

はじめに

2018年のポーロニャへの小型アンテナ移設後、イタリアと日本との約9000kmの基線長で、VLBIによる周波数比較実験を実施している。

国内基線と大きな差異は、まずParallactic angle差と電離層の影響である。円偏波受信の場合、Parallactic angleが異なっても偏波は変わらないが、われわれの直線偏波受信システムだと大きなインパクトで、角度によってはプリンジが消失する。また測地VLBI実験中に電離層の影響は少なくとも±20TECUに達する。これらを補正した上で、さらにプリンジサーチにおいては1GHz程度の狭帯域では起きえない、広帯域による補正もおこない広帯域バンド幅合成を実施している。

2018年10月からほぼ2週間に1度実験をおこなっている。70TB/1偏波のデータを日本に伝送(約2日間)して、相関処理(約5日間)している。



図0. ポーロニャ/Medicina観測所の設置した小型アンテナ

広帯域バンド幅合成の処理フロー

- 1: 1GHzの単バンド処理(gico3, vdfifフォーマット, 2048Msps,1bit)
- 2: 群遅延差と位相差の導出
(鹿島Hpol-メディチナVpolと鹿島Vpol-メディチナVpol)
- 3: 遅延差を補正して2偏波成分を合成(HV+VV)
- 4: 超広帯域バンド幅合成
 4-2: 電離層補正(まずラフサーチ、ピーク付近で精密サーチ)
 4-2: 広帯域プリンジサーチ

電離層補正

Kondo&Takefuji (RadioScience2016)によるとSNR10以上であれば、バンド幅合成において最小自乗法によるTEC量のサーチが可能である。しかしながら、イタリア実験ではSNRが10に届かないスキャンが多々ある(図3のSNRを参照)。ここでTEC値とはある校正スキャンからのTEC値の差分であり、相対値は精密に決定することが可能である。

そこで、バンド幅合成時にTEC量を外部から与えて、もっとも相関振幅が高くなる際のTEC値を最適TEC値とするサーチ法の導入を行った。これは2段階あり、まず荒くサーチして、ピーク付近で精密にサーチする方法である。このTEC補正は現在のバンド幅合成ソフトkombiに導入されている。

- 粗決定サーチ
TEC値を-50から50 tecuを2 tecuごとに変えて、ピーク値をえる
- 精密決定サーチ
±3 tecu のピーク値をLSQで導出

鹿島-小金井基線では大きいても±1TECUの変動であるが、鹿島-Medicina基線は±20TECU以上の変動を示すことが分かった

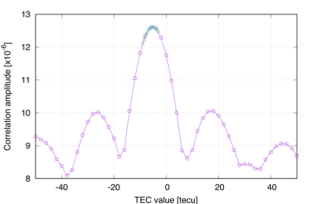


図4. TECサーチして最適TEC値を導出
ピーク付近で精密サーチを行っている
LSQで-5.33と決定

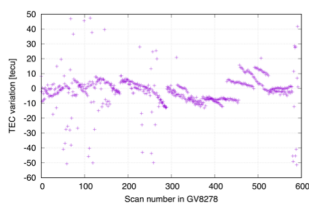


図5. 2018年10月の実験でのTEC値変動。複数の天体を切り替えるため、ステップ状に見える

2つの直線偏波成分の合成

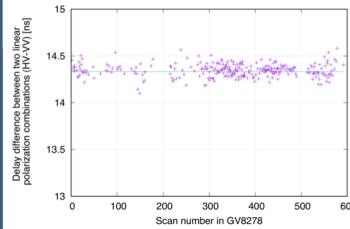


図1. HV偏波とVV偏波の群遅延差

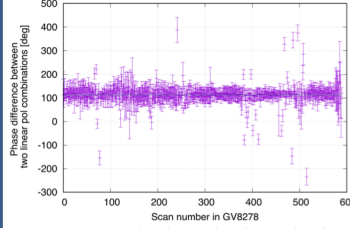


図2. HV偏波とVV偏波の位相差

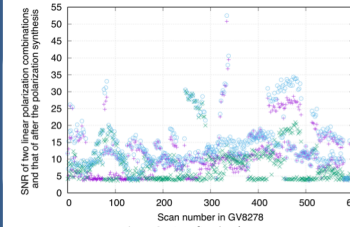


図3. 偏波合成前後のSNR

まず鹿島とメディチナの2つの直線偏波の群遅延差を求めると。図1はその比較で、この時は14.33nsである。

2つの相関処理結果は遅延補正後に周波数空間で合成する。最終的に小金井とメディチナの差を得ることが目的であるため、V偏波を採用している(鹿島V偏波-小金井のV偏波のみプリンジが得られる)メディチナも合成後はV偏波の基準となるように遅延補正を行っている。

図2は実際に10度ごとに位相差を与えて合成をおこない位相オフセットを各スキャン毎に求めた結果である。この実験時は103.2度であった。

遅延と位相差はサンプリング時刻同期を固定すると数週間にわたってもほとんど変化しない。(一度オフセットが決まれば、次の実験でも利用できる)

図3は偏波合成前後のSNRである。Parallactic angleの関係で、合成前はSNRが大きく変動しているが、合成後はほとんどのスキャンでSNRが向上している。

$$I = (X_a \star X_b + Y_a \star Y_b) \cos(\delta p) + (X_a \star Y_b - Y_a \star X_b) \sin(\delta p) \quad \text{Roger Cappallo 2014}$$

$$I = (Y_a \star Y_b) \cos(\delta p) + (X_a \star Y_b) \sin(\delta p) \quad \text{この実験の場合}$$

δp はParallactic angleの差

バンド幅合成

1GHzの帯域であっても、周波数配列によってはサイドローブが高くなったり、プリンジの太さ(σ_{res} に逆比例)が変化する。このため、事前に周波数配列の確認は重要である。4バンドを配置する例では、1:3:2の比で1GHzのバンドを配列するのもっとも遅延決定精度が良い。しかしながら、実際はRFI(特に3.5GHz付近の5G信号、小金井ではアンテナの隣にある衛星双方向アンテナからのアップリンク信号)があり厳しい。また、低周波側に重みをつけるほうが電離層補正を決める精度があがると思われる。

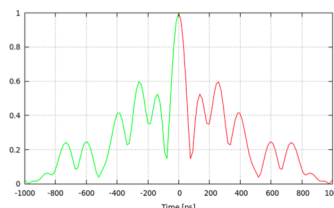


図6. 2019年6月現在使用している周波数配列の遅延分解関数。配列は4.8-5.85-9.9-12.8GHz

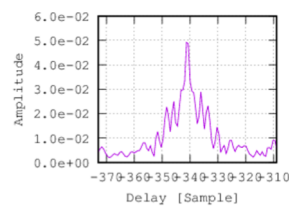


図7. 2019年6月実験での実際のバンド幅合成関数システムや天体によって周波数特性が変わるため、関数の形も変形することがある。

gico3でのプリンジサーチは二分木法を用いたパラメータサーチである。オリジナルのパラメータサーチだと、異なる解に落ち込むケースが多々あった。そこで、単純に解が順方向に改善させる方式から、解が悪化したときにパラメータ空間を広げる工夫を取り入れている。

通常のプリンジサーチ関数

$$F(\Delta\tau, \Delta\dot{\tau}) = \left| \int_{t_0}^{t_1} \int_0^{f_B} S(f_\nu, t) e^{-i2\pi(f_\nu \Delta\tau + f_0 \Delta\dot{\tau} t)} df_\nu dt \right|$$

10GHzに近い帯域のとき、 Δdt の影響が大きいため、下記の関数を使用する

$$F(\Delta\tau, \Delta\dot{\tau}) = \left| \int_{t_0}^{t_1} \int_0^{f_B} S(f_\nu, t) e^{-i2\pi(f_0 + f_\nu)(\Delta\tau + \Delta\dot{\tau} t)} df_\nu dt \right|$$