) を併記する。

3 長距離基線に特有な問題への対処方法の検討

2018 年 7 月にイタリアの Medicina 観測所に 2.4 m 小型アンテナシステムを運搬して設置した。このような国際基線では大きな構造をもつ天体が分解して SNR が下がることが予想できる。このため、基線長に対して大きい構造を持つ天体は使用できず、測地 VLBI で使用されている ICRF2 天体カタログを更に絞り込む必要があった。例えば、日本とイタリアの直線距離約 9000 km で星からの射影されたアンテナ距離を半分の 4500 km とすると、空間分解能 λ/D (波長 / 射影基線長) は X バンドの 8 GHz での観測とすると 1.7 ミリ秒角となる。観測するクエーサーが 3 ミリ秒

角の正規分布の強度を持つ天体だと仮定すると、天体が点源とした場合に比べて見かけ上のフラックス密度が 24 % に低下する。そこで、Astro geocenter^{*1} で作成された X バンドの米国 VLBA (Very long baseline array) 電波カタログから本実験に適切な電波天体を選出した。選出方法は約 9000 天体から、赤緯が -10 度以上、総フラックス密度が 1 Jy 以上、そして、分解されないフラックス密度との割合 (長い基線でも天体サイズが変わらないと考える) を 35 % 以上として合計 115 天体を選出した。さらに、測地 VLBI 用のオートスケジューラで観測スケジュールを作成するとさらに 20 天体程度 (実験により選定天体数が増減して、22 天体から 26 天体であった) に絞り込まれた。

また、視差角が日本とイタリアで大きく異なり (図 1 参照)、我々の直線偏波受信システムでは同じ天体でも SNR が大きく低下する。例えば 2 局の視差角差がゼロであれば、問題無く観測天体を検出できるが、視差角差が 90 度だと全く検出できない。Roger[7] によると直線偏波受信システムを採用したアンテナ a,b でストークスパラメータ I は下記の式で合成可能である。ここで H,V はそれぞれの水平偏波と垂直偏波の複素スペクトルを表し、スター記号*は相関演算子、バー記号は時間平均を意味する。また、 δp は 2 局それぞれのアンテナ位置での視差角差である。

$$I = (\overline{H_a * H_b} + \overline{V_a * V_b}) \cos(\delta p) + (\overline{H_a * V_b} - \overline{V_a * H_b}) \sin(\delta p) \quad (1)$$

ここで、2.4 m 局は垂直偏波のみ受信可能であり、式中の H_b が観測できずゼロとなるが、視差角差の補正を行うことでストークスパラメータ I の半分が得られる。

$$I/2 = (\overline{V_a * V_b}) \cos(\delta p) + (\overline{H_a * V_b}) \sin(\delta p) \quad (2)$$

次に懸念される問題は、電離層による影響である。100 km 程度のエリアの中であれば、全電子数 (Total electron unit) の差が約 0.5 TECU 以下になる。ここで全電子数は $\text{TECU} = 10^{16} \text{ electron/m}^2$ の単位である。一方、日本とイタリアでは、共通なクエーサーを観測した場合のアンテナの仰角や太陽時も異なり、 $\pm 20 \text{ TECU}$ 以上変動する (太陽の活動期は更に大きくなると予想される)。幾何学的に決めた遅延量を τ 、また、2 つの観測周波数 f_s, f_x における遅延 τ_s, τ_x は次のように表すことができる。ここで、 N はアンテナまでに到達する単位底面積の円柱に含まれる全電子数である。

$$\tau_x = \tau + \frac{N}{f_x^2}, \quad \tau_s = \tau + \frac{N}{f_s^2} \quad (3)$$

両式の差分をとることで、幾何学的遅延量 τ は消去でき、さらに式変形を行うと、電離層に起因する分散性の遅延量 $\Delta\tau_g$ から全電子数 N が得られる。

$$\Delta\tau_g = N \left(\frac{1}{f_s^2} - \frac{1}{f_x^2} \right) \quad (4)$$

このような 2 つの周波数帯域を利用する方法は、既存の S/X バンドを使用した測地 VLBI や、GPS システムでも用いられている。仮に、C バンド (6 GHz) と X バンド (8 GHz) の観測データを合成する場合に 5 TECU の電離層遅延を仮定すると、それぞれ 100 ps と 150 ps の群遅延、位相遅延では 300 度と 360 度と、60 度もの差が生じる。これまでに我々が行った国内実験ではバンド幅合成処理は問題なく実施できたが、実際は、アンテナ間の距離が近く、電離層による遅延がほぼ同じで問題が表面化しなかったためであり、日本とイタリア基線のデータ処理ではより精密な補正が必要である。

4 関連処理後の直線偏波データ合成

図 1 は鹿島と Medicina 基線での実際の 24 時間測地 VLBI 実験から視差角差 δp を計算した結果 (実験コード gv9015) である。日本国内であれば高々数度の差で無視できたが、広い角度にわたり分布していることがわかる。図 2 は鹿島と Medicina の基線で、天体が検出できた HV 成分と VV 成分の SNR 比率と視差角差の正接の関係を示したもので、プロットで 93 % の高い相関係数で相関がある。縦軸が大きくなるほどプロットの分散が大きくなるが見えるが、視差角差が 90 度

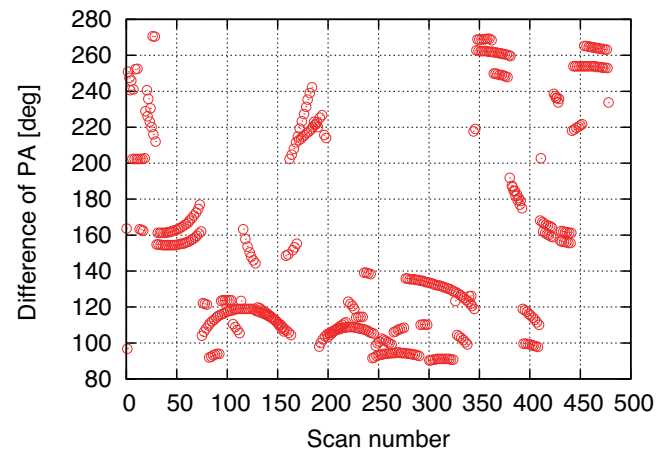


図 1 鹿島と Medicina 基線の約 30 時間 VLBI 実験 (実験コード gv9015) における視差角の差 δp

*1 http://astrogeo.org/vlbi/solutions/rfc_2016_c

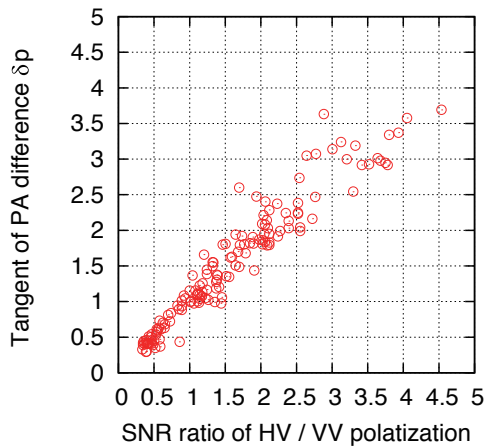


図2 鹿島とMedicina基線の約30時間VLBI実験(実験コードgv9015)におけるHV成分とVV成分のSNR比率と視差角差の正接の比較

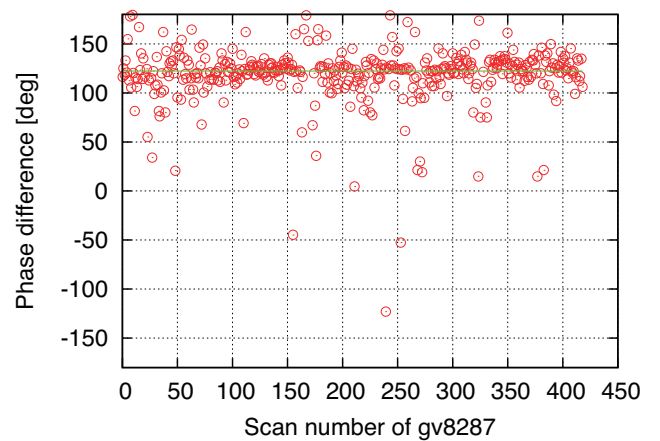


図4 VV成分とHV成分の位相遅延の差(群遅延時間の差を補正後、実験コードgv8287)

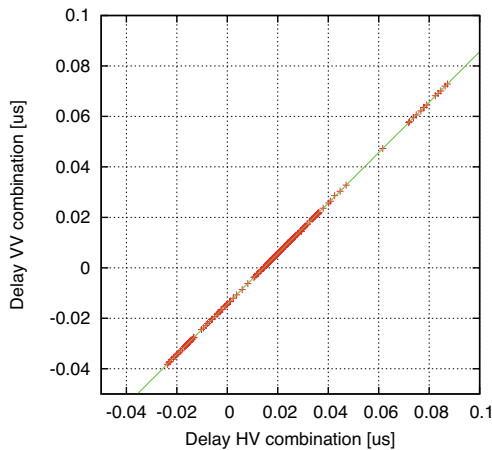


図3 VV成分とHV成分の群遅延時間の差(実験コードgv8287)

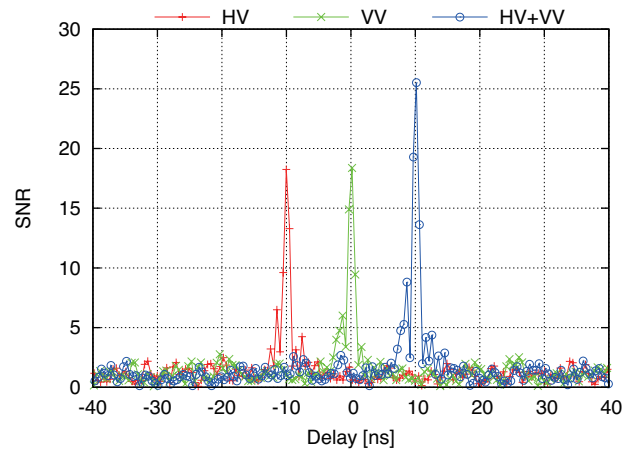


図5 鹿島とMedicina基線のVLBI実験における偏波合成前後の相互相関関数。天体は1928+738を115秒間観測した。左からHV成分(十字印, SNR18.3)、VV成分(クロス印, SNR18.7)、そして、HVとVV成分を合成した結果(丸印, SNR25.7)。各プロットは比較のため、ピークの遅延時間を10ナノ秒ずつシフトさせている。

もしくは270度に近づくと、分母であるHV成分のSNRが低下するとともにそのばらつきが増加するためである。次にVV成分とHV成分の相関データを遅延差と位相差を考慮して、式(2)に従って合成する。図3と図4はVV成分とHV成分の相関データの群遅延と、群遅延差を補正後に位相遅延を比較した結果(実験コードgv8287)である。図3に示すとおり、VV成分とHV成分の群遅延は傾きが1の直線上に分布しており、その群遅延の差は一定であることが分かる。また、図4に示すとおり、VV成分とHV成分の位相遅延差も一定である。この群遅延差と位相遅延差を補正して2つの成分を合成した結果が図5である。図5の観測天体のクエーサー1928+738の視差角差は約135度であり、HV成分とVV成分が共に視差角差がない場合に比べてSNRが約 $1/\sqrt{2}$ になるため、合成後のSNRは片方の成分に対して計算上約 $\sqrt{2}$ 倍に向上する。この図5の場合、HV成分のSNRは18.3、VV成分のSNRは18.7であった。予想されるSNRが26.2であるのに対して、合成後のSNRは25.7となり精度

良く合成できたことが分かる。ここで基準となる偏波成分がHV成分とVV成分の2つあり、このどちらか2通りの合成方法がある。本稿ではVLBI実験による局位置の推定について触れていないが、最終的にMedicinaと小金井の2.4m局の遅延の差を鹿島34m局を基準として計算する。鹿島34m局と小金井2.4m局の基線では視差角差がほぼゼロであるためVV成分のみ有効で、VV成分の遅延結果を用いる。鹿島34m局を基準として2.4m局間の遅延時間差を得ることを考慮すると、鹿島とMedicinaの基線でも共通となる偏波成分は鹿島のV偏波を利用しているVV偏波である。このため、鹿島とMedicinaでもVV成分の群遅延、位相遅延が基準となるように合成した。この偏波合成を測地VLBI中の全スキャンに対して行った。

5 バンド幅合成における電離層補正

3で述べたように日本とイタリアの超長基線では広帯域バンド幅合成を行うには電離層補正を精密に行うことが必要である。筆者らは1 GHz帯域の4バンドのVLBI実験で、各バンドのSNRが10以上あったときにTEC値(全電子数値)を精密に推定する方法を開発した[3]。しかしながら、日本とイタリアの長基線ではSNRが国内基線に比べて低下するため、各1 GHz帯域のSNRが有効時間内に10未満となり、最小自乗推定が収束しないことが多く発生した。そこで、TEC値をパラメータとして変化させながらバンド幅合成を行い、最も相関強度が高くなるTEC値をそのスキャンでのTEC値と決定することとした。この方法はVGOSの解析でも使用されている[7]。まず荒く4 TECUステップで±50 TECUの間をサーチして、ピーク付近で1 TECUごとにより細かく精密サーチする。精密サーチ付近で2次関数フィットによって

最適値を得る。得られた最適なTEC値を用いて再度広帯域バンド幅合成を行い最終的な遅延量を得る。

図6と図7は鹿島とMedicinaの基線において、クエーサー1144+402を観測したデータ(実験コードgv9199)を偏波合成後にTECサーチを行った結果と、最適TEC値でバンド幅合成を行った相互相関関数(フリッジと呼ばれる)である。同様に図8と図9はクエーサー0133+476の結果である。SNRが16程度と比較的小さなスキャンでもほぼ線対称の相互相関関数が得られており、うまく4つの1 GHz帯域を広帯域バンド幅合成できたことがわかる。このTEC量を考慮したバンド幅合成を測地VLBI中の全スキャンに対して行った。

図10は約30時間の測地VLBI(実験コードgv9045)のバンド幅合成処理で得た最適TEC量とGNSS(Global Navigation Satellite System)によるTEC計測値からの比較結果である。GNSSによるTEC測定値は600 km上空に電離層を仮定したモデルを用いて、

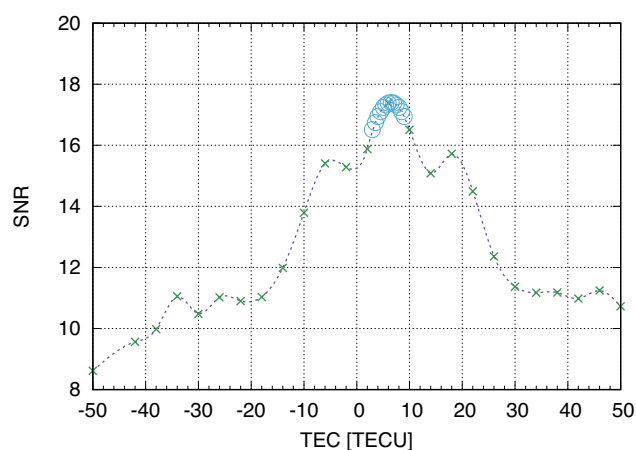


図6 広帯域バンド幅合成において4 TECUステップでTEC量をさせながらSNRを計算してプロットした。ピーク付近で1 TECUずつ変化させて精密にサーチを行っている。観測天体はクエーサー1144+402で観測時間は60秒である。ピーク付近での2次曲線フィットで最適値は6.5 TECUと推定された。

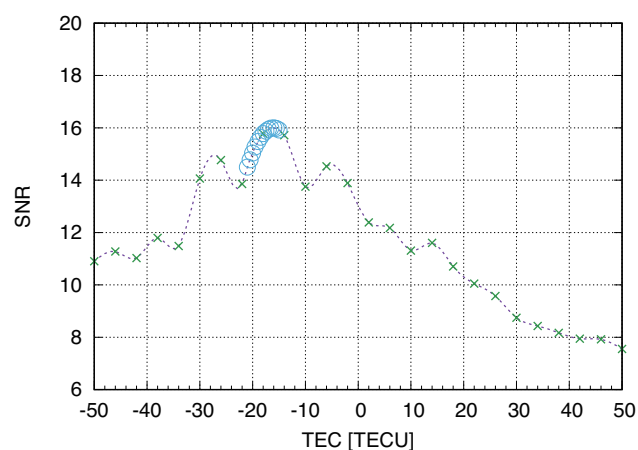


図8 クエーサー0133+476を110秒間観測したデータの電離層遅延を精密に推定した結果、電離層遅延の最適値は-16.1 TECUと推定された。

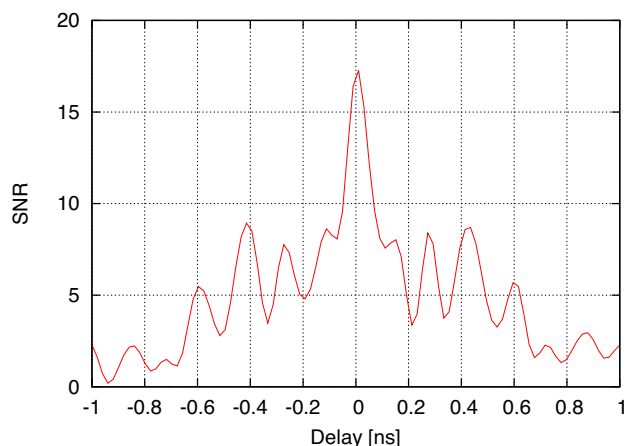


図7 図6で得られた最適TEC値での広帯域バンド幅合成の結果得られた相互相関関数。SNRは17.4であった。

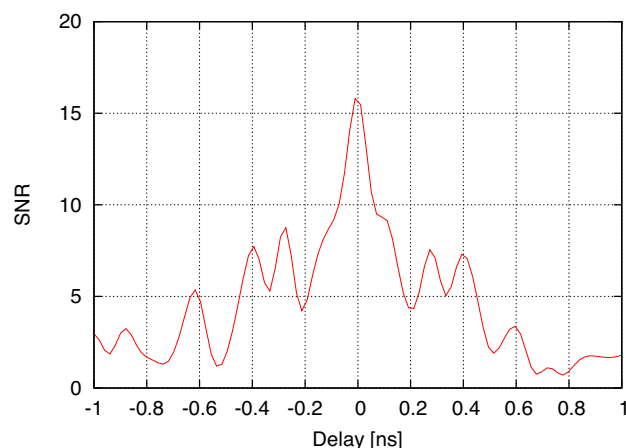


図9 図8で得られた最適TEC値での広帯域バンド幅合成の結果得られた相互相関関数。SNRは16.0であった。

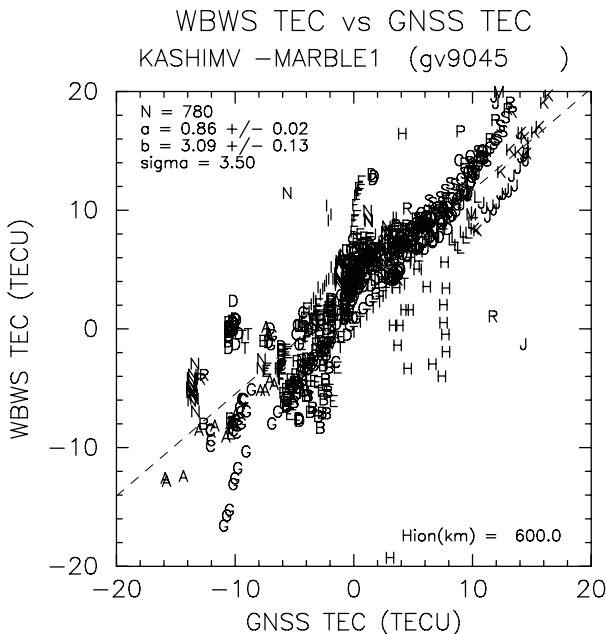


図 10 鹿島と Medicina の超長基線の測地 VLBI (実験コード gv9045) における広帯域バンド幅合成で算出された TEC 測定結果と GNSS による測定結果 (地上 600 km に電離層レイヤーがあるモデル) の比較。データ点数は 780 点で、直線近似 (傾き a, 切片 b) を行った。図中のアルファベットは観測天体を表す。

アンテナのある位置での視線方向での TEC 値を計測した結果を用いて、2つの局における差である。両者の相関係数は約 86% が得られた。VLBI による TEC 推定値は校正天体の TEC 値を基準とした相対値のため、GNSS による TEC 推定値とは 3.1 TECU の固定したオフセットがある。

6 考察

鹿島 34 m 局と Medicina 観測所の 2.4 m 局を用いた約 30 時間の測地 VLBI で、SNR が 10 以上あることを閾値とした検出数 (全体 786 スキャン) を比較してみると、偏波合成前の HV 成分と VV 成分は 4 つの帯域中で最も低い観測周波数帯域に対して、それぞれ 241 スキャンと 375 スキャンであった。4 で述べた偏波合成を適応すると、SNR が向上して、577 スキャンに増加した。鹿島 34 m 局と小金井 2.4 m 局の国内基線との SNR を比較すると、今回の偏波合成適応後の SNR は平均的に 40% ほどの値となった。これは射影基線長が天体の観測する時間帯ごとに異なるため単純な比較となるが、天体フラックス密度の分布がガウシアンだと仮定すると、射影基線長のアンテナビームに比べて平均的に 1.2 倍ほど天体のサイズが大きいためだと推測できる。なるべくコンパクトな天体を選出しているが、それでも天体構造の影響を受けていると考えられる。さらに 4 つの 1 GHz 帯域を合成するバンド幅合成後は 753 スキャンとなり、全スキャンに対す

る検出スキャン数の割合は 95.8% に向上した。またバンド幅合成により周波数帯域幅が拡張され、1 GHz 帯域幅 (有効帯域幅 296 MHz) から、最高周波数から最低周波数を引いた帯域幅が 9 GHz (有効帯域幅 3.1 GHz) となった。有効帯域幅により遅延時間の推定精度が決まるため、推定精度は約 10 倍に向上した。実際、1 GHz 帯域の図 5 はフリンジの時間幅が 2 ナノ秒程度であるが、広帯域バンド幅合成後の図 5 や図 9 に示すとおり、相互相関関数のピーク幅は 200 ps と約 1/10 倍になっており、遅延時間の推定がより精密にできたことが分かる。

7 まとめ

イタリアの Medicina 観測所に設置した 2.4 m アンテナと NICT 本部にある 2.4 m アンテナを、鹿島 34 m 局を共通の参照局として VLBI 実験を行った。コンパクトで比較的フラックス密度の大きな天体を選定し、直線偏波受信システムによる観測データを合成して SNR を改善した。さらに電離層の遅延を精密に補正して広帯域バンド幅合成を行った。VGOS 計画により口径 10 数 m の新しいアンテナが建設されつつあるが、本稿に示したように大口径アンテナを併用することにより小型アンテナであっても観測に用いることが可能であり、VLBI 観測可能な 30 m 級の大型アンテナを広帯域受信システムに改造 (若しくは新設) して、安価な小型アンテナを高密度に配置することも今後有効になると考えられる。

謝辞

本稿はワイヤレスネットワーク総合研究センター小山泰弘様に丁寧かつ詳細にコメントいただき完成することができました。心より感謝申し上げます。

【参考文献】

- 1 Ma, Chopo. "The Second International Celestial Reference Frame (ICRF2)," Sixth International VLBI Service for Geodesy and Astronomy. Proceedings from the 2010 General Meeting, VLBI2010: From Vision to Reality," Held 7-13 Feb. 2010 in Hobart, Tasmania, Australia. Edited by D. Behrend and KD Bayer. NASA/CP 2010-215864., pp.273-279, 2010.
- 2 Rogers, A. E. E. , "Very long baseline interferometry with large effective bandwidth for phase-delay measurements," Radio Sci., 5, 12391247, 1970.
- 3 Kondo, T., & K. Takefuji, "An algorithm of wideband bandwidth synthesis for geodetic VLBI," Radio Sci., 51, doi:10.1002/2016RS006070, 2016.
- 4 関戸他, 広帯域 VLBI システムの開発と測地・周波数比較実験の報告, 測地学会誌, 第 63 巻, 第 3 号, pp.157-169, 2018.
- 5 氏原秀樹, "広帯域アンテナの開発," 情報通信研究機構研究報告, vol.65 no.2, 5-5, 2019.
- 6 Ujihara H., et al. (2019) "Development of wideband Antennas," International Symposium on Advancing Geodesy in a Changing World.

- 7 Roger Cappallo, "Correlating and Fringe-fitting Broadband VGOS Data,"
IVS 2014 General Meeting proceedings Edited by Dirk Behrend, Karen
D. Baver, and Kyla L. Armstrong NVI, Inc., Greenbelt, Maryland, USA,
2014

岳藤一宏 (たけふじ かずひろ)

電磁波研究所
時空標準研究室
主任研究員
博士(工学)
超長基線干渉計、電波天文学

近藤哲朗 (こんどう てつろう)

中国科学院
上海天文台
客員教授
電磁波研究所
時空標準研究室
協力研究員
博士(理学)
宇宙測地学