

音響光学素子を使った衛星補足システムの基礎開発

武者研 赤見 恵

2017年3月10日

1 研究背景

巨大な質量変化に伴って生じる空間の歪みが波として伝搬する物理現象である重力波がある。この重力波を検出する計画として日本では DECIGO (DEci-herz Interferometer Gravitational wave Observatory) 計画が進んでいる。この計画では3台の衛星を宇宙空間に飛ばし、それぞれが一辺 1000 km の正三角形の頂点となるように編隊飛行させる。各衛星間でマイケルソン干渉計を構築することで重力波の検出を行う(図)。ここで、重力波を検出するためのポイントの1つとして、衛星間の距離が一定になることが挙げられる。したがって、そのための衛星間の補足システムが要求される。本研究では、DECIGO に要求される衛星間補足システムの基礎開発を行った。

2 DECIGO に要求される衛星間補足システム

衛星間補足システムは、光通信衛星 OICETS と ALTEMIS による衛星間光通信実験によって確立された。この実験での衛星間補足システムは、レーザーと CCD を使った撮像による補足システムである。一方の衛星からレーザーを CCD で観測し、レーザーの来た方向に受光部中心出射部を向きを変えることで相手の衛星を補足するシステムである。しかし、DECIGO で要求される補足システムはこれとは大きくことなる。DECIGO では、衛星上で重力波検出用レーザーを夾角 60° のラインに固定して出射するため、相手の衛星をこの夾角 60° のライン上にのせるシステムが要求される。したがって、新しく音響光学素子を使った、レーザーと周波数を用いた衛星補足システム

を考案した。この方法では、相手の衛星に周波数情報を用いて、夾角 60° のラインに対してどの程度外れているかを伝えることができるシステムになる。またそれに加え、小型化軽量化、周波数による高精度な位置決定も見込めると考えている。

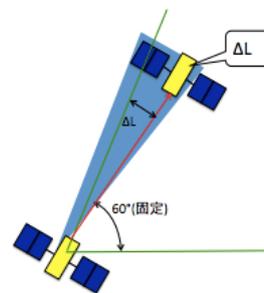


図 1: DECIGO で要求される衛星補足システム

3 音響光学素子を使った衛星間補足システム

音響光学素子からは素子に印加される RF 信号の周波数分だけシフトした 1 次回折光とそのままの周波数である 0 次光が出射される。一次光の回折角 θ は式 (3.1) で示すように印加される超音波の周波数に比例する。

$$\theta = \sin^{-1} \frac{\lambda_0 f_m}{2V} \quad (3.1)$$

λ_0 : 入射光の波長

f_m : 超音波の周波数 V : 超音波速度

故に、超音波の周波数を掃引することによって、1 次光を掃引することができる。これより、衛星が 1 次光を受光しその光から周波数情報を得れば、そこから角度情報、位置情報を得ることができる。しかし、光の周波数を直接検出することはできない。そこで、図のように、

0次光を大きく広げ、1次光と0次光を同時に受光することでビート信号として周波数情報を得ることができる。

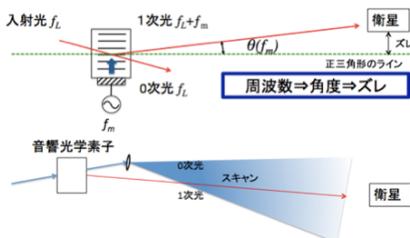


図 2: DECIGO で要求される衛星補足システム

4 音響光学素子の特性

4.1 回折効率

音響光学素子の回折効率 (入射光に対する 1 次回折光の割合) は印可する RF パワーによって大きく作用される。印可する RF パワーが大きくなるにつれて線形的に回折効率は大きくなり、次第に飽和し回折効率は一定の値をとるといった特性がある。この線形的に回折効率が上がる特性を利用し強度変調器として用いられることもある。また回折効率が最大をとるためには RF パワーをある程度大きくする必要がありといえる。

4.2 スキャン分解能

音響光学素子による光学的スキャン分解能は音響光学素子のアパーチャーによる回折広がりによってリミットされてしまう特徴がある。

音響光学素子のアパーチャーの直径を D 、コリメートされたレーザービームのビーム直径を d とした場合、音響光学素子から出射されるレーザービームの拡がり角 $\Delta\phi$ は以下のように表される。この時、 $D = d$ であり最小の拡がり角である。

$$\Delta\phi = \frac{\lambda}{D} \quad (4.1)$$

レーザーの全走査角度が θ_{all} で表された場合、分解される全数 N は以下のように表される。

$$N = \frac{\theta_{all}}{\Delta\phi} = \frac{\theta_{all}D}{\lambda} \quad (4.2)$$

ここで、式 3.1 より全走査角度 θ_{all} は以下のよ

うになる。

$$\theta_{all} = \lambda \cdot \frac{\Delta f_m}{V} \quad (4.3)$$

式 (4.2) と式 (4.3) より、全分解点 N は以下のようになる。

$$N = \Delta f_m \frac{D}{V} \quad (4.4)$$

これより、音響光学素子を用いたレーザー掃引では、アパーチャーの大きさによって光学的な分解能が決定されてしまうことがわかる。つまり、音響光学素子によるレーザースキャンの分解能は、アパーチャーによってリミットされてしまう。既存の製品でも、良くても 1000 プロット程度が限界であるのが現状である。

4.3 空間分解能向上システム

4.2 節で記述したように、音響光学素子を使ったレーザー掃引では光学的空間分解能にリミットがかかってしまう。ここで、空間分解能をさらに向上させるべく周波数を用いた空間分解能向上システムを考案した。

システムの概略図を図 3 に示した。ここで点線のようにレーザーを掃引すると考える。受光強度は赤線で示すように測定される。そこで、受光強度に閾値を儲けることで、カウント周波数は緑線の示すようにカウントされていく。これより、初めて周波数カウントできるレーザー照射位置と最後に周波数カウントできるレーザー照射位置は、レンズの中心に対してそれぞれ対称関係にあると考えることができるため、最初と最後にカウントされる周波数の平均を算出することによって、レーザーがレンズ中心に照射された時にカウントできた周波数を求めることができる。これが可能になれば音響光学素子による光スキャン分解能のリミットによらず、カウントできる周波数の精度をあげることによって光スキャン分解能を向上させることができる。しかし、この方法では、掃引される一次光のパワーが常に一定である絶対条件がある。一次光が掃引に伴いパワーが変化してしまうと、レンズの中心に対称な強度分布を得ることができなくなり、精度が悪くなってしまふ。したがって、スキャンされる 1 次光パワーが常に一定になるような制御システムを構築する必要がある。

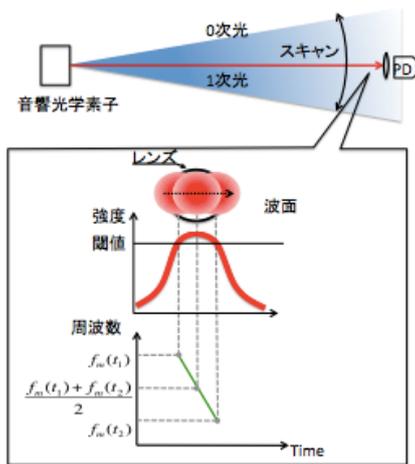


図 3: 周波数を使った空間分解能向上システム

5 基礎開発としての課題

本研究では、考案した音響光学素子を使った衛星間補足システムの基礎開発として、以下のことを検証すべく実験を行った。

1. 空間分解能

どの程度の精度で位置決定することができるか。

2. 周波数カウントの感度

DECIGO 上で機能するために、1000 km 先で周波数カウントできるか。

6 実験セットアップ

実験セットアップの概略を図に示す。 主

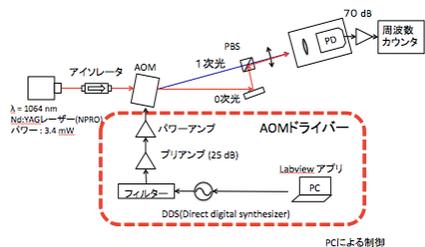


図 4: 実験セットアップの概要

光源として LD 励起モノリシック型 Nd:YAG レーザーを用いた。音響光学素子としては、音響光学変調子 HOYA A-100 を用いた。今回の実験では、0 次光は広げず PBS を使って 1 次光と 0 次光を同軸で受光した。赤点線

で囲まれている部分は AOM ドライバーである。今回は、周波数を 75MHz から 85 MHz の間で周波数掃引の可能な AOM ドライバーを DDS(Direct Digital Synthesizer) と Labview ベースの PC から作成した。DDS はチップとして AD9851 を用いて作成し、PC から周波数情報をデジタル出力する Labview アプリの作成を行った。

7 AOM からの出力結果

作成した AOM ドライバーを用いて出力された、1 次光パワーの結果を以下に示した。

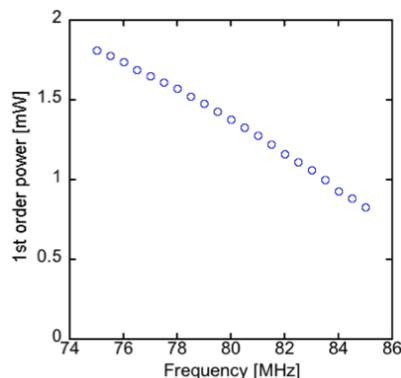


図 5: 1 次光パワーの周波数依存性

印可する周波数の増加に伴い、線形的に 1 次光パワーが減少していく結果が得られた。この状態では、空間分解能向上システムが機能しないため 1 次光が一定になるように制御をかける必要がある。

8 1 次光パワーの制御

一次光パワーの制御として、今回は回折効率の RF パワー依存性を用いる。特定の RF 周波数を印加する際に、特定の RF パワーに制御することによって一次光パワーを制御できる。今回は電圧によって減衰率が変化する可変電圧アッテネータ (VVA) を用いた。DDS から出力される信号を VVA に通すことによって、RF パワーを変化させる。VVA に印加する電圧も、Labview ベースの PC から出力する。この際、DDS から出力している周波数と同期し、電圧出力を行うことで周波数と RF パワーを同時制御することができる AOM ドライバーを構築した。(図 6)

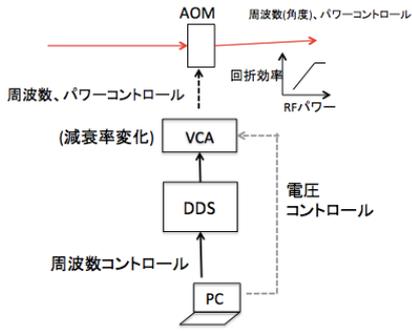


図 6: 1 次光パワー制御のための AOM ドライバー

これより得られた制御結果は図 7 のようになった。

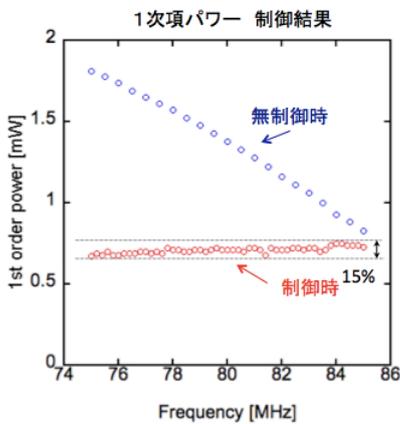


図 7: 1 次光パワー制御結果

制御後は 15% 以内に収まった。しかし、さらに向上させる必要があると考える。また、どの制御レベルまで必要かどうか、実際に空間分解能向上システムを試行して検証するべきであると考えている。

9 周波数カウント感度の検証

周波数カウントの感度は、カウントするビート信号のパワーと S/N 比によって決定される。ビート信号のパワーと S/N 比は、受光されるパワーによって決定される。したがって、周波数カウント感度について、光アッテネータを用いて検証した。1 次光と 0 次光をそれぞれ光りアッテネータを用いて減衰させ、フォトディテクターでの受光パワーを減衰させた。この時の条件として 1 次光と 0 次光の受光パワーが常に等しくなるようにした。この時の、受光パワー、ビート信号のパワー、周波数カウント精

度の関係を図 8 に示した。

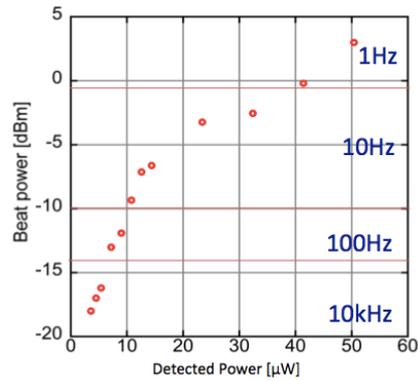


図 8: 周波数カウント感度の推移

当然の様に、受光パワーの減少と共にビート信号のパワーは減少した。また、ビート信号パワー減少に従って、周波数カウント精度が徐々に悪くなっていく結果が得られた。

ここで、得られた結果より受光パワー 7.2 W の時、得られる周波数のカウント精度は 100 Hz であった。これより、受光部のレンズ半径を 1cm、出射光のビーム直径を 60cm とした場合、1000 km 先で 7.2W を受光するために必要な出射パワーは 225 mW と算出された。これは、実現可能な数字であり、この部分ではシステムの実現は可能であるといえる。

10 まとめと展望

本研究では DECIGO のための衛星間補足システムを考案し、その基礎開発を行った。周波数を使った空間分解能向上システムを機能させるために、AOM からの 1 次光パワーの制御をおこなった。制御結果は、掃引周波数 75 MHz 85 MHz の間で 15% に収まった。また、周波数カウント感度として、1000 km 先でカウント精度 100 Hz を得るために必要な、出射パワーを見積もった。その結果、必要な出射パワーは 225 mW となった。これは現実的な数字であり、この部分ではシステムは機能すると言えるだろう。

今後の展望は、周波数カウント、位置決定による空間分解能向上システムの評価を行いたい。また、アパーチャの大きい AOD(音響光学偏向子)を用いた実験を行いたい。