

重力波データ解析における Akima Spline を用いて拡張した Hilbert-Huang 変換の性能評価

陽田 樹[†] 酒井 一樹[†]

[†] 長岡工業高等専門学校 電子制御工学科

1. はじめに

2017 年, 連星中性子星(BNS)合体による重力波の直接観測に世界で初めて成功した. 中性子星(NS)の状態方程式(EOS)はまだ解明されておらず, いくつかの仮説が提唱されている段階である.

BNS 合体後には高質量な NS(MNS)が形成される場合がある. 先行研究[1]では, 時間-周波数解析の手法の一つである Hilbert-Huang 変換(HHT)を用いて MNS による重力波の瞬時周波数の時間発展から, EOS に関する情報が得られることが明らかになった. 一方で, HHT は比較的新しい解析手法であるため, 改善の余地が多数ある.

本研究では, HHT において極値を接続する手順にて, Akima Spline[2]と呼ばれる補間法を用いて HHT を拡張する(AS-HHT). Akima Spline は, 従来の HHT(CS-HHT)が使用する Cubic Spline よりも自然な曲線を生成する. AS-HHT と CS-HHT を用いた場合の重力波データの解析結果を比較し, AS-HHT の性能を評価することを目的とする.

2. AS-HHT による重力波データ解析

重力波データは, 一般相対性理論に基づくシミュレーションデータを用いる. ここでは, Hyp-EOS と呼ばれる EOS で仮定された基準 NS の最大質量が $M_{NS} = 1.35 M_{SUN}$ である H135 モデルと, $M_{NS} = 1.5 M_{SUN}$ である S15 モデルを解析の対象とする.

2.1 時間-周波数マップ(T-F マップ)

まず, 時間-周波数マップ(T-F マップ)によって重力波データの周波数変化の様子を可視化する. 図 1 に作成した T-F マップを示す. 波源からの距離は 5 Mpc とし, ノイズは Advanced LIGO のデザイン感度に基づいたガウスノイズを用いた. $t = 0$ ms 以降に現れる MNS による重力波の周波数変化の軌跡が, Hyp-EOS では時間と共に上昇しているが, Shen-EOS ではほぼ一定であることがわかる. AS-HHT と CS-HHT のどちらでも瞬時周波数の変化を可視化できている.

2.2 EOS の判別

MNS からの重力波データが含まれる区間において時間と周波数の共分散を求め, 周波数変化の特徴を数値化し, EOS を判別する. H135 モデルでは共分散は正の値を示し, S15 モデルではおよそ 0 を示すと考えられる.

ノイズデータのシード値を 1000 通り変えて HHT を行い, それらの結果に対して共分散を求める. その後, 2 つ

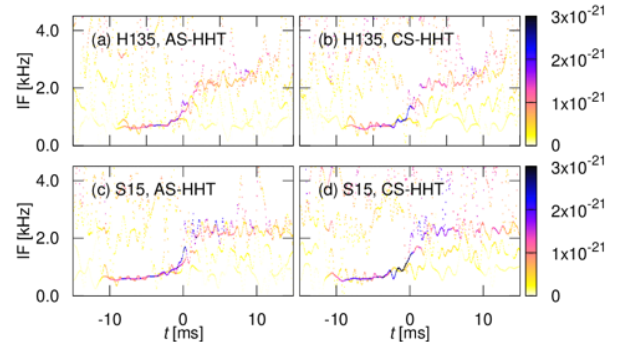


図1. 各モデルについての T-F マップの比較

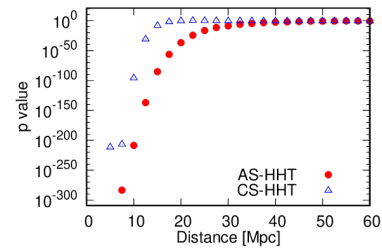


図 2. 波源からの距離に対する p 値

のモデルの共分散に対して Mann-Whitney の U 検定を適用する. 検定による p 値を波源までの距離の関数として図 2 に示す. p 値が低いほど 2 つの分布が同じであるという帰無仮説が強く棄却される. AS-HHT では CS-HHT に比べて, 波源からある程度遠くても 2 つの分布を区別できていることがわかる. また, 有意水準を 1% とすると, p 値が 0.01 を上回るのが CS-HHT では約 20 Mpc なのに対し, AS-HHT では約 45 Mpc で 2 倍以上の距離まで 2 つの EOS の判別が可能であることがわかった.

3. まとめ

Akima Spline を HHT に適用することで, 従来の HHT よりも高い精度で BNS 合体による重力波データを解析できることがわかった. 本研究では BNS 合体を対象としたが, 他の天体現象による重力波に対しても AS-HHT が有効であるかを調査する必要がある.

参考文献

- [1] Masato Kaneyama, *et al.*, “Analysis of gravitational waves from binary neutron star merger by Hilbert-Huang transform”, *Physical Review D* **93**, 123010 (2016)
- [2] Hiroshi Akima, “A NEW Method of Interpolation and Smooth Curve Fitting Based on Local Procedures”, *Journal of the Association for Computing Machinery*, **17**, 4, pp.590-602, (1970)