

ALMA望遠鏡のイメージングツールの開発

池田 思朗 数理・推論研究系

共同研究者 中里剛, 小杉城治, 本間希樹(国立天文台), 秋山和徳(NRAO, MIT)

はじめに

これまで我々は EHT (Event Horizon Telescope) のために, 電波干渉計のイメージング法の開発を行ってきた. 特にスパースモデリングが有効であることを示し(図1)[1, 2, 3, 4, 5], EHT のためにソフトウェアの開発を行ってきた.

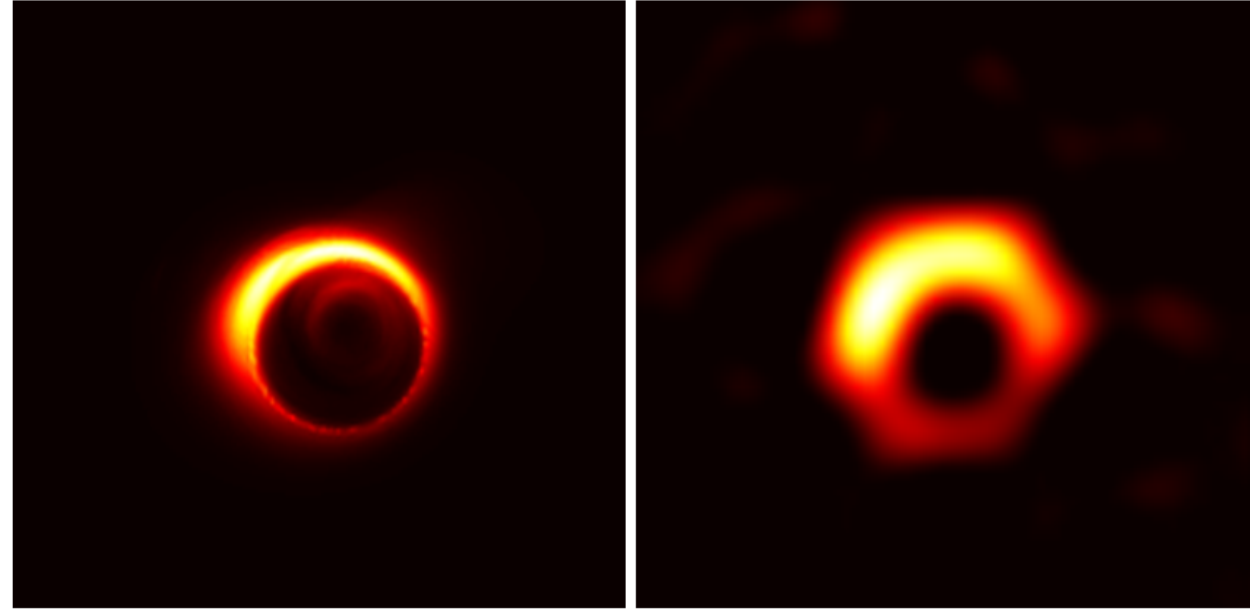


図 1: 超巨大ブラックホールいて座A*のモデル(左), EHT による撮像のシミュレーション結果(右). (K. Akiyama (NRAO, MIT))

ALMA (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array) 望遠鏡はチリのアタカマ高原にある電波干渉計である. EHT のプロジェクトでは複数の電波望遠鏡のうちの1局としてつかわれている ALMA 望遠鏡であるが, ALMA 望遠鏡だけでも多くの望遠鏡を有しており(図2), 高い性能を持つ電波干渉計である. 我々は, 本研究所の共同利用, 自然科学研究機構の融合型共同研究事業を通じて, ALMA 望遠鏡のためにスパースモデリングの方法を基本としたイメージングのソフトツールを開発している.



図 2: ALMA 望遠鏡. (ALMA (ESO/NAOJ/NRAO))

スパースモデリングを用いた電波干渉計のイメージング

電波干渉計では, 画像を空間的に2次元フーリエ変換したものが観測される. 理想的には以下のような観測モデルとなる.

$$\mathbf{v} = F\mathbf{x} + \mathbf{n}, \quad \mathbf{v} \in \mathbb{C}^M, F \in \mathbb{C}^{M \times N}, \mathbf{x} \in \mathbb{R}^N, \mathbf{x} \geq 0, \quad (1)$$

ここで, \mathbf{x} が天球面上の画像であり, F は既知のフーリエ行列, \mathbf{n} はノイズである. 観測される \mathbf{v} はビジビリティ(Visibility)と呼ばれる. ここではその次元を M とする. 観測できる空間周波数領域の点は, 電波望遠鏡同士を結ぶ基線が地球の公転と自転とともに描く軌跡にそって得られる点に限られるため, 周波数領域のサンプリングは十分ではない. このため, 電波干渉計の観測では一般的に $M < N$ である.

参考文献

- [1] K. Akiyama, S. Ikeda, M. Pleau, V. L. Fish, F. Tazaki, K. Kuramochi, A. E. Broderick, J. Dexter, M. Mościbrodzka, M. Gowanlock, M. Honma, and S. S. Doeleman. Superresolution full-polarimetric imaging for radio interferometry with sparse modeling. *The Astronomical Journal*, 153(4):159, 2017.
- [2] K. Akiyama, K. Kuramochi, S. Ikeda, V. L. Fish, F. Tazaki, M. Honma, S. S. Doeleman, A. Broderick, J. Dexter, M. Mościbrodzka, K. L. Bouman, A. Chael, and M. Zaizen. Imaging the Schwarzschild-radius-scale structure of M87 with the event horizon telescope using sparse modeling. *The Astrophysical Journal*, 838(1):1, 2017.
- [3] M. Honma, K. Akiyama, F. Tazaki, K. Kuramochi, S. Ikeda, K. Hada, and M. Uemura. Imaging black holes with sparse modeling. *Journal of Physics: Conference Series*, 699(1):012006, 2016.
- [4] M. Honma, K. Akiyama, M. Uemura, and S. Ikeda. Super-resolution imaging with radio interferometry using sparse modeling. *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 66(5):95, 2014.
- [5] K. Kuramochi, K. Akiyama, S. Ikeda, F. Tazaki, V. L. Fish, H.-Y. Pu, K. Asada, and M. Honma. Superresolution interferometric imaging with sparse modeling using total squared variation – application to imaging the black hole shadow. *The Astrophysical Journal*, 858(1):56, 2018.

画像を求めるためには上の式で得られた \mathbf{v} から \mathbf{x} を求める必要がある. \mathbf{v} は \mathbf{x} をフーリエ変換したものなのだから, 理想的には波数領域の観測量(Visibility)を逆フーリエ変換すれば天体画像 \mathbf{x} が得られるはずだが, ビジビリティの点の数が十分ではないため, 不良設定問題となる. 何らかの方法によって足りない条件を補って解決しなければならない. スパースモデリングの方法では, 画像 \mathbf{x} にスパース性を仮定し, 正則化項として表現して条件を補い, 問題を解決する.

これまでの我々の研究から, 天体画像の復元のためには, \mathbf{x} に0が多いという通常のスパース性と, 隣り合うピクセルの値との差が小さく, 画像は滑らかに変化するという Total Squared Variation という正則化が有効であることが分かっている[5].

$$\hat{\mathbf{x}} = \arg \min_{\mathbf{x}} \left[\frac{1}{2} \|\mathbf{v} - F\mathbf{x}\|_{\ell_2}^2 + \lambda_1 \|\mathbf{x}\|_{\ell_1} + \lambda_{\text{TSV}} \text{TSV}(\mathbf{x}) \right], \quad (2)$$

$$\text{TSV}(\mathbf{x}) = \sum_{ij} \left[(x_{ij} - x_{i,j-1})^2 + (x_{ij} - x_{i-1,j})^2 \right].$$

ALMA のイメージングの難しい点は, M, N が非常に大きいことである. 通常の行列演算を使って(2)式を解決するのは計算量の点から難しい. そこで, F を周波数空間の格子点上に移動させ(グリッディング), FFT (fast Fourier transform) を用いるように実装した. FFT は非常に高速でフーリエ変換を行える上, コンピュータのメモリもさほど消費しないため, 全体の速度が向上できる. 本研究では, グリッディングに関しては国立天文台で開発したものを流用し, 統数研側で最適化のアルゴリズムを開発することによってイメージングツールを開発した.

また, 最終的な画像を提供するためには, スパースモデリングによって導入した $\lambda_1, \lambda_{\text{TSV}}$ の値を決める必要がある. この目的のために, 交差検証法 (Cross Validation) を用いた. この手続きに関しても国立天文台側で実装した. プログラムのインターフェースは python で書かれていて, 電波干渉計のイメージングの標準ソフトである CASA (the Common Astronomy Software Applications package) から呼び出せる. 現在のソフトウェアで 200×200 ピクセルの画像であれば, (2)を解いて数秒で一枚の画像をつくることができる. 交差検証法を含めても数分でイメージングが完了する.

今後について

プログラムはまだ開発段階である. さらなる高速化など, 課題はいくつも存在している. 今後はユーザーを募って天文学的な成果に結びつけていくことが重要である. 共同研究を通じて, 研究を発展させていきたい.

謝辞

本研究の一部は統数研共同利用 H29-1-1018 および, 平成29年度自然科学研究機構分野融合型共同研究事業として行った.