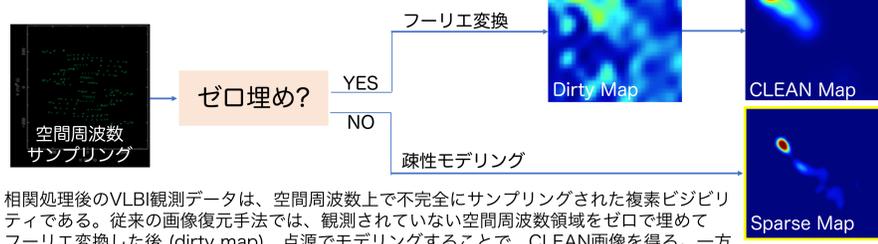


疎性モデリングによる EAVNデータの画像復元

田崎文得 (国立天文台)、秋山和徳 (MIT/Haystack)、池田思朗 (統数研)、森山小太郎、倉持一輝、秦和弘、Yuzhu Cui、本間希樹 (国立天文台)

概要: VLBI観測は短波長・長基線へと歩を進め、これまでにない空間分解能を実現しようとしている。しかしながら、ソフトウェア面では依然として従来手法の CLEAN が主流である。そこで、本ポスターでは、疎性モデリングという統計技法を応用した新しい画像復元手法を提案する。疎性モデリングとは、観測サンプル数に対して求める解のパラメータ数が大きい劣決定問題であっても、有用な情報を持ったパラメータはわずかであるという仮定のもと、最適な解を見つける技法の総称である。我々はこの技法を応用して「画像の多くのピクセル値がゼロである」「多くの隣り合ったピクセル値の差はゼロである」という仮定に基づいて、VLBIデータから画像を復元する手法を開発した。このソフトウェアパッケージを SMILI (Sparse Modeling Imaging Library) と呼び、近日中の公開を目指している。本ポスターではこの手法を用いて、EAVNデータから画像復元を行なった結果を発表する。2017年春に行われた EAVN-EHT のキャンペーンデータから、KVNとVERAのアレイのみを使って、M87の較正源として観測された 3C273 の画像を復元した。観測時期は 2017年1月から5月までの全11epoch に渡る。その結果、コアから 2 mas 程度に渡って南西に伸びるジェットが、全 epoch で復元できた。CLEAN と比べてジェットの成分がよく分離でき、ジェットの固有運動を測定するのに適する画像が得られた。実際に、本観測の100日ほどの間に 0.2 mas 程度の運動があることがわかり、superluminal motion (光速の6倍) を検出することができた。以上から、本手法を VLBI データに適用することは、ジェットの構造を詳しく調べ、運動を測定するのに有用であると言える。

1. 疎性モデリングを応用した画像復元手法

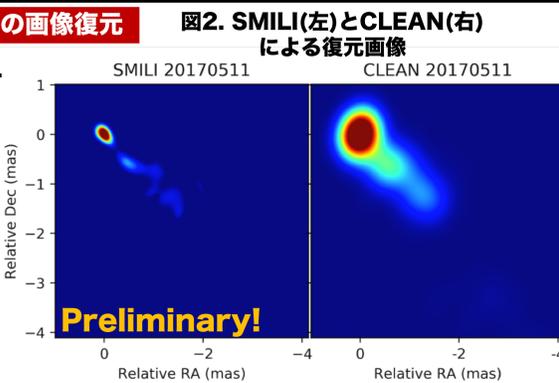
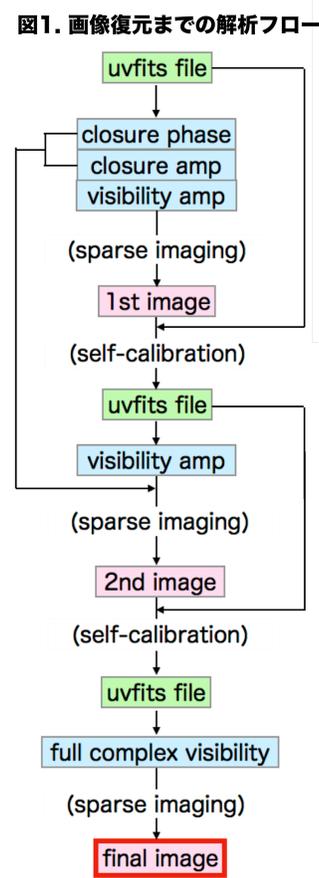


相関処理後の VLBI観測データは、空間周波数上で不完全にサンプリングされた複素ビジビリティである。従来の画像復元手法では、観測されていない空間周波数領域をゼロで埋めてフーリエ変換した後 (dirty map)、点源でモデリングすることで、CLEAN画像を得る。一方、本提案手法は、観測されていない空間周波数領域をゼロで埋めることなく、観測データを再現する画像を直接求める。

疎性モデリングの式: $l = \text{argmin} \{ \chi^2 + \lambda_{l1} \times (\text{L1 term}) + \lambda_{\text{tsv}} \times (\text{TSV term}) \}$

χ^2 term	$\ V - FI\ ^2$ (χ^2 of full complex visibility) OR $\ V - A(FI)\ ^2 + \ \Psi - B(FI)\ ^2 + \ \Phi - C(FI)\ ^2$ (χ^2 of visibility amp., closure phase, and closure amp.)	疎性モデリングとは、劣決定問題の無限に存在する解の中から、『疎』な解を選択する手法である。本提案手法では疎な解とは、(i) 画像の中で多くのピクセル値がゼロ、(ii) 多くの隣り合うピクセル値の差がゼロ、とした。
L1 term	$\sum_{i,j} I_{i,j} $ (Sparsity of image)	我々 EHT-Japan のグループは本手法を含むソフトウェアパッケージ SMILI (Sparse Modeling Imaging Library) を開発し、公開を目指している (Akiyama+2018, in prep.)。
TSV term	$\sum_{i,j} (I_{i+1,j} - I_{i,j} ^2 + I_{i,j+1} - I_{i,j} ^2)$ (Sparsity of image gradient)	

4. SMILI による 3C 273 の画像復元

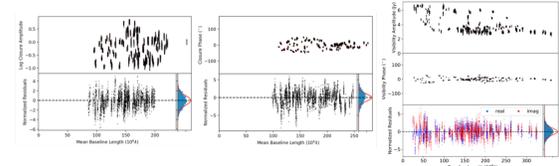


SMILI を使った画像復元のための解析フローを図1に示す。クロージャータ位相、クロージャータ振幅、ビジビリティ振幅を使った画像復元とセルフキャリブレーションを2回、その後最後に複素ビジビリティを使って復元した画像を最終画像とした。

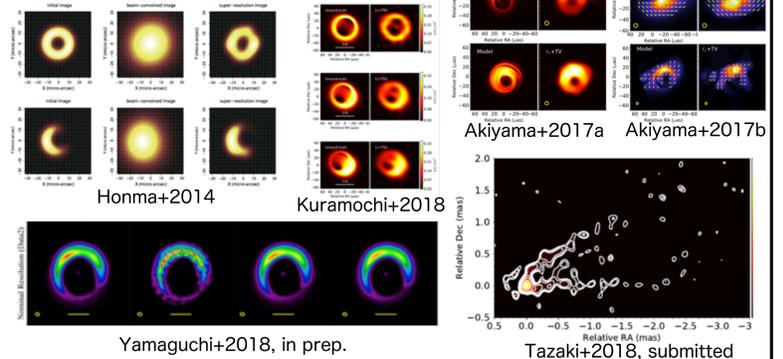
復元画像の1例として、2017年5月に観測されたデータから復元した画像を図2左に示す。CLEAN (図2右) と比べて SMILI の画像では、コアの次に明るい ~ 0.5 mas に位置する成分がコアと分離されているのがわかる。

復元画像と観測データがどの程度一致するかを表したのが図3で、クロージャータ位相 (左)、クロージャータ振幅 (中)、ビジビリティ振幅 (右) である。それぞれの図の最下段は誤差で規格化された残差を表し、その右に残差のヒストグラムを表示している。モデルと観測データはほぼ一致しているが、残差の分布が予測される正規分布よりも広がっているため、系統誤差が残っている可能性がある。

図3. 復元画像と観測データの整合性

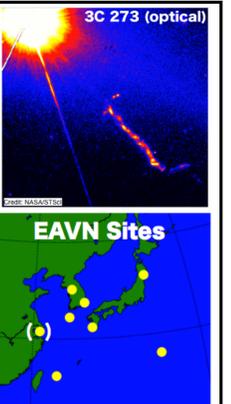


2. 疎性モデリングのこれまでの成果



3. 観測天体と観測データ

- 3C 273**
- ✓ 全天で最も明るいクエーサー (Schmidt 1963)
 - ✓ $z = 0.158$
 - ✓ $1 \text{ mas} \sim 3 \text{ pc} \sim 5 \times 10^3 R_s$ ($M_{\text{BH}} = 7 \times 10^9 M_{\text{sun}}$; Pian+2005)
 - ✓ Super-luminal motion (e.g., Pearson+1981)
- アレイ: VERA + KVN
 ➢ 観測周波数: 43 GHz
 ➢ EAVN-EHT キャンペーンデータ
 ➢ 2017年1月から5月まで全11epoch
 ➢ M87 の明るい較正データとして観測
 ➢ AIPS/Difmap を使ったキャリブレーション済み (by Cui-san)

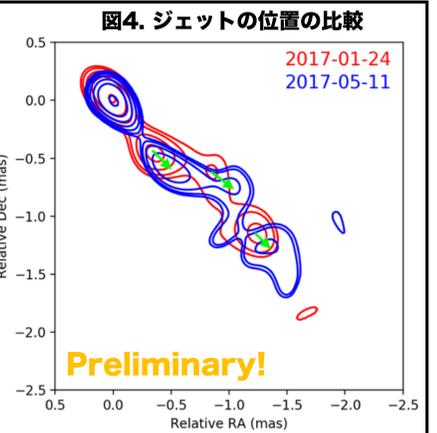


5. ジェットの固有運動

全観測データから復元した画像を並べてみると (本ポスターの左端)、コアの次に明るい成分が、コアから次第に離れていることがわかる。

図4に2番目の観測 (2017年1月24日) と最後の観測 (2017年5月11日) の輝度分布のコントアを同時にプロットした。ジェットの角成分がコアから遠ざかり、100日間で 0.2 mas 程度移動していることがわかる。これは光速の6倍もの速さにあたる。

Proper motion
 ~ 0.2 mas / 100 days ~ 6 c



まとめ: SMILI を使って、EAVN の観測データから 3C273 の画像を復元することに成功した。復元した画像からは、3C273 のジェットが光速の6倍程度で superluminal motion を持つことがわかった。今後は、上海65m 望遠鏡を含めた EAVN フルデータを使って画像復元に取り組みると同時に、M87 のジェットを復元することも目指す。また、SMILI を一般に公開し、VLBI の画像復元手法の1手段として確立させるとともに、必要な機能の実装も引き続き行なっていく。

