

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 9 日現在

機関番号：13102

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23740207

研究課題名(和文) Hilbert-Huang変換を用いた重力波探査法の研究

研究課題名(英文) Method of a search for gravitational waves using Hilbert-Huang transform

研究代表者

高橋 弘毅 (TAKAHASHI, Hirotaka)

長岡技術科学大学・工学部・准教授

研究者番号：40419693

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円、(間接経費) 990,000円

研究成果の概要(和文)：材料損傷検出や生体モニタリングの分野において用いられている時間-周波数解析の一つである Hilbert-Huang 変換 (HHT) を重力波データ解析に適用し、HHT 解析を行うための基本的なソフトウェアの開発・整備を行った。また、開発したソフトウェアを用いて、予想されるいろいろな重力波波形にガウスノイズを加えたものに対して HHT 解析を実行し、どの程度重力波信号を取り出せるか、HHT 解析に必要なパラメータを変えることによりその傾向がどのように変化するかということを中心に系統的に調べた。これにより、HHT 解析が重力波解析に有効であることを示唆し、さらなる研究継続の必要性を示した。

研究成果の概要(英文)：The Hilbert-Huang transform (HHT) is a novel, adaptive approach to time series analysis. It does not impose a basis set on the data or otherwise make assumptions about the data form, and so the time-frequency decomposition is not limited by spreading due to uncertainty. Because of the high resolution of the time-frequency, we investigated the possibility of the application of the HHT to the search for gravitational waves. It was necessary to determine some parameters in the empirical mode decomposition (EMD), which is a component of the HHT, and in this research we proposed and demonstrated a method to determine the optimal values of the parameters to use in the search for gravitational waves. As the results, we concluded that HHT was an effective method to search for gravitational waves.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学、素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：重力波 相対論 宇宙物理 信号処理 計算物理

1. 研究開始当初の背景

一般相対論によりその存在が予言されている重力波が、中性子星やブラックホールなどのコンパクト星の連星系(コンパクト連星)から放射されていることは、連星パルサーPSR1913+16などの電波観測で間接的に明らかになっている。しかし、重力相互作用は非常に弱いため、この重力波を直接検出することは未だ実現していない。

近年のレーザーを用いた微小計測技術の発展により、重力波を直接検出することが実現可能となりつつある。重力波の検出は、一般相対論の検証において、動的な重力場の性質に関するものとして非常に重要であると同時に新しい天文学を開く可能性を秘めている。特に、途中の物質との相互作用が小さいという重力波の特質から、電磁波による観測とは質の異なった新しい情報が得られることが期待できる。このような「重力波天文学」の創生に向け、日本のTAMA300、米国のLIGO、欧州のGEO600、Virgoは2000年前後に建設され、重力波検出に対する技術的な有効性を実証した。LIGOとVirgoは感度向上のための改良が行われており2016年の稼働をめざしている。我が国では、大型低温重力波望遠鏡KAGRA計画の一部が「最先端研究基盤事業」の補助対象として採択され、建設が開始された。

しかし、KAGRAなどの重力波検出器によって得られたデータから重力波の情報を取り出し、さらに、それを基に重力相互作用や天体現象に関する物理学的な研究を行うためには、大きなノイズが含まれる時系列データから微小な信号を取り出す手法の開発が必要不可欠である。

2. 研究の目的

コンパクト連星の合体直前に放射される重力波(チャープ信号)のように、波形が十分な精度で予測され、そのテンプレートが準備できる場合には、マッチドフィルタ法が利用できる。いっぽう、超新星爆発やコンパクト連星の合体でも、合体が進んでいる際のような、いわゆるバースト的な重力波源からの重力波に対しては、よいテンプレートを準備することは容易ではない。そのため、バースト的な重力波源に対して、テンプレートを用いない、いくつかのデータ解析法が提案されているが、決定的なものはいまだされていない。

そこで、料損傷検出や生体モニタリングの分野において用いられている時間-周波数解析の一つであるHilbert-Huang変換(HHT)に注目し、重力波データ解析に適用し、新しいデータ解析工程の設計からコード開発、統計処理方法の研究を行うことを本研究の目的とした。

とにかく最初に重力波が検出されるま

では試行錯誤の繰り返しが予想されるが、新しい視点で独創的なデータ解析法を開発し続けることは極めて重要である。

3. 研究の方法

HHTは、時系列データの解析手法の新しいアプローチであり、この変換は、固定された基底セットをデータに課さない適応型の時間-周波数分解を用いるため、フーリエ変換やウェーブレット変換などに比べ、高い周波数分解能をもつことが知られている。高い周波数分解能で解析できるHHTを重力波のデータ解析手法に応用することにより、従来解析法ではできえなかった、ノイズが多量なデータから微弱な重力波の情報を取り出し、詳細な解析を行うことが可能になる。

HHT解析では、まず、一種のhigh-pass filterを繰り返して適用するEmpirical Mode Decomposition(EMD)を行う。これにより時系列データからノイズを除去するとともにデータを複数の周波数帯域モード(IMF: Intrinsic Mode Functions)に分解する(図1)。さらに、それぞれのIMFに対してHilbert変換を用いたHilbert Spectral Analysis(HSA)を行い、瞬時振幅や瞬時周波数の時間的変動を解析する(図2)。

研究当初は、NASAグループが作成した計算コードを基としたプログラムを用いていたが、メモリー配置、計算の効率性などの観点から多くの問題点があることがわかっていった。より効率よく計算を実行していくために、プログラムの全面的な改良を行った。NASAグループとは異なる独自のプログラムを作成し、互いに得られた結果のクロスチェックすることが重要である。この部分はもっとも基本となる部分であるため、年度の前半までに完成させ、その後は開発した独自コードで研究を進めた。

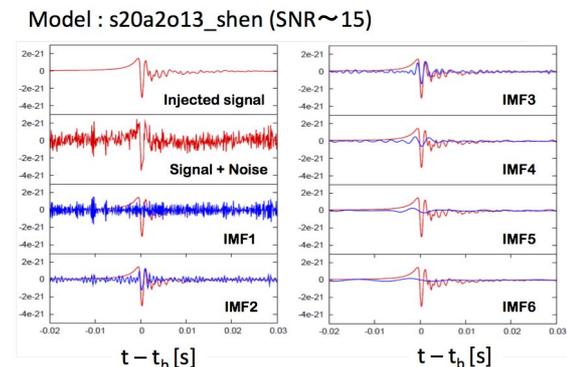


図1 超新星爆発時に放出される重力波波形(赤)にガウスノイズを加えたデータに対してEMDを実行し得られた各IMF(青)の例

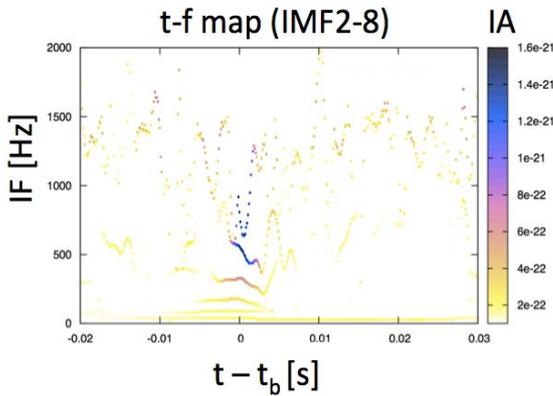


図2 図1の各 IMF に対し HSA を行い瞬時振幅 (IA) や瞬時周波数 (IF) を計算し作成した時間-周波数マップの例

EMD はその名の通り経験則的な手法であり、J. B. Camp たちの NASA グループや研究代表者らのこれまでの研究で、重力波データ解析においては、EMD の計算に必要ないくつかのパラメータの設定方法の重要性が明らかになってきた。最適なパラメータは、信号やノイズの性質に依存する面もあり、我々が取り扱う重力波検出器データに対する系統的なサーチを、予想されるいろいろな重力波波形にガウスノイズを加えたものに対して EMD を実行し、どの程度重力波信号を取り出せるかどうか、いろいろなパラメータを変えることによりその傾向がどのように変化するかということを中心に系統的に調べた。また、抽出される重力波信号の瞬時振幅や瞬時周波数に対する誤差解析を行なった。

さらに、HHT 解析により 1 台の重力波検出器の時系列データより重力波波形を取り出す (再構築) 手法の検討と開発を行った。

4. 研究成果

HHT 解析に必要な基本的なプログラムやライブラリーなどのソフトウェアは独自に開発を行った。

HHT 解析で、EMD により時系列データを複数の IMF に分解する際、入力データによっては、いくつかの問題点があることが、Huang たちや研究代表者らの研究で明らかになった。そのひとつは、1 つの IMF に複数の周波数モードが混入する mode mixing 問題である。これを解決する方法として、Ensemble EMD (EEMD) という手法が提唱されている。ここでは、元の時系列データに系列の異なるホワイトノイズを加えて EMD を実行する。これを繰り返して、そのアンサンブル平均を取ることにより mode mixing を押さえようというものである。し

かし、これによって mode mixing がどこまで押さえられるかということは、ホワイトノイズの加え方やそれぞれの EMD 計算のループを打ち切る閾値の与え方に依存している。

さらに、これらの最適な与え方は、解析する時系列データに含まれる信号とノイズの性質に依存する可能性がある。

したがって、我々が注目する重力波信号と予想される KAGRA や LIGO のノイズにあわせた最適値を見いだす必要があった。予想される重力波波形にガウスノイズを加えたものに対して EEMD を実行し IMF に分解した後、各 IMF に対して HSA を行い瞬時振幅や瞬時周波数の時間的変動を解析し、どの程度ノイズに埋もれた重力波信号を取り出せるか、いろいろなパラメータを変えることによりその傾向がどのように変化するかを中心に系統的に調べた。その結果、パラメータを的確に与える事により、HHT 解析が重力波データ解析においても、有効な解析方法である事を示す事ができた。

さらに、超新星爆発から放出される重力波波形にガウスノイズを加えたものに対して EEMD を実行し IMF に分解した後、各 IMF に対して HSA を行い瞬時振幅 (IA) や瞬時周波数 (IF) の時間的変動を解析した (図 1、および、図 2)。

また、それらの結果を基にして、重力波波形を再構築する手法の検討をし、どの程度波形を再構築できるかを中心に系統的に調べた。その一例を図 3 に示す。これらの結果、パラメータを的確に与える事により、HHT 解析により 1 台の重力波検出器の時系列データより重力波波形を取り出すこと (再構築) が可能であることを示した。さらに、HHT 解析コードの改良をさらに進め、HHT を用いた解析パイプラインの整備を進めている。

以上の研究成果より、HHT 解析が重力波解析に有効であることを示唆し、さらなる研究継続の必要性を示した。

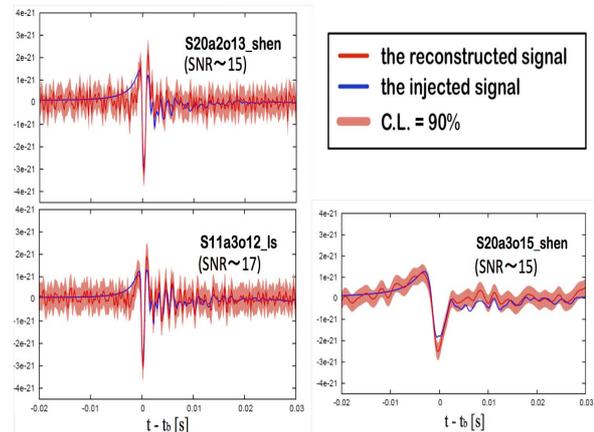


図3 重力波波形を再構築した結果の例

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 7 件)

Masato Kaneyama, Ken-ichi Oohara, Hiroataka Takahashi, Yuta Hiranuma, Takashi Wakamatsu, Jordan B. Camp, Towards constructing an Alert System with the Hilbert-Huang Transform -Search for signals in noisy data-, Innovative Computing, Information and Control, Express Letters Part B : Applications, Vol.5 Issue 1, pp. 285-292 (2014). 査読有

<http://www.ijicic.org/icicelb.htm>
Masaaki Morita, Hiroataka Takahashi, Reconstructing $f(R)$ modified gravity with dark energy parametrization, Journal of Physics: Conference Series, Vol.490, pp. 012087-1-4, (2014). 査読有
DOI:10.1088/1742-6596/490/1/012087

Hiroataka Takahashi, Ken-ichi Oohara, Masato Kaneyama, Yuta Hiranuma, Jordan B. Camp, On Investigating EMD Parameters to Search for Gravitational Waves, Advances in Adaptive Data Analysis, Vol.5, pp. 1350010-1-20, (2013). 査読有

DOI: 10.1142/S1793536913500106
高橋弘毅, 重力波初検出および重力波天文学創成に向けたデータ解析方法の研究, 山梨科学アカデミー会報, Vol.36, pp. 25-33, (2013). 査読無

〔学会発表〕(計 31 件)

高橋弘毅, 金山雅人, 大原謙一, Jordan B. Camp, Hilbert-Huang Transform in Search for Gravitational Wave Signals ~ Reconstruction of waveform ~, 文部科学省科学研究費補助金 新学術領域研究「重力波天体の多様な観測による宇宙物理学の新展開」第2回シンポジウム, 2014年1月, 東京工業大学.

高橋弘毅, 重力波初検出および重力波天文学創成に向けたデータ解析方法の研究, 公益社団法人 山梨科学アカデミー交流大会, 2013年11月, ベルクラシック甲府. 招待講演

Hiroataka Takahashi, Ken-ichi Oohara, On Investigating EMD Parameters to Search for Gravitational Waves, Seminar at Research Center for Adaptive Data Analysis, 2013年10月, National

Central University, Taiwan.

高橋弘毅, 大原謙一, 金山 雅人, 若松 剛司, 平沼 悠太, Jordan B. Camp, Hilbert-Huang 変換を用いた重力波データ解析手法の開発, 日本天文学会 (秋), 2013年9月, 東北大学.

高橋弘毅, 神岡サイエンスパークへようこそ ~ 地下から宇宙を探る ~, スーパーサイエンスハイスクール (SSH) 講演, 2013年7月, 山梨英和高等学校. 招待講演

高橋弘毅, 連星系からの重力波とその観測, 連星系変光星低温度星研究会, 2012年12月, 東京大学天文学教育研究センター 木曾観測所. 招待講演

高橋弘毅, 大原謙一, 金山 雅人, 平沼 悠太, Jordan B. Camp, Alexander Stroeer, Constructing an Alert System with the Hilbert Huang Transform in Search for Gravitational Wave Bursts, 日本天文学会 (秋), 2012年9月, 大分大学.

高橋弘毅, 大原謙一, 金山 雅人, 平沼 悠太, Jordan B. Camp, Alexander Stroeer, Effectiveness of Empirical Mode Decomposition in search for Gravitational Wave Signals III, 日本物理学会 (秋), 2012年9月, 京都産業大学.

Hiroataka Takahashi, Ken-ichi Oohara, Masato Kaneyama, Yuta Hiranuma, Jordan B. Camp, Alexander Stroeer, Effectiveness of Hilbert Huang Transform in Search for Gravitational Wave Bursts, Gravitational Wave Physics and Astronomy Workshop (GWPAW 2012), 2012年6月, Hannover Germany.

Hiroataka Takahashi, Ken-ichi Oohara, Yuta Hiranuma, Jordan B. Camp, Alexander Stroeer, Effectiveness of Empirical Mode Decomposition in search for Gravitational Wave Signals II, 日本物理学会 (秋), 2011年9月, 弘前大学.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高橋 弘毅 (TAKAHASHI, Hiroataka)

長岡技術科学大学 工学部 准教授

研究者番号: 40419693