

令和 3 年 5 月 31 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K03670

研究課題名(和文) 重力波天文学時代を目指した高解像度信号による重力波検出確率向上のための研究

研究課題名(英文) Improving probability of detecting gravitational waves with high-resolution signals for gravitational wave astronomy

研究代表者

宮川 治 (Miyakawa, Osamu)

東京大学・宇宙線研究所・准教授

研究者番号：90532680

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：現在のKAGRAでは信号分解能の制限からくるダイナミックレンジの不足で、例えば非常に大きな重力波を取りこぼしてしまうような可能性がある。これらの問題を解決するために、新たに高分解能の信号出力のための20ビットデジタルアナログコンバーターを入手した。また、それに付随する回路の設計、製作やソフトウェアについても開発、実装を進め、動作することをテストベンチに組み込み確認した。スケジュールの関係上、KAGRA本体の実際のアクチュエータ部分に組み込むことは実現しなかったが、これは引き続きタイミングを見て導入を試みる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

重力波検出器のダイナミックレンジを改善することは、観測時の安定率の向上につながる。今回の20ビットデジタルアナログコンバーターの動作確認により、将来のKAGRAの重力波観測の稼働率の向上に貢献できると考えられる。実際に、過去の観測ではデータのクオリティーが悪いため、解析が困難だったケースが確認されている。稼働率の向上は重力波の検出率の向上だけでなく、データのクオリティー自身を上げより信頼のあるデータを取得することを可能とする。

研究成果の概要(英文)：The current KAGRA may drop very large gravitational waves, for example, due to the lack of dynamic range caused by the limited signal resolution. To solve these problems, we obtained a new 20 bit digital analog converter for high resolution signal output. We have also developed and implemented the associated circuit design, fabrication, and software, and confirmed that it works on the test bench. Due to schedule constraints, we were not able to implement it in the actual actuators on KAGRA, but we will continue to try to introduce it in the future.

研究分野：重力波物理学

キーワード：重力波 重力波検出実験 干渉計 精密測定 フィードバック制御

1. 研究開始当初の背景

1916年にアルバートアインシュタインの一般相対性理論によって予言された重力波は、およそ100年の時を経て米国LIGO計画によって2015年に検出された。その際の重力波源は二つの質量の違うブラックホール同士の合体であることがわかり、一般相対論の検証という意味だけでなく、天文学的にも中間質量ブラックホール同士の合体というほとんど予測していなかった現象であったため、非常に大きなインパクトがあった。2017年のノーベル物理学賞を重力波の検出でLIGOの研究者が受賞したことは記憶に新しいが、検出という実験分野が受賞の理由となったことは、いかにこの微小な重力波の検出が実験的に難しかったのかを表している。LIGOグループはその後、3例の重力波の検出を報告し、特に4例目では欧州のVirgo計画との同時検出の報告もされ、世界3台の検出器による同時観測で三角測量の原理により、重力波源の方向精度も格段に上がるなど、すでに統計的に重力波を扱うことができる重力波天文学の始まりの時代が来ている。つい先日、LIGO-Virgoで二つの中性子連星による100秒にも渡る長時間重力波イベントが捉えられ、加えて可視光での追観測が世界中の望遠鏡で報告されるなど、まさに重力波天文学の幕開け時代と呼ぶにふさわしい盛り上がりを見せている。

このように、重力波の初検出のみならず、複数の重力波検出による重力波天文学という新たな学問分野が開かれようとしている背景の中、日本の大型低温重力波望遠鏡計画KAGRAはLIGOの建設スタートから遅れること15年、2010年にやっと建設許可が下りるに至った。その後のトンネル掘削、真空装置や防振系の建設と計画は順調に進み、その後種々の光学系を組み込み、2016年の試験観測を遂行した。現在も重力波検出が実現できる感度に達するべく、装置の改良が進んでいる。KAGRAが当初目指した重力波の初検出はLIGOグループによって実現されてしまったが、今後の重力波天文学の発展には地球規模的にKAGRAの位置が重要になる。KAGRAが重力波源の位置精度の向上に貢献できることはもちろん、重力波の偏光など4台目の検出器があって初めて解明できる物理が存在する。KAGRAは重力波の初検出を目指したために、おそらく今の設計で重力波を検出できるだけの性能は有するだろう。しかしながら、初検出後に「重力波天文学」と呼ばれる新たな学問分野をKAGRAが率いていくためには、少なくとも複数の重力波を統計的な議論ができるようになるまで感度を高め、安定に動かす必要がある。果たして、重力波天文学の時代に今のままのKAGRAで本当に対応できるのだろうかと考えると感度や安定性に様々な不安な点が見えてくる。

2. 研究の目的

重力波天文学時代に対するKAGRAの準備不足の一つと考えられるのが、信号入出力の分解能の問題である。天文学というからには、統計的に十分な数の大小様々な振幅の重力波を捉える必要があるが、現在のKAGRAでは信号分解能の制限からくるダイナミックレンジの不足で、例えば非常に大きな重力波を取りこぼしてしまうような可能性も出てくる。本研究ではこの信号分解能の問題を解決し、重力波を長期間にわたり取りこぼしなく安定に検出するための基礎研究を目的とする。

信号の分解能は、理想的な周波数フィルターを使った信号の白色化ができればわずか4ビットでも足りると言われている。そのため、KAGRAの設計時においても信号分解能に関しては軽視されがちであった。しかしながら、当然そのような理想的な白色化のための周波数フィルターは実機での実装は不可能であり、アナログ回路の応答関数の複雑化の制限や、突発的な信号、そして上で述べたイベント的な大小の重力波信号など、必ず何らかの制限を受ける。

現在のKAGRAの設計では全ての信号の入出力を16ビットの分解能で扱っている。上記の4ビットに比べると、16ビットの分解能というのは十分に見えるが、実際には重力波天文学を担うには不十分である。特にメインの鏡のアクチュエーターに送る制御信号の出力分解能は非常に重要で、将来的にこの制御信号の量子化雑音で感度が決まってしまう可能性が非常に高い。本研究ではKAGRAにおける制御信号の分解能を、初検出の後に一気に20ビット化して置き換えることを目指し、分解能不足を解決する手段を探る。KAGRAにおける重力波の初検出後、さらに感度を上げて複数検出を考える時代になるが、このまま16ビットの信号分解能のままで進めていくと、制御信号の分解能不足による感度制限及び、安定性の不足による稼働率の低下などが問題となると非常に高い確率で予測されるが、今の所この分野の研究、検証は低解像度のままでなされていない。

3. 研究の方法

本研究では、実際のKAGRAの主鏡の一つに高分解能の制御信号を適用し、その効果を検証することを考えている。具体的にはKAGRAの主鏡のアクチュエーター部分に信号を送るデジタルアナログコンバーターを、現在の16ビットのものから新たな20ビットのものに置き換える。ただ、一言で20ビット化と言っても簡単な話ではなく、高分解能の性能を生かすためには、デジ

タルアナログコンバーター自身の電気回路を相当注意深く作らなくてはならない。一般的には16ビットの分解能でさえも、電気回路の設計が問題でその分解能を活かしきれていない場合も多いが、KAGRAにおいては少なくとも16ビットの分解能の理論的な限界ノイズまで到達していて、十分な性能を引き出していることを確認している。そのため、20ビットの高分解能を検証する下地は整っている。

また、デジタルアナログコンバーターから出た信号を鏡に信号を返すまでの間に設置するアナログフィルター回路群、特にアンチイメージフィルターと呼ばれるデジタル信号からアナログ信号に変化する際の、余分な雑音を除去するフィルターは、現在使っているものでは雑音が大きく不十分で、現在のものより4ビット分(16分の1)低雑音化しなくてはならない。そのため回路全般を新たに設計、製作し直す必要がある。

実際に鏡を動かす制御系のソフトウェアも、現在の16ビット出力のものを20ビット化する必要がある。そのためのドライバー類の対応などが必要となる。計算機内では信号自身は32ビット化されているので、これを出力時に16ビットに落として出力しているものから、20ビットに落として使うことは容易である。

4. 研究成果

4-1. 20ビットデジタルアナログコンバーター

本研究の柱である20ビットデジタルアナログコンバーターにはGeneral Standard社のものを選択した。現在KAGRAで使われている16ビットモデルを新たに再基本から再設計したものになる。16ビットモデルを簡易的に拡張した18ビットモデルも存在しているが、出力信号の正負の反転時で信号が飛ぶなど、不安定が確認されたために、線型性、信号の滑らかさという意味で、より素直な拡張モデルの20ビット版のものを使うことにした。本科学研究費でこのモデルを一枚入手した。

4-2. 回路1: アダプターカード

実際のデジタルアナログコンバーターとして動作させるためには、64KHzおよび1PPSの同期のためのクロック信号を入力する必要がある。そのための外部からのクロック信号を、リモートで切り替えて入力できる様なアダプターカード回路の設計、製作した(Appendix 1)。これはKAGRA本体でもそのままリモートで制御してクロック信号の切り替えができるような、互換性の高い回路としたため、性能評価後そのままKAGRAに導入できるようになっている。回路設計時においては、クロック信号の入力切替においてこれまで使ってきた16ビットシステムの基本回路も含めて、表にはあらわには出てこないが、入力信号が途絶えるようなある状況下で、故障を引き起こす様な潜在的な問題が発見され、新回路の設計時にはその改良も含むなど想定していない進展もあった。そのため、本研究を進める過程でKAGRA本体でも同様の修正した方がいいことも示された。

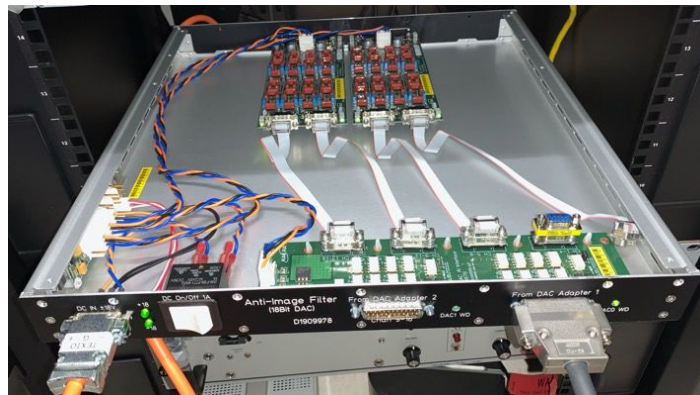


図1: 製作したアンチイメージフィルター。デジタル信号から発生する高周波の偽信号を除去する。

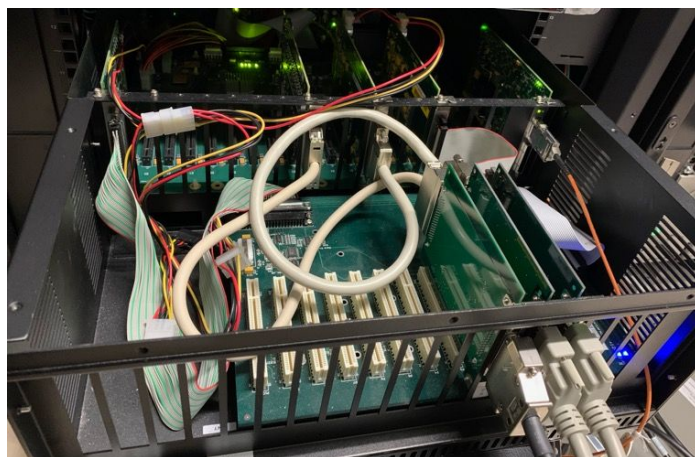


図2: 20ビットデジタルアナログコンバーターと製作したアダプターカードを、入出力ボックスに組み込み込んだ様子。奥側中3枚のうち一番左が今回テストしている20ビットのデジタルアナログコンバーター。その右が16ビットデジタルアナログコンバーター。手前3枚のカードの一番左が、今回設計、製作したアダプターカード。

4-2. 回路 2: アンチイメージフィルター

さらに、アナログ信号をデジタル信号に変換する際に、アンチイメージフィルターと呼ばれるデジタル信号から発生する高周波の偽信号を除去する回路が必要となる。偽信号はノイズと考えられ、このアンチイメージフィルターがないと実際の鏡は高周波で揺らされてしまう。これまで使ってきた 16 ビット対応のものでは雑音が大きく不十分で、4 ビット分 (16 分の 1) 低雑音化しなくてはならないことが判明し新たに設計、製作した(図 1、Appendix 2)。

これらの 20 ビットデジタルアナログコンバーターと製作したアダプターカードを、KAGRA で用いられている信号入出力ボックスに組み込み、動作の確認をした。まずは 20 ビットデジタルアナログコンバーターが単体で動作することを確認し、さらに制御システムの一環としてきちんと全体で動作するかどうかを、テストベンチに組み込み確認した(図 2)。

4-3. 制御ソフトウェア

合わせて、制御系のソフトウェアも、現在の 16 ビット出力のものを 20 ビット化する必要があるが、こちらも対応済みであり、動作確認をした(図 3)。

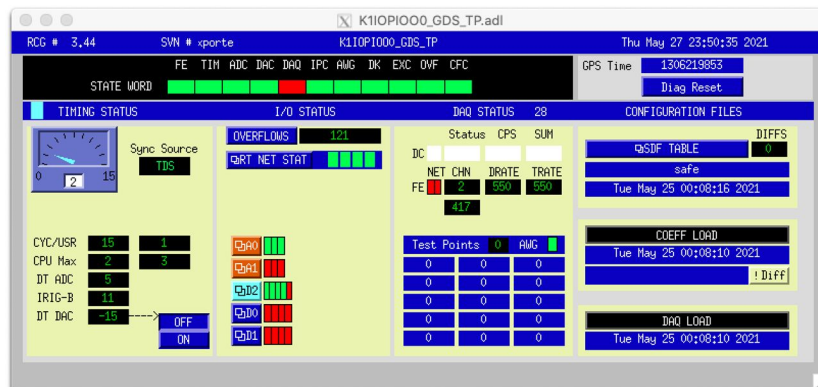


図 3: 真ん中の D2 というのが、今回新たに導入した 20 ビットデジタルアナログコンバーターに相当する。既存の KAGRA の制御システムと同等のテストベンチ上で稼働することが可能となった。

4-2. KAGRA 本体への取り組み

KAGRA 本体が 2020 年度初めまで観測が続き、その後しばらくコミショニングとアップデートが続いた。スケジュールの関係上、これまでのセットアップを壊したくないため、組み込みが遅れていて、KAGRA 本体の実際のアクチュエータ部分に組み込むことは本研究期間内には実現しなかったが、これは引き続きタイミングを見て近いうちに導入を試みる。

その代わりにカードをスムーズにインストールできる準備として、新たにデジタルアナログコンバーター、アナログデジタルコンバーターなどを大幅に追加できる拡張ボックスを設計、開発している(図 4)。こちらは当初の計画を超えて進んでいて、KAGRA 本体を用いた試験のみならず、重力波観測まで含めた本格運用までたどり着ける見込みが出てきている。

なお KAGRA 全体への適用については本研究の成果の検証の後、別の予算を申請して進めていく計画であったが、本研究を拡張させる形で、2020 年度から別途基盤 A によって KAGRA への本格組み込みを想定した研究が開始された。本研究の研究代表者は基盤 A 研究の共同研究者となっていて、本研究の成果をベースとして、実際に必要な数の信号を取り扱う目処がつき、2022 年度から始まる 04 (Observation 4) と呼ばれる観測で、より安定化した KAGRA の動作を実現することが期待できる。



図 4: 新規設計の信号入出力のための拡張ボックス。デジタルアナログコンバーター、アナログデジタルコンバーターなどを大幅に追加できる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Akutsu Tomotada, et.al.	4. 巻 91
2. 論文標題 Compact integrated optical sensors and electromagnetic actuators for vibration isolation systems in the gravitational-wave detector KAGRA	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Review of Scientific Instruments	6. 最初と最後の頁 115001 ~ 115001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0022242	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Akutsu T, et.al.	4. 巻 1342
2. 論文標題 The status of KAGRA underground cryogenic gravitational wave telescope	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 012014 ~ 012014
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-6596/1342/1/012014	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Akutsu T, et.al.	4. 巻 37
2. 論文標題 An arm length stabilization system for KAGRA and future gravitational-wave detectors	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Classical and Quantum Gravity	6. 最初と最後の頁 035004 ~ 035004
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6382/ab5c95	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 宮川 治
2. 発表標題 KAGRAの制御とデータ取得システム
3. 学会等名 日本物理学会 第75回年次大会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔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
--	---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------