Wide bandwidth synthesis の完成にむけて

NICT 岳藤 一宏、 その他 鹿島 VLBI および小金井光格子時計メンバー、 INRiM、INAF(Bologna, Medicina) メンバー

2019年2月22日

1 概要

小型アンテナ@ Medicina 観測所(局コード D)と鹿島 34m(局コード O)をもちいた長距離実験におい て、広帯域バンド幅合成技術を確立した。直線偏波受信システム(小型アンテナは片偏波 V-pol、鹿島 34 mは 両偏波 V-pol,H-pol)のため、VV,VH 偏波の相関データは群遅延、位相遅延を補正後に合成される。さらに、 電離層の影響による分散性遅延($1/f^2$ 、観測周波数の逆数の2乗に比例)を補正後、周波数領域で合成をお こなう。実際には東京の NICT 小金井本部屋上に設置された小型アンテナ(局コード B)とのクロージャー (BD = OB - OD)を計算することで、大型アンテナに起因する影響を除去しつつ局位置を決定した。

2 はじめに

バンド幅合成(Bandwidth synthesis)は、いくつかの狭帯域バンドを合成してあたかも広帯域バンドを等 価的に取得したように拡張する技術である[1]。測地 VLBI の次世代規格である VGOS においても 3-14GHz の観測帯域のなかから 1GHz のバンド 4 本をとりだし、10GHz 帯域クラスの超広帯域バンドを取得する。一 方、われわれ鹿島 VLBI グループは VLBI をもちいて遠隔地(地球上の2地点)にある基準信号の周波数差を 測定する技術開発をおこなっている。実際に直径 2.4m の小型のアンテナを周波数標準機関に設置して実験し ている。アンテナが小さいために、VGOS に相当する広帯域システムを装備する必要があった。ここで、さ らに 1GHz の広帯域バンドを接続する技術が必要となる。すでに国内においては国土地理院石岡 VGOS アン テナと鹿島 34m アンテナの超広帯域バンド幅合成が成功している [2]。われわれは 2018 年夏に 2.4m 直径の 小型アンテナをイタリア、Medicina 観測所に設置した。9000km もの長距離においては、広帯域バンド幅合 成に対して、電離層や偏波が問題となりうる。そこで、VLBI 実験をおこない、これらの問題を解決するため の取り組みについて報告する。

3 日伊 VLBI 実験、長距離ならではの問題

産業技術総合研究所に 2018 年 3 月まで設置されていた直径 2.4 mの小型 VLBI アンテナおよびダイレク トサンプラ GALAS を含むバックエンドを含むすべての機材を、2018 年 7 月にイタリアの Medicina 観測所 に運搬して設置した。設置後すぐに、国土地理院の協力を得て、試験観測を石岡 VGOS アンテナとおこない First フリンジを得ている。このとき、鹿島 34 mは背面構造体の補修工事をおこなっており、この時点では使 用不可能であった。実際にフリンジを得られたが、国内で実験よりも国際基線で SNR が 1/3 未満程度で、さらに、Parallactic angle (以下 PA)が日本とイタリアで大きくことなり、直線偏波受信システムでは甚大な影響がある。具体的に同じ天体でも時間によっては PA が変わり、フリンジが出たり出なかったりする(図1参照)。円偏波では距離により偏波は変わらないため、そこまで影響は無い(ファラデー回転は周波数が高いために考慮しない)。

Roger[3] 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 は下記のよう な式で合成可能である。 ここで X, Y はそれぞれの直線偏波で (V/H か、X/Y とするかは文化によって異な るようだが、V=X、H=Y の関係である)、スター記号 * は相関演算子でバー記号は時間平均である。また、 δp は 2 局それぞれのアンテナ位置での PA である。

$$I = \left(\overline{X_a \star X_b} + \overline{Y_a \star Y_b}\right)\cos(\delta p) + \left(\overline{X_a \star Y_b} - \overline{Y_a \star X_b}\right)\sin(\delta p) \tag{1}$$

われわれのイタリアや小金井のリモート局は片偏波である。このため、式中 X_b が存在しないので、下記のように簡単になる。

$$I = \left(\overline{Y_a \star Y_b}\right) \cos(\delta p) + \left(\overline{X_a \star Y_b}\right) \sin(\delta p) \tag{2}$$

ここで、PA の *P* は球面三角法の正弦法則と正弦・余弦法則の組み合わせで数パターン導出できる。天体の方 位角 Az と仰角 El、緯度 ϕ とすると、

$$\tan P = \frac{\sin Az \cos \phi}{\sin \phi \cos El - \sin El \cos \phi \cos Az} \tag{3}$$

また、時角H、天体の赤緯 δ とすると下記のように表すこともできる。

$$\tan P = \frac{\sin H \cos \phi}{\sin \phi \cos \delta - \sin \delta \cos \phi \cos H} \tag{4}$$

つぎに懸念される問題は、電離層による遅延である。経験的に 100km エリア内であればせいぜい 0.5TECU 程度の差である。一方、日本とイタリア基線のような長基線になると、最低でも ±20 程度の範囲内で大きく 変動する(太陽活動が活発なときはさらに大きくなると予想される)。ここで、幾何学的に決めた遅延量を τ 、 また、 f_s, f_x が 2 バンドの観測周波数 s,x としたときの遅延 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距離での電子密度である。

$$\tau_x = \tau + \frac{N}{f_x^2}, \quad \tau_s = \tau + \frac{N}{f_S^2} \tag{5}$$

両式の差分をとることで、幾何学的遅延量 τ は消去でき、さらに式変形をおこなうと、電離層に起因する分散 性の遅延量 $\Delta \tau_q$ から電子密度 N が得られる。

$$\Delta \tau_g = N \left(\frac{1}{f_x^2} - \frac{1}{f_s^2} \right) \tag{6}$$

このように2バンドを使用することで電子密度のTEC量を得る方法は、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。

われわれが行うバンド間の接続を考えると、最低でも 20 度以内では位相を合わせる必要がある。これ以上 では SNR が低下してしまう。仮に、C バンドと X バンドで 5TECU の電離層遅延を仮定すると、それぞれ 0.1ns と 0.15ns の群遅延、位相遅延では 300 度と 360 度となり、位相では 60 度も差が出てしまい、バンド幅 合成に失敗することになる。このことから電離層の TEC 量を最低でも 1TECU 以内に抑える必要がある。わ れわれが行った国内実験では電離層による影響が小さいために、バンド幅合成は特に問題がこれまでは表面化 しなかったと解釈できる。

4 相関処理後の直線偏波データ合成

図1はイタリア基線でのParallactic angle (PA)に対する SNR である。VV 偏波の組み合わせは、PA が 0度か180度のあたりで SNR が高く、HV 偏波の組み合わせであれば 90度、-90度のようにずらした角度で SNR が高い。日本だと西側、イタリアだと東側を向くことが多いため、PA で埋まらない箇所もある。この ため式 2に従って合成するのであるが、単純に足し合わせるだけではダメで、VV,VH 偏波の相関データの遅 延差と位相差を考慮して合わせる必要がある。うまく合成できるとほぼすべてのスキャンで SNR が向上する (図2)。

図3と図4はVV,VH 偏波の相関データの群遅延と位相遅延を比較したものである。群遅延は完全に直線 上にのっており、位相遅延も固定値である。一度サンプラのクロックを固定してすると、この差はほとんど変 動しない。位相差は群遅延差を補正したあとに計測している。当初、鹿島34m 局内、つまりV 偏波とH 偏波 の相互相関を計算することで群遅延と位相遅延の差を求めようとしたが、図にあるように安定的に差が得られ なかった。もちろん相関(フリンジ)は強く検出できたが、そのフリンジが天体起因ではなく、おそらく内部 雑音(マルチパス?)であろうと考えている。

実際の偏波合成は VV 偏波の群遅延、位相遅延になるように合成している。最終的に小金井基線とのクロージャーを計算するため、小金井基線が VV 偏波の組み合わせであるからである。偏波合成で HV 偏波となるように合成も可能であるが、式2 で符号を変更する必要がある。



図 1 イタリア基線での Parallactic angle に対する SNR 変化



図 2 イタリア基線での Parallactic angle に対する SNR 変化、偏波合成したデータ追加



5 バンド幅合成における電離層補正

イタリア基線では電離層補正が必須となる。Kondo[2] では最小自乗法で TEC を推定する方法を開発した。 しかしながら、イタリア基線ではきわめてフリンジが弱く、1GHz の単パンドであってもフリンジが検出で きない場合も多い。このような状況ではうまく最小自乗法を収束させることは難しい。そこで、実際に TEC 値を与えながらバンド幅合成をおこない、最も相関強度が高い場合が、そのスキャンでの TEC 値とするこ ととした。これは Haystack 主導の VGOS 解析でも使用されている [1]。図 5 はその結果(天体は 2022+542 を 3 分積分)で-7 TECU あたりに最適値がある。このとき SNR が 20 ほどである。まずラフ(-4TECU ス テップ)にサーチして、ピーク値付近で最小自乗法で追い込むような方法を開発した(バンド幅合成ソフ ト KOMB に組み込まれており、高速に TEC サーチができる)。得られた最適値をバンド幅合成処理で与 え、バンド幅合成関数が完成する。その遅延から最終的な遅延量を得た(図 6)。Medicina 観測所に設置 したアンテナの XYZ 座標も精密に決定できており、2018 年年末に実験では、+4461040.89820±0.00569m, +919402.66815±0.00369m, +4449902.76237±0.00640m と 9000km の長基線であっても 1cm 未満の誤差で あった。

6 まとめと今後

イタリアに設置した小型アンテナと NICT 本部にある小型アンテナを鹿島 34 mを介して VLBI 実験をおこ なった。直線偏波受信システムによる直線偏波データを合成して SNR を改善できた。さらに電離層の遅延を 考慮して広帯域バンド幅を行うことができた。最終的なアンテナ位置も 1cm 未満の誤差であった。実際は小 型アンテナ同士のクロージャーを計算して位置をきめるため、大型アンテナに起因する影響が除去されるため に、アンテナ位置はより正確になると考えている。また、このような小型のアンテナ、なおかつ長基線であっ ても正確な位置を決められるため、VLBI を仲介する大型アンテナを世界に 4-5 台、例えば各大陸に一台設置 して、小型のアンテナを VLBI アンテナがこれまでなかったような地域に配置するようなことも考えられる。



参考文献

- Rogers, A. E. E., "Very long baseline interferometry with large effective bandwidth for phase-delay measurements", Radio Sci., 5, 12391247, 1970.
- Kondo, T., & K. Takefuji, "An algorithm of wideband bandwidth synthesis for geodetic VLBI", Radio Sci., 51, doi:10.1002/2016RS006070, 2016.
- [3] 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