

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 15 日現在

機関番号：13101

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23540293

研究課題名(和文)バースト的シグナルを含む新しい重力波データ解析手法の開発

研究課題名(英文)Development in a New Method of Data Analysis for Searching Gravitational Wave Signals from Burst and Other Sources

研究代表者

大原 謙一(Oohara, Ken-ichi)

新潟大学・自然科学系・教授

研究者番号：00183765

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円、(間接経費) 1,140,000円

研究成果の概要(和文)：新しい重力波解析手法として、Hilbert-Huang Transform (HHT) の適用可能性を詳しく調べた。はじめに、HHTの重要な要素であるempirical mode decompositionに含まれるパラメータについて、重力波解析に対する最適値を求めた。これを元に、超新星などからのバースト重力波探査のためのalert systemを構築する手法を明らかにした。さらに、コンパクト連星合体からの重力波解析において、インスパイラル・フェーズの重力波だけでなく合体後に放射される重力波に対してもHHTが有効であることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：We have investigated effectiveness of Hilbert-Huang Transform (HHT) to search for gravitational waves. Since it is necessary to determine some parameters in the empirical mode decomposition, which is an important component of the HHT, we determined the optimal value of the parameters for analyzing gravitational waves. And then we presented a method for constructing an alert system to search for burst signals from supernovae with the HHT. We showed that the HHT is effective for analysis of time-frequency properties of gravitational waves from compact binary coalescence in the post-merger phase as well as the inspiral phase.

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 一般相対論 データ解析

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の直接検出と重力波による天体観測をめざして、レーザー干渉計を用いた重力波観測装置の建設が日本や欧米で進められている。日本では、大型低温重力波望遠鏡 LCGT (現 KAGRA) の建設が開始された。重力波観測装置を用いて重力波信号を検出するためには、大きなノイズが含まれる時系列データから微少な信号を取り出す手法の開発が必要不可欠である。有望な宇宙の重力波源のひとつであるコンパクト連星合体 (Compact Binary Coalescence: CBC) 直前の重力波 (いわゆるチャープ信号) は、精度よい波形予測が可能であるため、重力波テンプレートを用いたマッチドフィルター法が利用可能である。いっぽう、CBC の合体後の重力波や、もう一つの有望な重力波源である超新星爆発などからのバースト的重力波の解析では、テンプレートが利用できないため、別の手法を用いる必要がある。特に、重力波源の性質を明らかにするためには、精度よい周波数の時間変化の解析 (時間-周波数解析) が必要であり、あらたな解析手法の開発が急務となっている。

2. 研究の目的

連星中性子星の合体の際に放射される重力波のように持続時間が数分間におよぶイベントだけでなく、大質量ブラックホール連星の合体や超新星爆発のようなバースト的なイベントに対しても有効な解析手法を開発し、その有効性を検証する。また、マッチドフィルター解析など、これまでに開発されている解析手法とも連携し、リアルタイムでの重力波信号検出プログラムへの実装をめざす。

一般に、時系列データの解析では、フーリエ解析がよく用いられる。しかし、非定常、非線形なデータには、まったく適した方法ではない。非定常データに対しては、時系列データを短い時間に区切ってフーリエ解析をする短時間フーリエ解析やそれを改良したウェーブレット解析がしばしば用いられる。しかし、これらには時間分解能 Δt と周波数分解能 Δf の間にいわゆる不確定性原理 $\Delta t \Delta f \leq 1/4\pi$ が存在し、太陽質量程度のコンパクト連星に対する inspiral phase を除いて、重力波解析には適していないものと考えられる。そこで、高精度の時間-周波数解析が可能で手法として近年注目を集めている Hilbert-Huang Transform (HHT) の重力波データ解析への適用可能性を詳細に検討する。

3. 研究の方法

HHT 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。さらに、それぞれの IMF に対して Hilbert 変換を用いた Hilbert Spectral Analysis

を行い、瞬時振幅や瞬時周波数の時間的変動を解析する。

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 グループや我々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データに対する系統的なサーチが必要である。また、重力波信号とノイズの大きさの比 (Signal-Noise Ratio, SNR) にも依存するが、単純な HHT の適用では瞬時振幅や瞬時周波数の解析精度は十分なものが得られない可能性もある。したがって、HHT 解析を用いて、観測データに重力波データが含まれていることを明らかにするとともに、その振幅や周波数のおよその時間的変動を求め、その後、パラメータ空間を限定したテンプレートを用いたマッチドフィルターを適用して、詳しい重力波データ解析を行うという方法が考えられる。具体的には、本研究では以下のような事柄を明らかにする。

- (1) 重力波データに対して最適な EMD 計算方法を見いだす。ここでは、最適なパラメータの決定や計算方法自体の改良が含まれる。
- (2) HHT 解析を用いて、バースト的重力波の早期発見システムの構築に向けた手法を開発する。
- (3) CBC からの重力波に対して、HHT 解析を用いた高精度時間-周波数解析が可能であるかどうか、可能である場合は、どの程度の距離まで起こったイベントに対してこの手法が有効であるかどうか明らかにする。
- (4) 超新星爆発の際の重力波に対して、観測装置に予想されるノイズを付加した出力信号に EMD を実行し、得られた IMF からもとの重力波波形の再構築の可能性を探る。

4. 研究成果

(1) まず、Hilbert-Huang Transform (HHT) を用いた重力波データ解析のための計算コードを作成した。現行の PC サーバに対して最適化を行うとともに、MPI ライブラリを用いた並列化にも成功し、十分高速で、精度よい計算が可能であることを示した。この計算コードの中では、Empirical Mode Decomposition (EMD) および Ensemble EMD (EEMD) に関連するいくつかのパラメータを決める必要がある。それは、解析する信号データの性質に依存するが、まず、単純なサイン・ガウス波形データとホワイト・ガウスノイズを用いて、パラメータ決定手法を探った。その結果、パラメータを変化させて、ノイズを含む時系列データから元の波形データをどの程度再現できるかということと、その計算に要する時間を定量的に比較することにより、最適パラメータが決定できることを明らかにした。

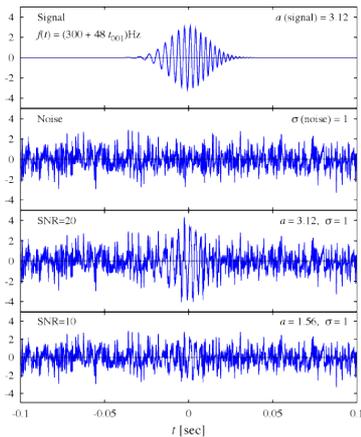


図 1

例えば、図1の最上段のような信号を考える。これは、

$$s(t) = A \exp[-(t/\tau)^2] \sin \phi(t)$$

$$\phi(t) = 2\pi(3.0t_{001} + 0.24t_{001}^2)$$

$$\tau = 0.016\text{sec}, t_{001} = t/0.01\text{sec}$$

で与えられるサイン・ガウシアン信号で、周波数は、時間 t の関数として、以下のように与えられる。

$$f(t) = (300 + 48t_{001}) \text{ Hz}$$

これに対して、図1の2段目のようなホワイト・ガウスノイズを付加したのが3段目、信号の振幅を半分にして、ノイズを付加したものが最下段である。SNR = $\sqrt{\sum s(t_i)^2}/\sigma$ (ここで、 σ はホワイト・ガウスノイズの標準偏差)で定義される signal-noise 比は、それぞれ、SNR = 20および10に対応する。我々は、これらに対して、それぞれ 400 の異なるシード(種)で与えられる乱数によるノイズを付加し、様々なパラメータを用いた EEMD を適用した HHT で解析を行った。その結果、瞬時周波数を $f(t) = (a + bt_{001})\text{Hz}$ でフィッティングした場合、入力信号(真の値) $a = 300, b = 38$ に対して、SNR = 20 では、 $a = 299.1 \pm 1.2, b = 46.7 \pm 2.7$, SNR=10 でも、 $a = 301.7 \pm 3.5, b = 41.3 \pm 7.4$ 程度の精度で周波数を求められることを明らかにした。

(2) 超新星爆発などからのバースト重力波探査のために、重力波捕捉の alert system を、HHT を用いて行う手法の開発を行った。これは、上記(1)と同様のサイン・ガウス信号にホワイト・ガウスノイズが付加された時系列データに HHT 解析を行い、ある時間以上の間、瞬時振幅がある値以上になった場合、重力波をとらえた可能性があるとして、alert を発するというものである。バースト重力波に対して、短時間フーリエ変換や wavelet 変換のような手法を用いて、同様の解析を行う excess power 法がこれまでに考えられているが、HHT を用いることにより、これまでの方法より精度よく、低コストで時間-振幅、時間-周波数解析を行うことが可能となり、より有望なものが構築できると予想される。実際に、図1の SNR = 20 のデータに対して、時間-周波数マッ

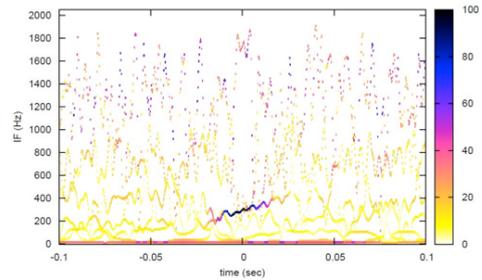


図 2

プを描くと図2のようになる。

ここでは、横軸に時刻、縦軸に周波数として、EEMD で求められた IMF の瞬時周波数を重ねて描いている。また、色は瞬時振幅の大きさを表している。これから、 $-0.015\text{sec} < t < 0.015\text{sec}$ に信号を明確にとらえていることがわかる。また、図3に、IMF2 の receiver operating characteristic (ROC) curve を示した。

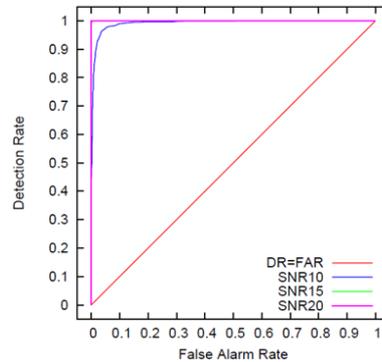


図 3

これは、SNR = 10, 15, 20 に対して、ある時間にわたって瞬時周波数がある値を超えた場合に信号が含まれているとする判定条件で、その閾値を変化させた場合、実際に信号が含まれていないのに含まれているとする割合 False Alarm Rate(FAR) の関数として、信号が含まれている場合に正しくとらえられる割合 Detection Rate (DR) を示したものである。FR = 0 で、DR が 0 から 1 にジャンプする階段関数に近いほどよい判定条件であることを示している。この図から、SNR = 20 および 15 では、ほぼ完璧であり、SNR = 10 では、多少悪くなるが、それでも、 $\text{FAR} < 0.01$ に対して、 $\text{DR} > 0.97$ が達成できることを示している。

さらに、信号捕捉の判定を明確にするために、 i 番目の IMF の瞬時振幅 $A_i(t)$ に対して、時間

$$\bar{A}_i(t_k, T) = \frac{1}{T} \int_{t_k}^{t_k+T} A_i(t) dt = \frac{1}{N+1} \sum_{j=k}^{k+N} A_i(t_j)$$

間 t_k から $t_k + T$ の間の積分値をとって、様々な i と t_k に対する最大値 $X(T)$ を求めた。1000 個の異なるノイズに対して、SNR = 10 あるいは 20 の信号が含まれる場合とノイズだけの場合の $X(T)$ の分布を示したものが図4である。

$X > X_c$ であれば信号が含まれるという条件を課すと、図4の正規分布フィッティングから、 $X_c = 0.62$ で、SNR = 10 に対して、

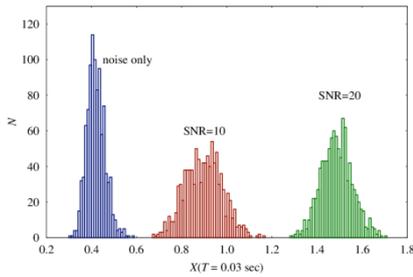


図 4

FAR= 3.7×10^{-7} , 信号を取りこぼす割合 False Dismissal Rate (FDR) = 4.1×10^{-4} , $X_c = 0.57$ とすれば, FAR= 1.0×10^{-4} , FDR = 3.9×10^{-5} となることが分かった。また, これに要する計算時間は, Xeon E5-2670 の CPU を用いて 1 秒の時系列データに対して 3 秒程度かかってしまうが, 完全に並列化が可能であり, 16 コアのマシンで並列化すれば, 0.2 秒以下にすることが可能である。

以上のことから, HHT を用いた重力波捕捉の alert system を構築することが可能であることが明らかになった。

(3) HHT を用いて, 連星中性子星合体の際に放射される重力波の解析可能性を調べた。重力波波形は, 数値相対論のシミュレーション結果によるものも用いた。これに, Advanced LIGO で予想されるノイズスペクトルを元にしたガウスノイズを付加して, 瞬時周波数をどの程度再現できるかを調べたものである。

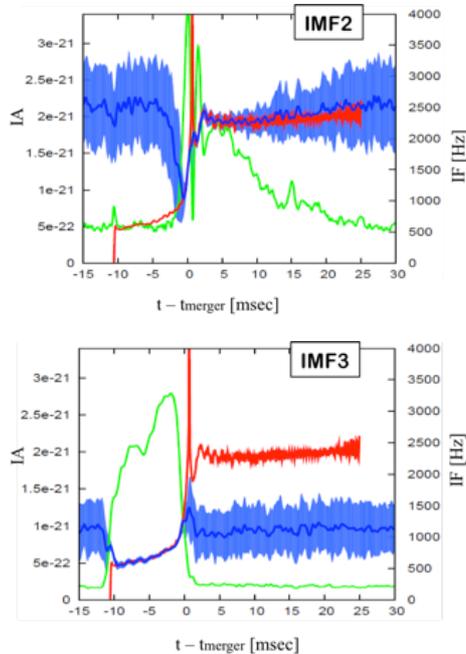


図 5

図5は, 距離 5Mpc でのイベントに対して HHT 解析をした結果の 1 例を示している。赤線は数値相対論波形から求めた周波数を示す。上図は IMF2, 下図は IMF3 について, 異なるノイズを付加した 100 回の HHT 解析で得られた瞬時周波数の平均値を濃い青線で, $\pm 1 \sigma$ の分散

を薄い青で示している。緑線は HHT 解析の瞬時振幅(平均値)である。横軸の原点は中性子星合体の時刻に取っている。下図(IMF3)は, 合体までの, いわゆるチャープシグナルを非常に精度よく再現していることを示している。いっぽう, 上図(IMF2)に現れる合体後の重力波(この部分は, テンプレートを用いたマッチドフィルター法が適用できないフェーズであることに注意)の周波数再現精度は, これに比べて悪くなるが, 少なくとも振幅がある程度大きいところの精度はそれほど悪いものではない。

図5で示したものの以外についても, いくつかの状態方程式や中性子星質量の場合の重力波に対する HHT 解析を総合すると, 中性子星合体イベントの距離が 10Mpc で, 誤差 10%程度の精度で周波数の時間変動が再現できることを示した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 7 件)

- ① M. Kaneyama, K. Oohara, H. Takahashi, Y. Hiranuma, T. Wakamatsu and J. 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, 査読有, Vol. 5, 2014, pp. 285-292, [http://www.ijcic.org/elb-5\(1\).htm](http://www.ijcic.org/elb-5(1).htm)
- ② M. Morita and H. Takahashi, Reconstructing $f(R)$ modified gravity with dark energy parameterization, Journal of Physics: Conference Series, 査読有, Vol. 490, 2014, 012087 (4 pages), DOI: 10.1088/1742-6596/490/1/012087
- ③ H. Takahashi, K. Oohara, M. Kaneyama, Y. Hiranuma and J. B. Camp, On Investigating EMD Parameters to Search for Gravitational Waves, Advances in Adaptive Data Analysis, 査読有, Vol.5, 2013, 1350010 (20 pages), DOI 10.1142/S1793536913500106
- ④ Y. Okada, N. Kanda, S. Dhurandhar, H. Tagoshi and H. Takahashi, The cross-correlation search for a hot spot of gravitational waves: Numerical study for pint spread function, Journal of Physics: Conference Series, 査読有, Vol. 363, 2012, 012040 (9 pages), DOI: 10.1088/1742-6596/363/1/012040
- ⑤ K. Ishidoshiro, M. Ando, A. Takamori, H. Takahashi, K. Okada, N. Matsumoto, W. Kokuyama, N. Kanda, Y. Aso and K. Tsubono, First observational upper limit on gravitational wave backgrounds at 0.2Hz with a torsion-bar antenna, Physical Review Letters, 査読有, Vol. 106, 2011, 161101

(4 pages),

DOI: 10.1103/PhysRevLett.106.161101

- ⑥ S. Shurandar, H. Tagoshi, Y. Okada, N. Kanda and H. Takahashi, Cross-correlation search for a hot spot gravitational waves, *Physical Review D*, 査読有, Vol. 84, 2011, 083007 (8 pages),
DOI: 10.1103/PhysRevD.84.083007

[学会発表] (計 24 件)

- ① 金山雅人, 大原謙一, 高橋弘毅, 平沼悠太, J. B. Camp, Hilbert-Huang Transformによる重力波解析, 日本物理学会第69回年次大会, 2014年3月27日~3月30日, 東海大学湘南キャンパス
- ② M. Kaneyama, K. Oohara, Y. Hiranuma, H. Takahashi, J. B. Camp, The Hilbert-Huang transform in search for gravitational-wave burst, *Gravitational Wave Physics and Astronomy Workshop 2013 (GWPAW2013)*, 2013年12月17日~12月20日, Inter-University Center for Astronomy and Astrophysics (IUCAA), India
- ③ 金山雅人, 大原謙一, 高橋弘毅, 平沼悠太, J. B. Camp, Hilbert-Huang Transformを用いた重力波解析, 日本物理学会秋季大会, 2013年9月20日~9月23日, 高知大学
- ④ H. Takahashi, M. Kaneyama, K. Oohara, Y. Hiranuma, T. Wakamatsu, J. B. Camp, Towards Constructing an Alert-System with the Hilbert-Huang Transform - Search for Signals in Noisy Data, *The Eighth International Conference on Innovative Computing, Information and Control (ICICIC2013)* (招待講演), 2013年9月14日~9月17日, 東海大学熊本
- ⑤ 高橋弘毅, 大原謙一, 金山雅人, 若松剛司, 平沼悠太, J. 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2013年秋季年会, 2013年9月10日~9月12日, 東北大学
- ⑥ K. Oohara, Fundamentals of the gravitational wave data analysis V, 2013 International School on Numerical Relativity and Gravitational Waves (招待講演), 2013年8月3日~8月10日, APCTP Headquarters at Pohang, Korea
- ⑦ M. Kaneyama, K. Oohara, Y. Hiranuma, H. Takahashi, J. B. Camp, Detection method with the Hilbert-Huang transform in search for gravitational-wave burst, *Yukawa International Seminar 2013 (YKIS2013)*, 2013年6月3日~6月7日, 京都大学
- ⑧ 金山雅人, 大原謙一, 高橋弘毅, 平沼悠太, J. B. Camp, A. Stroeer, Hilbert-Huang Transformによる重力波検出法の開発, 日本物理学会第68回年次大会, 2013年3月27日, 広島大学
- ⑨ 大原謙一, 金山雅人, 平沼悠太, 高橋弘毅, J. B. Camp, A. Stroeer, Hilbert-Huang変換を用いた重力波のデータ解析, 日本物理学会2013年春季年会, 2013年3月22日, 埼玉大学
- ⑩ 高橋弘毅, 大原謙一, 金山雅人, 平沼悠太, J. B. Camp, On Investigating EMD Parameters to Search for Gravitational Waves, 重力波天体の多様な観測による宇宙物理学の新展開第1回シンポジウム, 2013年3月2日, 大阪市立大学
- ⑪ M. Kaneyama, K. Oohara, Y. Hiranuma, H. Takahashi, J. B. Camp, A. Stroeer, Excess Power Method with the Hilbert-Huang Transform in Search for Gravitational Wave Signals, *The 22th Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan*, 2012年11月12日~11月16日, 東京大学
- ⑫ 高橋弘毅, 大原謙一, 金山雅人, 平沼悠太, J. B. Camp, A. Stroeer, Constructing an Alert System with the Hilbert-Huang Transform in Search for Gravitational Wave Bursts, 日本天文学会2012年秋季年会, 2012年9月20日, 大分大学
- ⑬ 高橋弘毅, 大原謙一, 金山雅人, 平沼悠太, J. B. Camp, A. Stroeer, Effectiveness of Empirical Decomposition in Search for Gravitational Wave Signals III, 日本物理学会秋季大会, 2012年9月11日, 京都産業大学
- ⑭ K. Oohara, M. Kaneyama, Y. Hiranuma, H. Takahashi, J. B. Camp, A. Stroeer, Constructing an Alert System with the Empirical Mode Decomposition in Search for Gravitational Wave Signals, *Gravitational Wave Physics and Astronomy Workshop (GWPAW2012)*, 2012年6月4日~6月7日, Hannover, Germany
- ⑮ H. Takahashi, K. Oohara, M. Kaneyama, Y. Hiranuma, J. B. Camp, A. Stroeer, Effectiveness of Empirical Mode Decomposition in Search for Gravitational Wave Burst, *Gravitational Wave Physics and Astronomy Workshop (GWPAW2012)*, 2012年6月4日~6月7日, Hannover, Germany
- ⑯ 大原謙一, 高橋弘毅, 平沼悠太, J. B. Camp, A. Stroeer, Constructing an Alert System with the Empirical Mode Decomposition in Search for Gravitational Wave Signals, 日本物理学会第67回年会, 2012年3月25日, 関西学院大学
- ⑰ K. Oohara, J. B. Camp, Y. Hiranuma, A. Stroeer, H. Takahashi, Effectiveness of Empirical Mode Decomposition in Search for Gravitational Wave Signals, *The 21st Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan*, 2011年9月26日, 東北大学
- ⑱ 高橋弘毅, J. B. Camp, 平沼悠太, 大原謙一, A. Stroeer, Effectiveness of Empirical Mode Decomposition in Search for Gravitational Wave Signals II, 日本物理学会秋季大会, 2011年9月19日, 弘前大学

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況（計 0 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

http://astrol.sc.niigata-u.ac.jp/~oohara/KibanC_2011-2013/

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大原 謙一 (OOHARA, Ken-ichi)

新潟大学・自然科学系・教授

研究者番号：00183765

(2) 研究分担者

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

(3) 連携研究者

()

研究者番号：