

VLBI観測におけるMulti Frequency Phase Referencingの開発

Development of the multi frequency phase referencing method in VLBI observation

渡利藤香(横浜市大), 朝木義晴(宇宙科学研究所), Ruggero Micheletto(横浜市大), KaVA evolved star working group

天体が発する宇宙電波は、観測点である地上に到達するまでに地球大気圏を通過する。主として対流圏に含まれる水蒸気により宇宙電波を観測した電波干渉計の位相は大きく揺らいでしまい、観測周波数が高いほど、その影響は大きい。この地球大気による位相変動は、高周波数(センチ波~ミリ・サブミリ波)における電波干渉計観測を阻害する最大の問題であるため、有効な位相補正法の開発が望まれる。水蒸気による電波の位相変動には観測周波数に対する非分散性があり、低周波数の干渉計位相で高周波数の位相を補正する手法としてMulti Frequency Phase Referencing(MFPR)がVLBI観測における有力な位相補正手法として注目されている。本研究では、Korean VLBI Network(KVN)によるMFPRの実証試験研究を進めている。まず、連続波源であるBL LacとJ0244+62に対して、22 GHzと43 GHz、および22 GHzと86 GHzの間で適用し、その位相補正の効果を定量的に検証した。今回、BL Lacの43 GHzおよび86 GHzの位相エラーを目標値(rmsで1 radian)以下に低減することが達成でき、MFPRは高周波数(ミリ波)天体観測にとって非常に有効な位相補正法であると実証できた。現在は、赤色超巨星であるS Perの水メーザー(22GHz)とSiOメーザー(43 GHz)に対してMFPRをAIPS上で適用し、SiOメーザー観測でのコヒーレンス向上を図ろうとしている。

研究の目的

宇宙電波は地球大気を通り抜けて地表に到達するため、地上電波干渉計による天体観測では大気による影響を被る。センチ波以下の波長での観測では、大気の中でも特に水蒸気による影響が最大の問題となっている。

基線が短い場合には、2つのアンテナで受信する電波の経路がほとんど同じであるため、地球大気による遅延の影響はほぼ等しく、干渉計の位相に対するエラー(相関処理時の時刻同期エラー)は小さい。

一方、基線が長い場合には、2つのアンテナ上空の大気環境が大幅に変わるために、干渉計の位相に大きなエラーを生じさせる。

本研究では、地球大気による干渉計の位相のエラー(位相揺らぎ)を補正し、電波干渉計の観測精度を高めることを目的としている。

特に、電波の遅延に及ぼす水蒸気の影響が周波数に対して非分散性を持つことを利用し、**低周波数での観測データを用いて高周波数の観測データの位相を補正するMFPRをKVNの観測データに適用し、その補正の効果を定量的に調べている。**

使用した観測データについて

今回使用するデータを観測したのは、Korean VLBI Network(KVN)である。いずれの観測でも、タンナのアンテナの偏波の設定が残りのアンテナと異なっていたため、実際にはウルサン-ヨンセ間の1基線のみのデータを用いている。

Sources	BL Lac, J0244+62
Array	KVN(Korean VLBI Network)
Date	March 30, 2012
Frequency	22GHz (22.21501660GHz) 43GHz (42.81401660GHz) 86GHz (86.21001660GHz)

Source	S Per
Array	KVN(Korean VLBI Network)
Date	March 30, 2012
Frequency	22GHz (22.21501660GHz) 43GHz (42.81401660GHz)

BL LacとJ0244+62について

BL Lacの位相補正

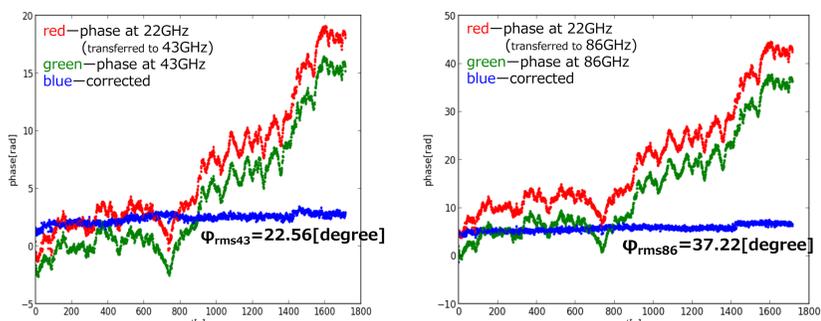


fig.1 22GHzの位相で補正した43GHzの位相の時間変化(BL Lac) fig.2 22GHzの位相で補正した86GHzの位相の時間変化(BL Lac)

横軸は観測開始時からの経過秒、縦軸は左図が43 GHzの位相、右図が86 GHzの位相である。赤は22 GHzの観測データから生成した補正データ、緑は補正したい高周波数の位相、青は両者の差分である。

43GHz, 86GHzともに位相補正データ(赤)は高周波の位相の振る舞い(緑)とよく一致している。補正後の高周波数の位相データの二乗平均平方根(root-mean-square: rms)は、いずれも目標にした1 radian*1よりも小さくなっており、MFPRの有効性を実証できた。

※1 補正精度の目標である1 radian = 57.3 degree は、観測結果から天体の電波画像を得ると言う望遠鏡の目的を達成するための条件として設定された値である。

J0244+62の位相補正

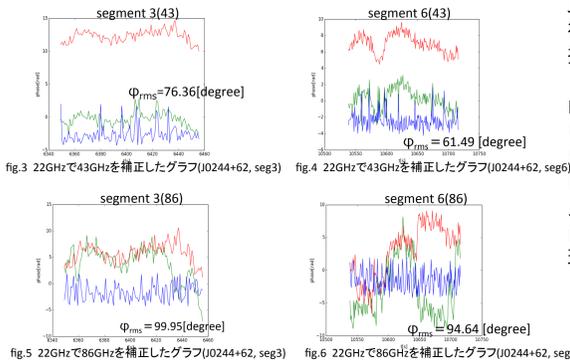


fig.3 22GHzで43GHzを補正したグラフ(J0244+62, seg3) fig.4 22GHzで43GHzを補正したグラフ(J0244+62, seg6)
fig.5 22GHzで86GHzを補正したグラフ(J0244+62, seg3) fig.6 22GHzで86GHzを補正したグラフ(J0244+62, seg6)

J0244+62は、短時間の観測(セグメント)を複数回行っている。左のプロットは、セグメントごとに抜き出したVLBIの位相の時間変化を表示している。

BL Lacに比べて強度の低いJ0244+62では、BL Lacと同じ処理アルゴリズムでは、位相補正の目的が達せられないことが分かった。これは、J0244+62の位相に対してより大きなランダム雑音(熱雑音)が混入することによるノイズレベルの上昇と、熱雑音による位相変動により、 2π の不確定性を適切に処理できていないこと、2つの理由が考えられる。

MFPR処理アルゴリズムを搭載した、Pythonプログラムを開発した。強度の高い天体では目標精度でVLBI位相の補正ができたが、強度の低い天体では目標精度を達成できないセグメントが多数出てきた。

1. 天体の強度が低い場合に混入する熱雑音の影響を避けて、**位相の 2π の不確定性を適切に処理するアルゴリズムを開発する**
2. MFPR処理プログラムをさらに異なる天体に適用することで、**処理アルゴリズムの適切性を確認し、合わせてMFPRの有効性についてさらに検証を重ねる**

MPFR実証試験: S Per H₂O & SiOメーザー

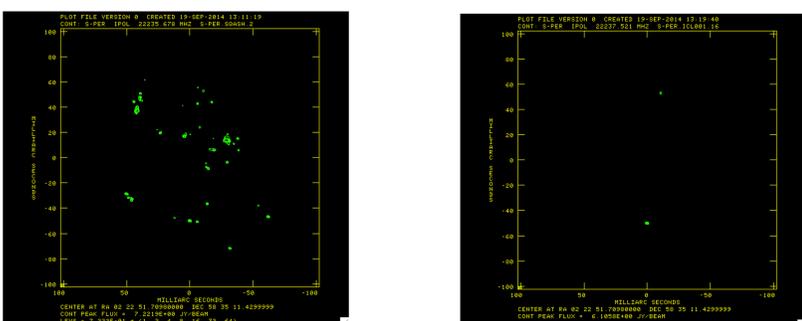


fig.7 S Per 水メーザーの空間分布(視線速度: -20.72 ~ -62.44 km s⁻¹) fig.8 S Per 水メーザーの空間分布(視線速度: -45.64 km s⁻¹)

VERA+KVNのデータをAIPSで解析して水メーザーの空間分布を得た。縦軸、横軸は[mas]である。左は、全速度(-20.72 ~ -62.44 km s⁻¹)の電波画像、右は、-45.64 km s⁻¹の画像である。

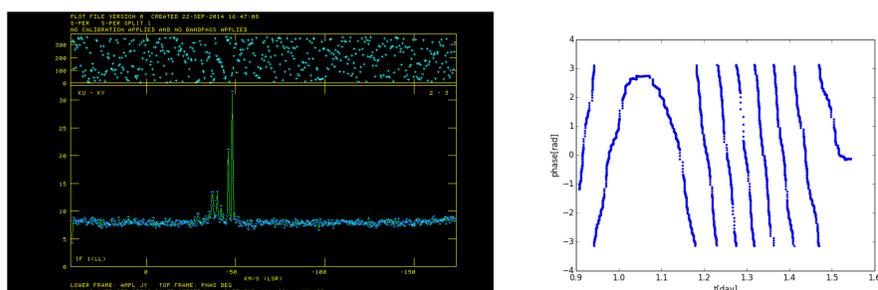


fig.9 S Perの相互相関スペクトル fig.10 -45.64 km s⁻¹の電波画像から得たジビリティ位相

KJVCのデータを確認すると、左図のように-45.64 km s⁻¹が時間的に安定した強度を保っていたため、MFPRを適用する際にフリッジから差し引くためのジビリティ位相の導出に使用した。この速度の電波画像から得られたジビリティ位相を右図に示す。

現状の紹介と今後の方針

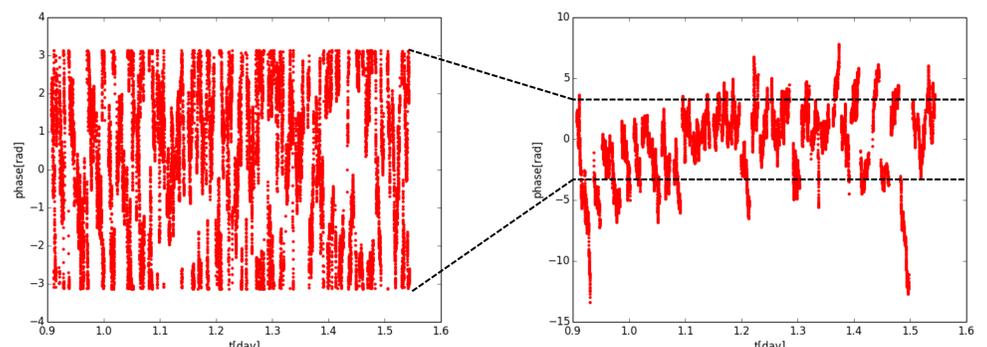


fig.11 22GHzでのフリッジとジビリティとの差(S Per) fig.12 22GHzでのフリッジとジビリティ位相の差(2πの不確定性を補正)

横軸は時間[day]、縦軸は位相[rad]で、フリッジ位相 - ジビリティ位相の差を示している。左は位相における 2π の不確定性を考えずにそのまま表示した結果、右は考慮し、位相差の時間変化を連続的に示した結果である。

S PerもJ0244+62と同様に、短時間の観測を複数回行っているため、セグメントごとに位相の 2π の不確定性を処理している。

上に示した位相に周波数比をかけ、AIPS上で43 GHzのSiOメーザーの位相補正に適用するため、AIPS SNテーブルで出力する解析プログラム(Python)を開発中である。

BL LacとJ0244+62に対してMFPR法を適用し、BL Lacに関しては目標としていた精度で補正することができた。

また、S PerについてもMPFR法を適用するため、22GHzのフリッジ位相とジビリティ位相を求めた。今後は、22GHzで求めた位相補正データを43GHzのSiOメーザーに対してBL LacやJ0244+62と同様の処理によりMFPR法をAIPS上で適用し、その有用性について定量的に実証する。