

音響光学偏向子を用いた人工衛星位置決定システム

武者研 赤見 恵

2019年3月7日

1 研究背景

重力波は、A.Einstein の一般相対性理論によって予言された光速で伝搬する時空の歪みである。重力波は物質との相互作用が非常に弱いため検出が困難である現象であるが、2015年9月にアメリカの LIGO(Advanced Laser Interferometer Gravitaitonal Wave Observatory) で初の直接検出が成功し注目を浴びた [1]。重力波の直接検出は世界各国で取り組まれており、日本でも大型低温重力波望遠鏡 KAGRA が運転を開始している [2]。日本では KAGRA とは別に、重力波検出計画として DECIGO(DECi-hertz Interferometer Gravitational wave Observatory) が計画されている [3]。DCEIGO は、KAGRA では検出できない低周波域の重力波検出ができ、2030 年代の運用開始を目標にしている。低周波域の重力波には、初期宇宙を起源とした背景重力波があると期待されている。DECIGO では 3 台の衛星を宇宙空間に飛ばし、それぞれを一辺 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。したがって、衛星打ち上げ後に、3 台の衛星で正三角形を作ること、また正三角形が崩れた場合に位置補正するシステムが必要になる。このために本研究では、光を用いた衛星位置決定システムの開発を行った。

2 DECIGO に要求される位置決定システム

DECIGO は、大まかな位置に打ち上げられた後の初期配置と、実際に重力波を検出するための精密な正三角形の構成と維持を行

う必要がある。したがって、それに伴い、初期配置を十分に行える捕捉帯域を持っており、かつ精密な位置決定 (要求角度精度 0.5 mrad 程度) が必要となる。また、人工衛星によって正三角形を構築するためには理想とする正三角形の夾角 60° のライン上から自衛星がどの程度ずれているか $\Delta\theta$ を取得し、修正するシステムが要求される。現在実証されている衛星間の位置決定技術は光通信衛星 OICETS と ALTEMIS による衛星間光通信実験によって確立されている。この実験での衛星間補正システムは、レーザーと CCD を使った撮像による補正システムである。[4] 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正するシステムである。したがって、DECIGO で要求される位置決定システムとは大きく異なる。そこで、私は新しく音響光学偏向子を使った、レーザーと周波数を用いた衛星位置決定システムを考案した。

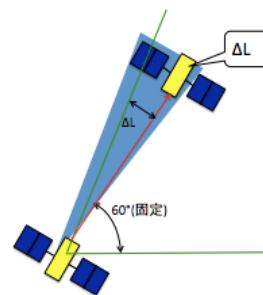


図 1: DECIGO で要求される衛星位置決定システム

3 音響光学偏向子 (Acousto-optic Deflector:AOD) を用いた位置決定システム原理

音響光学偏向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、ローカル光として 0 次光などを大きく広げ、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。

しかし、実際にこの系で実験を行なった結果、大きく広げることによってローカル光の強度が低下し、得られるビート信号の S/N 比が低く得られてしまった。そこで、1 次回折光の中にローカル光を同軸に混ぜることによって S/N 比を高く取得できる光学系を考案し、実験を行なった。

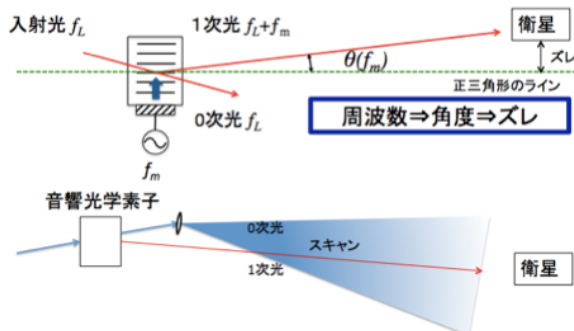


図 2: 考案した AOD を用いた位置決定システムの原理

4 AOD を二台用いた衛星位置決定システム光学系

周波数 f_L のレーザーを偏光ビームスプリッター (PBS) に入射し、透過した光は AOD1 に入射し、周波数 $f_L + f_m$ の 1 次回折光が出力される。この光をシグナル光とする。AOD1 と同じ発振器で駆動している AOD2 を周波数シフターとして使いローカル光を作製する。PBS によって反射した S 偏光の光は AOD2 と凹面鏡とで構成されたダブルパス構造によってポイントをずらすことなく $2f_m$ の周波数シフトを受ける。この光をローカル光として用いる。そして、図の用に $\lambda/4$ 板をダブルパス中に 2 回通すことによって P 偏光にし PBS を透過させる。同様にミラーを用いて $\lambda/4$ 板 2 回通し、シグナル光とローカル光を同軸に重ね合わせて AOD1 に入射させる。これによって、AOD1 からの 1 次回折光は、シグナル光とローカル光の周波数がそれぞれ $f_L + f_m$ と $f_L + 3f_m$ となるため、この 2 光をフォトディテクターで受光することで差周波数の $2f_m$ が検出される。

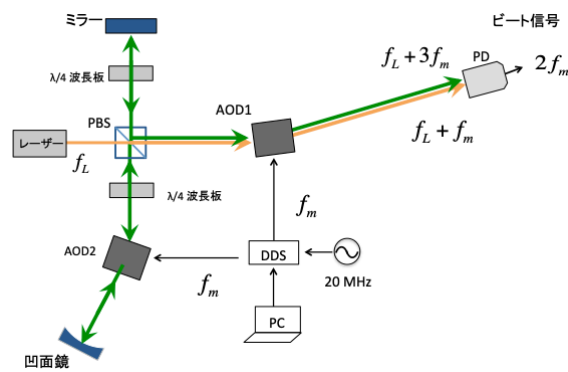


図 3: ローカル光を同軸出射させる光学系の概略図

5 本システムの分解能

本システムの分解能は以下の 2 つの要因によって決定される。

- ・周波数カウント精度 (カウント周波数の正確に決定可能な桁数)
- ・光学的分解能

周波数情報が直接情報になるため、周波数カウンタ精度が高いほど (周波数を正確に決定できる桁が多い) 精密な位置決定システムとなる。特に、キャリア周波数 160MHz で考えた場合、4 桁までの正確に測れれば 0.1mrad、7 桁まで測れれば 0.1 μ rad と大きく影響する。そしてもう 1 つは、光学的分解能である。これは、受光部を 1 次回折光が横切る場合、光学的に分離できない場合は常に受光され周波数カウントが行われる。これによって、受光部が特定の位置の時ある程度幅を持った周波数カウント結果が得られ、これは光学的分解能に相当し、光学的にリミットされる。したがって、受光部中心と波面中心が重なった時の中心周波数を精度よく決定することができない。

本研究では、周波数カウンタ精度がどのように決定されるか実験によって検証を行なった。

周波数カウンタ精度の決定要因として考えられるのは以下の 3 つである。

- ・ 受光強度
- ・ 受光時間
- ・ カウンタ手法 (主にゲートタイム)

受光強度と受光時間の周波数カウンタ精度への影響を実験によって調査した。以下に示す。

6 受光強度と周波数カウンタ精度

光アッテネータによって、受光強度を低下させその時の受光強度と周波数カウンタが正確に行えた桁数を以下に示す。

表 1: 受光強度と周波数カウンタ精度

受光強度	周波数カウンタ可能な桁数
40 W	8 桁
10 W	7 桁
7 W	6 桁
4 W	4 桁

受光強度の低下とともにビート信号の S/N 比が低下するため、カウンタ精度が落ちる結果となった。周波数カウンタ精度は受光強度によって段階的に落ち、10kHz の周波数カウンタ精度を得るためには少なくとも 4 μ W 以上受光

する必要があることがわかった。これによって、1000km 遠方で走査範囲 1km を 1m の分解能で位置決定を行うための、必要出射強度は約 400 mW と低パワーで実現できることを確認した

7 受光時間と周波数カウンタ精度

受光強度と周波数カウンタ精度の関係は以下のような実験系によって検証を行なった。AOD への印加周波数を高速掃引し、得られ

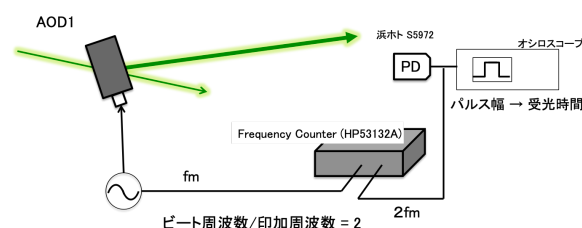


図 4: 受光時間と周波数カウンタ精度の検証のための光学系

たビート信号と印加周波数の比を周波数カウンタ HP53132A を用いて測定した。今回は、データ収録速度を考慮し、目視によって結果を確認した。また、受光時間は得られる DC 電圧のパルス幅を元に計測した。今回の周波数カウンタはゲートタイム 1ms, 無掃引時で 7 桁の精度を確認している。受光時間と周波数カウンタの関係性を検証した結果を示す。

表 2: 受光時間と周波数カウンタ精度

受光時間	周波数カウンタ可能な桁数
50 ms 以上	7 桁
50 ms 以下	カウンタ不可能

結果は、周波数カウンタするために少なくとも 50ms 以上の受光時間が必要であることがわかった。また、この時の周波数カウンタ精度は受光時間によって劣化は見られなかった。今回用いた周波数カウンタ hp53132A は最短のゲートタイムが 10ms であったが、周波数カウンタにはゲートタイム以上の受光時間が必要であることがわかった。Labview による取り込みが遅かったため (およそ 100ms まで)、デジタルパネルの目視によって確認したため、実

際に周波数カウントするためにはより短い時間である可能性は十分ある。また、50ms までは周波数カウント精度の劣化は見られなかったが、より早くカウント結果を取り込むことで受光時間短縮による周波数カウントの影響を見ることができるだろう。

周波数カウントを行うための受光時間は少なくとも 50ms で、この時の周波数カウント精度は劣化しなかったことを踏まえると、1 掃引幅 1km で 1m の分解能で位置決定するためには少なくとも 1m あたり 50ms かける必要があるため、1km の掃引に 50 秒かかることがわかった。より早く位置決定を行うためには、周波数カウンタによって取り込める時間を高速化していく必要がある。

8 周波数平均化による中心周波数の高精度測定

先ほど述べ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分解能によって分解能に制限がかかってしまう。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以下に示した。ここで点線の様に常に一定のパワーの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レンズ中心をピークに左右対称に測定される。閾値を設け、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中心周波数を精度よく求めることができる。したがって、カウントできる周波数の精度をあげることによって音響光学素子による角度分解能以上の角度分解能を得る事ができる。しかし、周波数掃引に伴い 1 次回折光のパワーが変化してしまうため、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う。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制御システムを構築する必要がある。

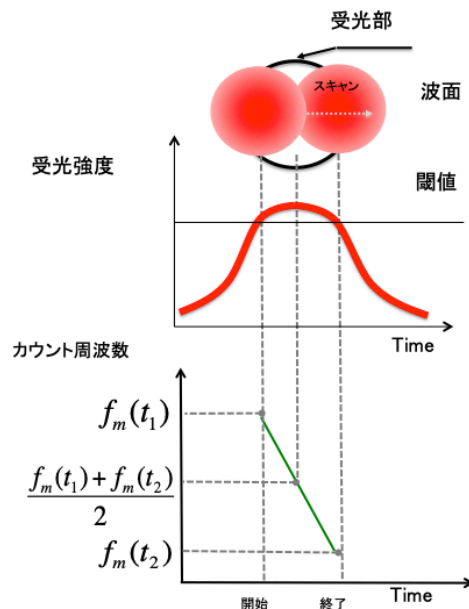


図 5: 平均化による分解能向上システム

9 周波数的位置分解能と角度分解の測定と評価

本システムの分解能を測定した。測定方法は以下の図に示すように行なった。

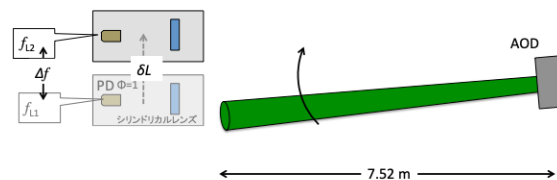


図 6: 分解能測定のための実験系

受光部初期位置で測定される中心周波数を測定し、 ΔL だけ精密ステージによって受光部をレーザー掃引方向に移動させた後に測定される中心周波数を測定し、それらの差を算出した。これは、 ΔL の移動によって生じる周波数カウント差であり、この差を複数回 ($n=10$) とりそのデータの標準偏差を本システムの分解能として測定を行なった。結果は以下のようになった。移動距離 3mm, 3.5mm の場合どちらもほぼ同程度の分解能であり、周波数的な位置分解能は 0.024 MHz, 位置分解能 (@7.52m) は 0.15 mm となった。これから、角度分解能を算出すると 0.019 mrad となり、要求値 0.5 mrad を大幅に満たしていることを確認した。

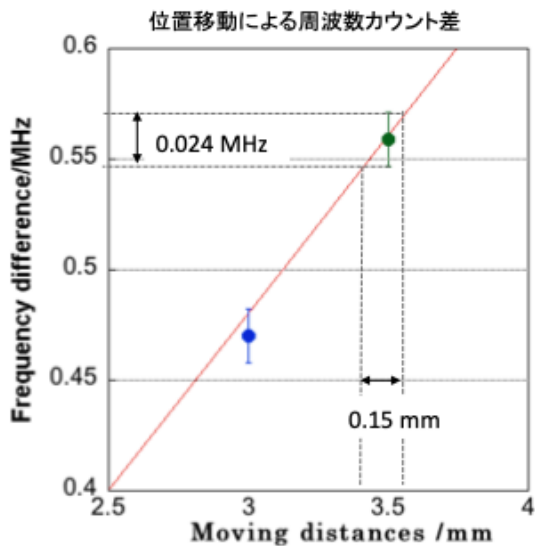


図 7: 分解能測定結果

しかし、今回の測定条件では 7 桁 (100Hz) ま
で測定できるのに対して、周波数的な位置分解
能は 5 桁 (10kHz) であり、劣化が起こってい
ることがわかる。これは、受光強度の揺らぎに
よって閾値が正しく決められず、それによっ
て中心周波数の決定精度が劣化してしまってい
ることに原因がると考えた。そこで、受光強度
の安定化を図るために出射強度の安定化を行
なった。

10 1 次回折光強度安定化による分解 能向上

制御方法を以下に示す。1 次回折光の出射
強度は、印加する RF パワーを制御すること
で回折効率を変化させ制御することが可能で
ある。アクチュエータは Voltage Control At-
tenuator(VCA) を用いる。VCA は電圧によっ
て RF 信号の減衰率を変えられるデバイスで
ある。図 8 に示す様に、1 次回折光を BS に
よって 10 %程度切り出し、周波数掃引によっ
て角度変化があるため比較的広い口径のフォ
トディテクタを用いて掃引範囲で常に受光さ
れる様にした

図 9 に制御前後の PD での受光強度の変化
を示す。制御前は、AOD,AOM での印加周波
数による回折効率の変化によって、大きく強
度が揺らいでいるが、安定化することによっ

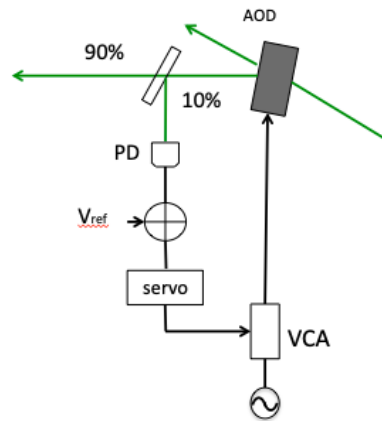


図 8: 1 次回折光強度安定化概略図

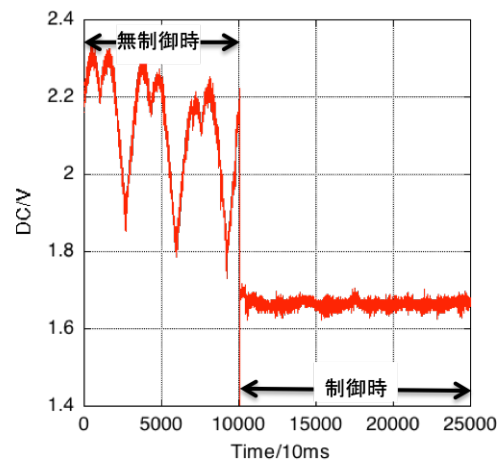


図 9: 制御による受光強度の変化

一定の値に安定化することができている。ま
た、図 10 に制御前後の相対強度雑音を示した。
制御前を赤で示しており、制御後を緑で示し
ている。周波数カウントに影響にある低周波
(10Hz 以下) での雑音は 2 桁程度抑圧するこ
うができた。しかし、これによる分解能向上は
見られなかった。この原因は受光方法による
ものであると考えられる。強度安定化の場合、
凸レンズによって 1 次回折光のすべての光に
よって安定化したのに対し、リモートエンドで
シリンダリカルレンズによって受光したこと
で 1 次回折光の一部しか受光できていない。
これは、もしパワーの空間分布があった場合受
光強度の揺らぎとして出てくることが考えら
れます。

リモートエンドでの受光を凸レンズで行い

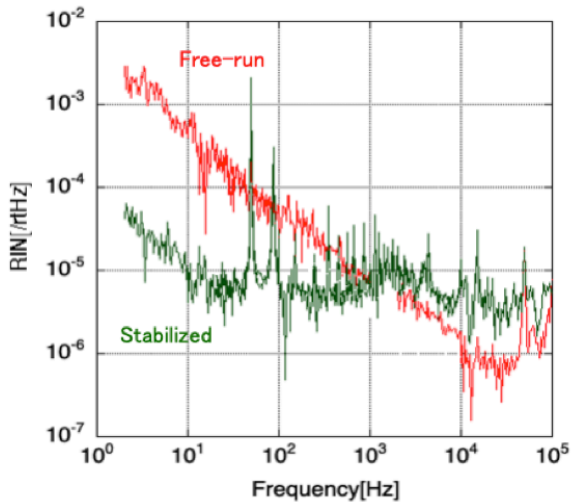


図 10: 制御前後の相対強度雑音

すべての光を受光して、同様に相対強度雑音を測定した。赤で示されている線が、凸レンズに

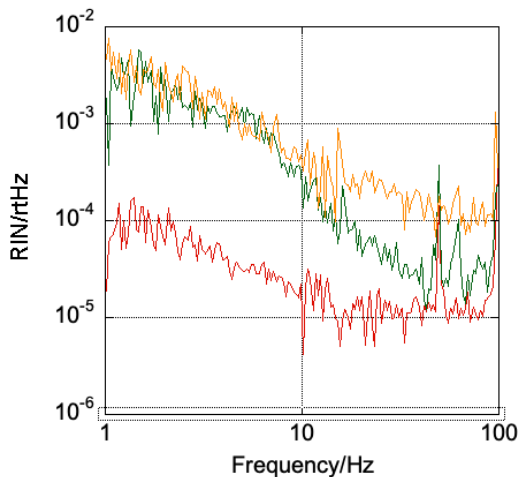


図 11: すべての光を受光した場合と一部の光を受光した場合の相対強度変化

よる相対強度雑音で、すべてを受光した場合は出射直後で得られた相対強度雑音と近く、安定化されている。緑で示す線はシリンドリカルレンズを用いた場合で、一部の光を受光した場合の結果であり、低周波になるにつれて無制御時の相対強度雑音と同じレベルになることがわかる。このことから、安定化によって受光強度が安定にならなかった原因は、出射光の一部の光を受光していることでパワーの空間分布によって受光強度が揺らいでいることであると結論付けた。空間分布は大気揺らぎ等が原因

ではないかと推測される。

11 まとめと展望

音響光学偏向子による 1 次回折光の回折角度と光周波数の特性を用いた人工衛星位置決定システムの考案と実証実験を行なった。本システムでは、周波数カウント精度が直接位置決定精度になるため、受光強度、受光時間による周波数カウント精度に対する影響を調査した。受光強度を低下させると共に周波数カウント精度は劣化することがわかった。また、受光時間は周波数カウントすること自体に 50ms が必要であり、少なくとも 50ms 受光時間があれば周波数カウント精度は受光時間によって劣化しないことがわかった (周波数カウンタ hp53132A, ゲートタイム:1ms)。また、構築した位置決定システムの周波数的な位置分解能は 0.024 MHz となった。これは角度分解能 0.019 mrad に相当し、要求値 0.5 mrad を十分に満たした。しかし、設定に対して分解能の精度が低く、これを受光強度の雑音による中心周波数の決定精度の劣化と判断した。これを解決するために、1 次回折光の強度安定化を図ることで分解能の向上を目指した。強度安定化を図り、周波数カウントに影響のある低周波の強度揺らぎを 2 桁程度抑圧したものの、分解能の向上は見られなかった。その原因は、リモートエンドでの受光時安定化された光の一部を受光するため、ビームの空間分布の揺らぎによって受光強度の揺らぎが生じてしまっていると考えられる。さらなる分解能向上のためには受光強度の揺らぎの原因を調査しなければならない。

12 参考文献

- [1] B. P. Abbott, et. al., Phys. Rev. Lett. 116(2016) 06112
- [2] Y.Aso, et. al., Phys. Rev. D 88(2013) 043007
- [3] N.Seto, S.Kawamura, T.Nakamura, Phys. Rev. Lett. 87(2011) 221103
- [4] 高山佳久, 豊嶋守生, 竹中秀樹, 門脇直人, 電子情報通信学会論文誌 B J94-B(2011) 1443