

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 6 月 13 日現在

機関番号：62616

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2020～2021

課題番号：20K22353

研究課題名（和文）熱振動を用いた新たな重力波望遠鏡較正手法の研究

研究課題名（英文）A New Gravitational Wave Telescope Calibration Method Using Thermal Oscillation

研究代表者

陳 たん（Chen, Dan）

国立天文台・重力波プロジェクト・特任研究員

研究者番号：20888086

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、レーザー干渉計型重力波望遠鏡の新しい較正手法として、熱雑音を基準にした手法(Tcal)の開拓を行った。初めに、既存手法であるPhoton calibration method(Pcal)の精度検証を行い、次にKAGRAのO3GKデータを使用し、Pcal信号とTcal信号の時間変動を比較した。結果、2つの信号間には強い相関があることが分かり、Tcalでも干渉計の時間変動較正を行うことができる可能性を示した。さらに相対的な時間変化較正だけでなく、絶対的な干渉計較正の可能性を示す足掛かりとして、温度に依存した熱雑音計算を可能にした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

レーザー干渉計型重力波望遠鏡の較正手法としては、主レーザーの波長や周波数を利用する手法や、補助レーザーの輻射圧を利用する手法が一般に知られているが、本研究では全く新しい熱雑音を利用した較正手法の開拓を行い、その利用可能性を示した。重力波望遠鏡を含む観測装置の較正において、独立した新たな手法が得られることは、観測データの較正精度の向上や信頼性を高める重要なことである。本手法をさらに発展、確立していくことで世界の重力波望遠鏡の観測精度を高めることに繋がり、重力波天文学へ大きな貢献が可能となる。

研究成果の概要（英文）：In this study, I pioneered a new calibration method for laser interferometric gravitational wave telescopes based on thermal noise (Tcal). First, the accuracy of the existing Photon calibration method (Pcal) was verified, and then the time variability of the Pcal and Tcal signals were compared using KAGRA's O3GK data. The results showed that there is a strong correlation between the two signals, indicating the possibility that Tcal can also be used to perform time-varying calibration of interferometers. Furthermore, as a stepping stone to show the possibility of not only relative time-varying calibration but also absolute interferometer calibration, temperature-dependent thermal noise calculations were made possible.

研究分野：重力波望遠鏡の開発

キーワード：重力波 重力波望遠鏡 較正 熱雑音

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

レーザー干渉計型重力波望遠鏡では、取得される干渉光信号から、装置の応答を較正して重力波波形への再構築が必要であり、このプロセスは科学的に有意義な成果を出すためには欠かせないものである。しかし観測される重力波による時空の歪みは 10^{-21} 程度と非常に小さい。このため同程度の基準となる鏡変位を生じさせる手段も限られ、故に望遠鏡の較正手法も限られている。既存の手法は、干渉計のレーザー波長を基準として鏡変位を測定する Free-swinging Michelson Method、主レーザーの周波数と基線長伝達関数を利用して擬似的な鏡変位を生じさせる Frequency Modulation Method、それに補助レーザーの輻射圧による鏡変位を基準にする Photon Calibrator Method (Pcal) の3つである。

独立した複数の較正手段を用いることで、より重力波信号の精度、信頼性を高められるため、新たな較正手段を開発することは非常に重要である。

2. 研究の目的

本研究の目的は、上記の3手法とは全く別な原理に基づく、熱雑音(Thermal noise)を利用した較正手段(以後 Tcal)を開拓することである。物体は常に熱振動しており、重力波望遠鏡の場合にはこのために鏡が揺れ動き、機械的な熱雑音となる。 $x(\omega)$ を熱雑音振幅、 k_B を Boltzmann 定数、 T を系の温度、 ω を角周波数、 $Y(\omega)$ を系のアドミッタンスとすると、熱雑音は揺動散逸定理によって次のように定式化される。

$$x^2(\omega) = \frac{4k_B T}{\omega^2} \text{Re}[Y(\omega)]$$

電気抵抗の熱雑音は標準として使われる素性の良いものであり、同様のことが機械的な熱雑音にも当てはまり、一次標準での較正が可能になると考えられる。

本研究では、大型低温重力波望遠鏡 KAGRA のデータを用いて、この Tcal が望遠鏡較正に使用できる可能性を探った。

3. 研究の方法

KAGRA の観測運転 O3GK では、既存手法の Pcal が常に稼働しており、そのために基準となる Pcal 信号が干渉計に入力されていた。干渉計の状態は常に変化しているため、不変の基準信号である Pcal 信号が干渉計の出力では時間変化しているように見える。本来ならこの変化を元に $h(t)$ データの補正(=Pcal による時間変動補正)を行うが、本研究ではこの時間補正処理を行う前のデータを用いた。

Pcal による時間変動補正を行う前の O3GK データから、熱雑音信号を抜き出し(Tcal 信号)、既存手法の Pcal 信号と比較を行い、その時間変動を比較した。ここで Tcal 信号と Pcal 信号が強い相関が示せれば、Tcal 信号は、Pcal 信号と同様に干渉計の時間変動を捉えることができる、つまりは時間変動較正に使用できることを意味する。

(1) 初めに、比較対象である Pcal の O3GK 当時の精度を見積もり、時間変動が十分に捉えられていることを確認した。これには、Pcal が引き起こす鏡変位の下記の式⁽¹⁾を元に各パラメータの測定精度を伝搬させて見積もった。ここで P は Pcal レーザーのパワー、 θ は入射角、 M は鏡の質量、 c は光速、 ω は角周波数、 I は鏡の回転モーメント、それに a 、 b はそれぞれ Pcal レーザーと主干渉計レーザーの鏡上での位置を意味している。

$$x_{pcal}(\omega) = -\frac{2P \cos \theta}{Mc\omega^2} \left(1 + \frac{\vec{a} \cdot \vec{b} M}{I} \right)$$

(2) 次に O3GK データから熱雑音、具体的には鏡を支える4本のファイヤファイバーが引き起こすバイオリンモード熱雑音部分を抜き出した。このバイオリンモードはファイヤの機械損失が非常に低いために周波数空間においてとても鋭い。このためピーク値を得るためには長時間の積分が必要であるが、O3GK 時の干渉系は長期間安定に動いていた時間帯が少なくピーク値を得られる長時間データが限られていた。そこで、ピーク値ではなく、バイオリンモード周波数帯における rms を算出することで、長時間積分ができない観測時間帯でも熱雑音の影響を抜き出すことができた。バイオリンモードは O3GK では 1st と 2nd の2つのモードが見えており、2つとも分析を行なった。

(3) 上記までは、Tcal を使って干渉計の時間変化を追うという相対変化較正の可能性を探索してきたが、本研究の次のステップとして、絶対値の正しさを検証していくことを考えている。このために最後に数値的に上記バイオリンモード熱雑音の計算を行うための計算コードを作成

し、現在コードの正しさを検証している。

4. 研究成果

(1) O3GK の Pcal の精度に関して調査を行ったところ、右の表 1 のように各パラメータが精度に寄与していたことがわかった。Pcal の全体的なハードウェア不定性が 3.2%であることがわかった。O3GK の観測運転中に観測された Pcal 信号のゆらぎはおおよそ数%から 10%であることから、干渉計の信号の揺らぎをある程度捉えることは可能であることがわかった。

表 1: KAGRA の観測運転 O3GK における Pcal の不定性原因。全体で合わせて、3.2%である。

Uncertainty source	Effect on x_{pcal} () [%]
レーザーパワー測定精度	2.5
光子効率測定	1.7
レーザー位置変動	0.99
その他	0.48

(2) 次に O3GK データにおいて、バイオリンモード熱雑音(Tcal 信号)と Pcal 信号の比較結果を示す。分析対象は、Pcal 信号として干渉計に入力していた line のうちバイオリンモード周波数に近い 80Hz と 860Hz の Pcal line と、干渉計信号ではっきり見えていた 180Hz と 415Hz のバイオリンモードとした。時間変動の比較が行いやすいように各データは、O3GK 全体での時間平均値によって規格化した。(図 1)

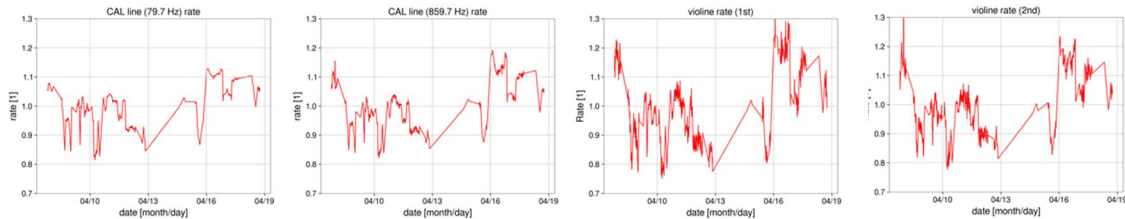


図 1: KAGRA の観測運転 O3GK における Pcal 信号(左の 2 図)と Tcal 信号(右の 2 図)の時間

上記の結果をさらに Pcal 信号と Tcal 信号とでそれぞれで平均化し、同じグラフに描画したものが図 2 である。さらに Pcal 信号と Tcal 信号の相関が見えるように、横軸に Pcal 信号、縦軸に Tcal 信号を描画したグラフが図 3 である。

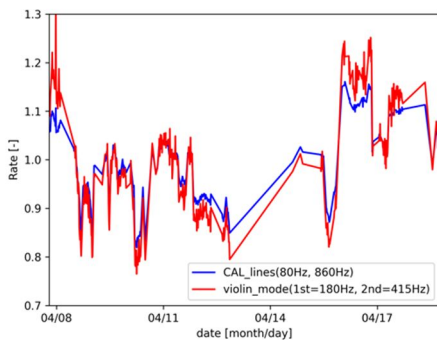


図 2: Pcal 信号(CAL_lines)と Tcal 信号(violin_mode)の O3GK 期間中の時間変化。

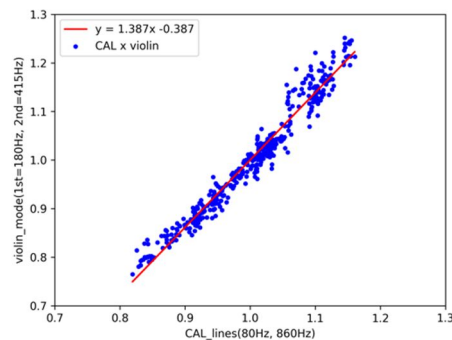


図 3: Pcal 信号(CAL_lines)と Tcal 信号(violin_mode)の相関。赤線は線形 fit した結果である。相関係数は 0.98 であった。

これらの結果から Tcal 信号は、Pcal 信号と強い相関があることがわかる。この時間変化は、Pcal や Tcal が変化しているのではなく、干渉計のレスポンスが変化していることを考えると、Tcal と Pcal が同じ干渉計の変化を捕らえられていると理解するのが自然である。つまりは Tcal でも干渉計の時間変動較正に使用できることを示唆している。

(3) Tcal はその性質から干渉計の時間変動だけでなく、絶対値較正が可能であると期待している。本研究を発展させ、これを検証するために、バイオリンモード熱雑音の計算コードを作成し検証している。熱雑音は系の温度や、温度依存する素材の物性(機械的損失やヤング率など)によって変化するため、実際に観測された熱雑音を計算上再現するには、観測時の温度に応じた物性値が必要である。そこで必要な温度依存物性データを収集し、温度依存した熱雑音計算を可能にした。計算には PPP 手法⁽ⁱⁱ⁾を利用した。本コードによって計算された参照結果を図 4 に示す。

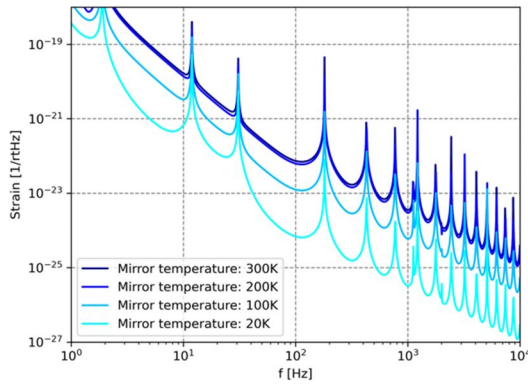


図 4: KAGRA の熱雑音計算結果。ここでは熱雑音のうち、本研究に直結するサスペンション熱雑音のみを示した。サスペンション熱雑音は高温では干渉計の最も感度の良い周波数領域を制限し、20K に達すると、設計感度をほぼ全域で下回る。

本研究では、上記のように(1)現在主流の Pcal の精度を調査し干渉計の時間変化を追えるだけの精度があることを確認し、(2)Tcal 信号と Pcal 信号を比較し強い相関があることを示した。この結果は、Tcal でも干渉計の時間変化較正を行うことが可能であることを示唆している。(3)さらに Tcal による絶対値較正への足掛かりとして温度に依存した熱雑音計算ができるようにデータを収集し、計算コードを作成した。

参考文献:

- (i) E Goetz, et.al., CQG 27 (2010) 084024
- (ii) F.Piergiovanni, M.Punturo and P.Puppo, 2009, VIR-0015E-09

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Dan Chen
2. 発表標題 重力波望遠鏡KAGRAのための較正手法の開発
3. 学会等名 春季日本物理学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Dan Chen
2. 発表標題 Status of KAGRA calibration toward O4
3. 学会等名 7th KAGRA International Workshop (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Koki Ito
2. 発表標題 Calibration of PCal Laser Power with O3GK
3. 学会等名 7th KAGRA International Workshop (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Koki Ito
2. 発表標題 重力波望遠鏡 KAGRA におけるレーザーの輻射圧を用いた較正 2
3. 学会等名 日本物理学会北陸支部定例学術講演会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 伊藤光希	4. 発行年 2021年
2. 出版社 富山大学大学院理工学研究科教育部物理学専攻 修士論文	5. 総ページ数 56
3. 書名 重力波望遠鏡KAGRAにおけるレーザーの輻射圧を用いた較正	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	伊藤 光希 (Ito Koki)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------