

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 16 日現在

機関番号：13102

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2016

課題番号：26800129

研究課題名(和文) 適応型時間-周波数解析を用いた重力波探査法の研究

研究課題名(英文) Method of Gravitational Wave Search Based on Adaptive Time-Frequency Analysis

研究代表者

高橋 弘毅 (TAKAHASHI, Hirotaka)

長岡技術科学大学・工学研究科・准教授

研究者番号：40419693

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000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適応型の時間-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するための基本的なソフトウェアの開発・整備をおこなった。特に、中性子星連星合体からの重力波信号の波形とシミュレーションノイズを用いて、状態方程式の理論モデルについて制限を与える手法の検討、および、KAGRAの試験観測データを用いて開発した一連のデータ解析工程の設計からコード開発、統計処理方法などがうまく機能するかの検証をおこなった。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) analysis has been developed as a method for time series analysis of nonlinear and nonstationary data, and it enables us to perform a high resolution time frequency analysis of signals with strong frequency modulation by evaluating the instantaneous variation of amplitude and frequency of data. Using the HHT, we analyze gravitational waves from late inspiral, merger, and post-merger phases of binary neutron stars (BNS) coalescence, computed by a general relativistic numerical simulation. We find that we can clearly observe the time evolution of the instantaneous frequency of the post-merger waveforms. This allows us to constrain the equation of state of neutron stars and to evaluate the radius with a few hundred meters accuracy if BNS coalescences occur within 10 Mpc. Moreover, we confirm the effectiveness of HHT by using real KAGRA test observation data.

研究分野：数物系科学

キーワード：重力波 宇宙物理 計算物理 相対論 信号処理

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。また、2015年にAdvanced LIGOがブラックホール連星合体からの重力波GW150914およびGW151226を直接観測したことにより、重力波観測実験は新たな段階に入ったと言って良い。現在は、重力波天文学の創生を目的として、Advanced LIGO(米)とAdvanced Virgo(欧)、KAGRA(日)を中心に地上のレーザー干渉計型重力波望遠鏡による国際観測ネットワークの準備が進められている。

KAGRA等の地上に設置された重力波望遠鏡に対する最も有望な重力波源は、中性子星やブラックホールからなるコンパクト連星の合体と超新星爆発である。コンパクト連星合体は公転運動しているコンパクト連星が重力波を放射しながら徐々に接近していき、最後に衝突する天体現象である。このようなコンパクト連星の合体段階や超新星爆発からの重力波は、パースト的重力波と呼ばれ、KAGRA等の重力波望遠鏡によって得られたデータからこれらの重力波の情報を取り出し、さらに、それを元に重力相互作用や天体現象に関する物理学・天文学的研究をおこなうためには、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。パースト的重力波の解析において、重力波信号の振幅と振動数の時間変動を捉えることが最も重要であり、これまで短時間フーリエ変換やウェーブレット変換などの時間-周波数解析手法が用いられてきたが、決定的なものは見いだされていない。

2. 研究の目的

本研究課題では、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適応型の時間-周波数解析手法であり高い周波数分解能を実現するHilbert-Huang変換(HHT)を重力波データ解析に適用するための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おこなうこと目的とした。具体的には、以下の2つを主な目的として設定をした。

(1)中性子星連星合体後の大質量中性子星からの重力波

近年の電磁波観測の結果を反映させた数値シミュレーションから、中性子星連星合体後に大質量中性子星が形成されることが報告されている。この大質量中性子星の形成については、連星の全質量と状態方程式が重要な役割を果たしていることが分かってきた。しかし、中性子星のような高密度核物質の状態方程式はほとんど分かっていない。そこで、大質量中性子星からの重力波信号の波形と

シミュレーションノイズを用いて、状態方程式の理論モデルについて、HHT解析を用いて制限を与える手法の検討をすることを目的とした。

(2)KAGRA試験観測データを用いたHHT解析手法の評価

KAGRAは2016年3月と4月に試験観測を実施した。様々な雑音が混入している実際に得られたKAGRAの実観測データに対して、重力波信号の波形を注入して解析をおこなう。重力波信号の波形には、パースト的重力波のモデルとして用いられるサインガウシアン信号を使用する。開発した一連のデータ解析工程の設計からコード開発、統計処理方法などが、うまく機能するかの検証をおこなうことを目的とした。

3. 研究の方法

Hilbert-Huang変換(HHT: Hilbert-Huang Transform)は、1996年にN. E. Huangらが提案した時間-周波数解析手法の新しいアプローチである。この手法では、フーリエ変換などを基にした従来の時間-周波数解析手法とは異なり、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ことで、振幅や周波数の時間変動を瞬時的に解析することが可能になる。さらに、従来の時間-周波数解析手法には時間と周波数に関する不確定性原理が付随するが、HHTは不確定性原理に制限されずに解析することが可能である。HHTの解析手順の概要を図1に示す。

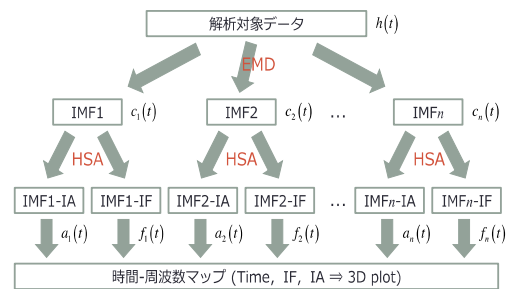


図1: HHTの解析手順の概要

まず、解析対象とする時系列データに対して一種のハイパスフィルターである経験的モード分解(EMD: Empirical Mode Decomposition)を適用する。ここで、経験的モード分解により分解された複数の時系列データを固有モード関数(IMF: Intrinsic Mode Function)と呼ぶ。次に、それぞれの固有モード関数に対してHilbert変換を用いたHilbertスペクトル解析(HSA: Hilbert Spectral Analysis)を適用する。Hilbertスペクトル解析を適用することにより、それぞれの固有モード関数に関する瞬時振幅(IA: Instantaneous Amplitude)と瞬時周波数(IF: Instantaneous Frequency)を得ること

ができ、これらの瞬時振幅や瞬時周波数を詳細に解析することや、それぞれの固有モード関数から得られたすべての瞬時振幅や瞬時周波数より時間-周波数マップを描いて時間の変動を解析する。

これらを実行する解析プログラム、および統計処理などを実行するプログラムの開発を進めた。

これに加え、研究目的(1)では、一般相対論的数値シミュレーションにより得られた中性子星連星合体からの重力波信号の波形と Advanced LIGO のデザイン感度に基づくシミュレーションノイズデータ、開発したプログラムを用いて、HHT 解析および統計処理などをおこなった。

また、研究目的(2)では、KAGRA の試験観測の実観測データにバースト重力波のモデル波形としてサインガウシアン信号を注入し、開発したプログラムを用いて、HHT 解析および統計処理などをおこなった。

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などのソフトウェアは独自に開発をおこないまとめることができた。

研究目的(1)では、Advanced LIGO のデザイン感度に基づくシミュレーションノイズデータを生成し、そこに一般相対論的数値シミュレーションにより得られた中性子星連星合体（この例では地球から 5Mpc の距離）からの重力波信号の波形を注入し、HHT 解析をおこなった。さらに、ノイズを変え 1000 回 HHT 解析をおこなった結果の一例を図 2 に示す。

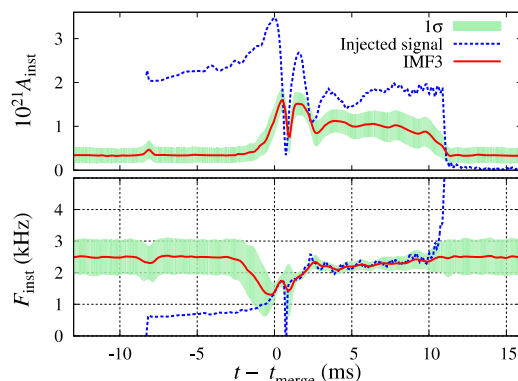


図 2: 3 番目の固有モード関数 (IMF3) から得られた瞬時振幅 (上) と瞬時周波数 (下)

図 2 は、青点線で注入した重力波信号波形の振幅 (上) と周波数 (下) の時間変化を、赤線で HHT 解析を実行した結果である 3 番目の固有モード関数 (IMF3) から得られる瞬時振幅 (上) と瞬時周波数 (下) の平均を示している。緑の領域は 1000 回解析した結果から得られた 1 σ の領域を示している。図 2 から、3 番目の固有モード関数 (IMF3) から得られる瞬時周波数が、中性子星連星合体後の大質量中性子星から放出されている重力波の周

波数と良く一致していることが見てとれる。

さらに、詳細な解析を進め、連星の全質量をマッチドフィルタ法などで解析でき既知とできるならば、状態方程式は中性子星の半径で特徴づけられ、その半径を数 100m の誤差で推定できることを明らかにした。今後大質量中性子星からの重力波を観測できれば、多くある状態方程式の理論モデルについて制限を付けられる可能性がある結論づけた。

次に、研究目的(2)では、KAGRA の試験観測の実観測データにバースト重力波のモデル波形として周波数が 300Hz を中心に変化するサインガウシアン信号を注入し、開発したプログラムを用いて HHT 解析をおこなった。その時間-周波数マップの一例を図 3 に示す。

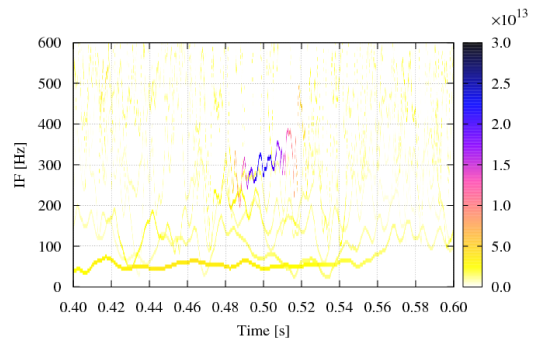


図 3: 時間-周波数マップ。カラーは瞬時振幅の大きさを示す。

また、この信号に対し、ノイズを変え 50 回 HHT 解析を行った結果を図 4 に示す。

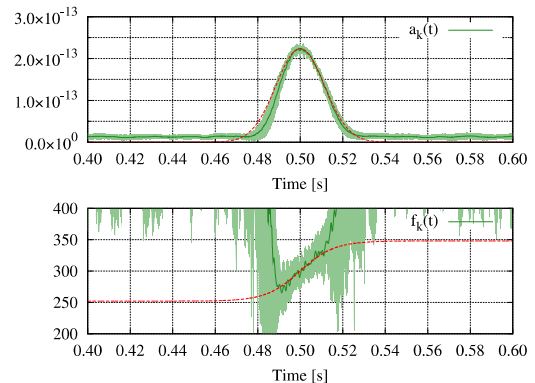


図 4: 5 番目の固有モード関数 IMF5 から得られた瞬時振幅 (上) と瞬時周波数 (下)

図 4 は、赤点線で注入したサインガウシアン信号の振幅 (上) と周波数 (下) の時間変化を、緑線で HHT 解析を実行した結果である 5 番目の固有モード関数 (IMF5) から得られる瞬時振幅 (上) と瞬時周波数 (下) の平均を示している。薄緑の領域は 50 回解析した結果から得られた 1 σ の領域を示している。瞬時振幅は全体的に標準偏差が小さく、振幅の大きな部分では良く一致している。また、瞬時周波数は信号の振幅の大きい 0.5 秒付近において標準偏差が小さく周波数が一致して

いることが確認できた。しかし、系統的に信号の前半部分が少し削れてしまっているため、この理由は今後調査する必要がある。重力波望遠鏡から得られる実観測データに関しても HHT 解析が有効である事が示唆された。

また、数値シミュレーションにより作成された超新星爆発時の重力波信号のみの場合において HHT 解析をおこない、超新星爆発時の重力波波形の周波数の特徴を確認した。今後は、雑音に信号波形を注入して解析し、得られた結果からどのように波形情報を抽出するかなどの検討をより詳細に進めていく必要がある。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 8 件)

Kazuki Sakai, Ken-ichi Oohara, Masato Kaneyama, Hiroataka Takahashi, Analysis of the real gravitational wave data GW150914 with the Hilbert-Huang transform, ICIC Express Letters, Vol.11 No.1, pp.45-52 (2017). 査読有

<http://www.ijicic.org/icicel.htm>

Masato Kaneyama, Ken-ichi Oohara, Hiroataka Takahashi, Yuichiro Sekiguchi, Hideyuki Tagoshi, and Masaru Shibata, Analysis of gravitational waves from binary neutron star merger by Hilbert-Huang transform, Physical Review D, Vol.93, 123010-1-11 (2016). 査読有
DOI:<https://doi.org/10.1103/PhysRevD.93.123010>

Kipp Cannon, 端山 和大, 伊藤 洋介, 高橋 弘毅, 重力波の初検出と情報処理技術 -LIGO と KAGRA で活用されている情報処理技術-, 情報処理, Vol.57 No.5, pp.428-433 (2016). 査読無, 依頼記事

http://www.ipsj.or.jp/magazine/contents_m.html

Masato Kaneyama, Ken-ichi Oohara, Yukitsugu Sasaki, Hiroataka Takahashi, Jordan B. Camp, On Completeness and Orthogonality of Intrinsic Mode Functions to Search for Gravitational Waves, ICIC Express Letters Part B : Applications, Vol.6 No.2, pp. 343-349 (2015). 査読有
<http://www.ijicic.org/icicelb.htm>

〔学会発表〕(計 61 件)

高橋 弘毅 on behalf of the KAGRA Collaboration, 大型低温重力波望遠鏡 KAGRA: 全体報告, 日本天文学会(春), 2017 年 3 月 17 日, 九州大学 伊都キャンパス(福岡県・福岡市).

酒井 一樹, 大原 謙一, 中野 寛之, 金山 雅人, 高橋 弘毅, Hilbert-Huang 変換を用いた連星ブラックホール合体からの ringdown 重力波の解析, 日本物理学会(春), 2017 年 3 月 17 日, 大阪大学豊中キャンパス

(大阪府・豊中市).

横澤 孝章, KAGRA collaboration, Hilbert-Huang 変換を用いた iKAGRA 波形注入試験の検証, 日本物理学会(春), 2017 年 3 月 17 日, 大阪大学豊中キャンパス(大阪府・豊中市).

高橋 弘毅, 「アインシュタインからの最後の宿題」は解決されたのか?, 長岡工業高等専門学校 技術協力会 科学・語学教育分科会 特別講演会, 2016 年 11 月 24 日, 長岡工業高等専門学校(新潟県・長岡市), 招待講演.

酒井 一樹, 高橋 弘毅, 大原 謙一, 金山 雅人, Hilbert-Huang 変換を用いた GW150914 の解析, 日本天文学会(秋), 2016 年 9 月 15 日, 愛媛大学 城北キャンパス(愛媛県・松山市).

Hiroataka Takahashi, Satoshi Ueki, Yukitsugu Sasaki, Kazuki Sakai, Masato Kaneyama, Ken-ichi Oohara, Jordan B. Camp, Hideyuki Tagoshi, Hilbert-Huang Transform in Search for Gravitational Waves, The 8th Korea-Japan workshop on KAGRA, 2015.6.27., Gwagnju, (Korea).

Kazuki Sakai, Ken-ichi Oohara, Masato Kaneyama and Hiroataka Takahashi, Amplitude-based detection method for gravitational wave bursts: application to GW150914, Gravitational Wave Physics and Astronomy Workshop 2016 (GWPAAW2016), 2016.6.15-18., Massachusetts, (USA).

Satoshi Ueki, Yukitsugu Sasaki, Kazuki Sakai, Hiroataka Takahashi, Masato Kaneyama, Ken-ichi Oohara, Jordan B. Camp, Gravitational Wave Physics and Astronomy Workshop 2015 (GWPAAW2015), 2015.6.17., Osaka, (Japan).

Hiroataka Takahashi, Masato Kaneyama, Ken-ichi Oohara, Yukitsugu Sasaki, Jordan B. Camp, On Completeness and Orthogonality of Intrinsic Mode Functions to Search for Gravitational Waves, The ninth International Conference on Innovative Computing, Information and Control (ICICIC2014), 2014.6.15-18., Busan, (Korea).

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・工学研究科・准教授
研究者番号: 40419693

(2) 研究協力者

大原 謙一 (OOHARA, Ken-ichi)

金山 雅人 (KANEYAMA, Masato)

酒井 一樹 (SAKAI, Kazuki)

佐々木 幸次 (SASAKI, Yukitsugu)

植木 聡史 (UEKI, Satoshi)