

Alignment Free干渉計の開発

東浦, 孝典 / HIGASHIURA, Kosuke

(出版者 / Publisher)

法政大学大学院理工学・工学研究科

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

法政大学大学院紀要. 理工学・工学研究科編 / 法政大学大学院紀要. 理工学・工学研究科編

(巻 / Volume)

55

(開始ページ / Start Page)

1

(終了ページ / End Page)

4

(発行年 / Year)

2014-03-24

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00010329>

Alignment Free 干渉計の開発

DEVELOPMENT OF ALIGNMENT FREE INTERFEROMETER

東浦孝典

Kosuke HIGASHIURA

指導教員 佐藤修一

法政大学大学院工学研究科システム工学専攻

This research is on the laser interferometer system dedicated for the DECIGO which is a space gravitational wave telescope. We developed a displacement sensor using a laser interferometer to measure the position of the Cavity-mirror. However, when the Cavity-mirror tilts, the Michelson interferometer does not work because the outgoing and returning beam path do not overlap, so the contrast will decrease. So we developed an interferometer which can keep high contrast, even if the END-mirror is miss aligned. This system does not need alignment of END-mirror, so we call it Alignment Free Interferometer(AFI). The optical system is realized by using a retro reflector. Since it realized by changing polarization state, we used the Mueller matrix for the analysis of polarization state.

key words: Gravitational wave ,Interferometer,Mueller matrix,Corner-cube ,polarization

1 重力波と DECIGO

重力波はアインシュタインの一般相対性理論の帰結として予言される光速で伝播する時空の歪みである。1974 年に Hulse と Taylor が連星パルサー PSR1913 の公転周期が減少していることを発見し、重力波をエネルギーとして放出することが証明されているが、2014 年 2 月現在いまだ直接観測はなされていない。重力波は極めて透過性が強く、例えば初期宇宙の状態を調べるのに有力視されているが、一方でその直接検出は困難である。その検出方法としては共振型検出器や干渉計型検出器などがあるが本研究は後者に関するものである。現在国内では神岡鉱山にて大型低温重力波望遠鏡 KAGRA (LCGT) の建設が進められている。検出器に用いられるレーザー干渉計の基線長は 3km で、鏡の冷却、低い地面振動、超高真空により重力波の初検出を目指している。その次世代計画として DECIGO 計画が進行中である。これは宇宙空間にて、3 基のドラッグフリー衛星をフォーメーションフライトさせ基線長が 1000km のレーザー干渉計を構築し、0.1~1Hz の重力波を狙うものである。DECIGO 以外の宇宙重力波望遠鏡として ESA が中心となり LISA 計画を進行中であ

る。両者は光共振器 (Cavity) を構築するか否かという点で仕様が大きく異なる。DECIGO を実行するに当たり、多くの技術的課題が残されている。その技術検証実験衛星として DECIGO-Pathfinder(DPF) が、数年後の打ち上げを目指し研究が進められている。[1]

2 Alignment Free の必要性

DECIGO の Cavity ミラー (CM) は重力波検出の特性上、自由質点でなければならない。そのため衛星は CM との相対位置を保ちながらフライトすることで CM を非接触保持し自由質点化を実現する。これをドラッグフリー制御と呼ぶ。そのためには CM の位置を計測するローカルセンサの精度向上が不可欠である。現在その候補には静電センサ (アクチュエータ) 型、フォトセンサ型などが挙げられるが双方とも感度は $10^{-9}(m/rHz)$ 程度である。それらの代替案として 5~6 桁の感度向上が期待できるレーザー干渉計の利用を考えるべきである。しかしレーザー干渉計はミラーの回転における自由度が低いというデメリットが存在する。これは以下の図 1 に示す通り、CM が初期起動時に干渉計のダイナミックレンジを超える傾きを持っている、もしくは

何らかの理由で大きな加速度が加わるといった場合に、干渉計感度の低下さらには *CM* の位置情報を失う危険性を示唆する．そこで、干渉計ミラーをミスアライメントにしても感度を落とすことのない、つまりミラーのアライメントを必要としない *AlignmentFree* 干渉計 (*AFI*) の開発を実施した.[2]

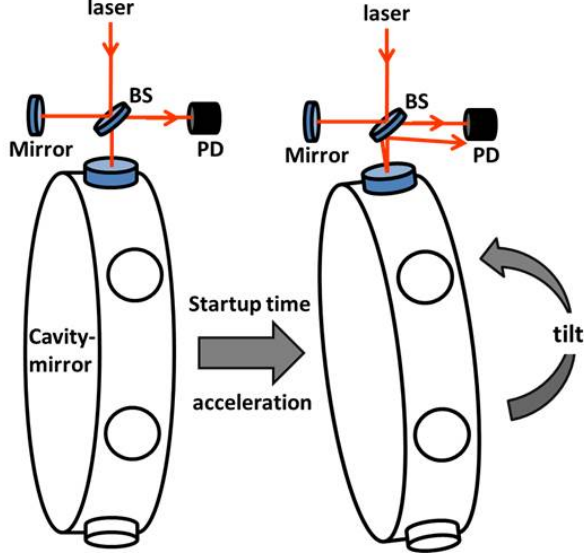


図 1: Cavity-mirror の傾きによるミスアライメント. Michelson 干渉計を用いた場合、図中左側の状態では計測可能であるが、図中右側のように CM が傾けばそれはすなわち干渉計のミスアライメントを意味する．

3 Alignment Free Array

入射ビームの方向を 180 折り返し反射する素子を再帰反射器（レトロリフレクター）と呼ぶ．再帰反射器の例として Corner-Cube reflector (CCR) を用いて図 2 に示すように、光学素子を配置した場合を考える．ただし sub-mirror の反射面は入射ビームに対して垂直にアライメントがとられている．この時 CCR が傾いたとしても往復光路は一致する．

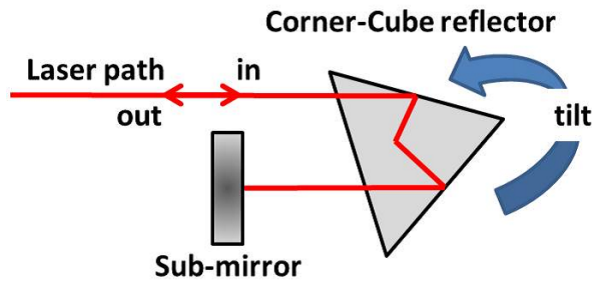


図 2: AFI の基本原理. Sub-mirror の反射面が入射光パスに対して垂直にアライメントがとられているとき、図のように CCR がミスアライメントであっても往復光路は必ず一致する

しかしこのままでは CCR を CM に実装することになるが、それは工作技術的にまたその他の重力波検出の技術的要求から考えにくい．しかし平面鏡に自由度を与えられればより現実的になる．したがって PBS, 波長板, CCR を組み合わせることで平面ミラーに自由度を持たせることができる光学設計を考案した．[3],[4],[5],[6]

4 Mueller 行列による偏光の追跡

AFI はビームの偏光状態を幾度か一時的に変換することで実現されるため、その偏光状態の推移を考えなければならない．また干渉計を構築した際、両腕から結合されるビームの偏光は一致する必要がある．その解析に Mueller 行列を用いた．これは偏光状態を記述する Stokes ベクトルと対で用いられる．Stokes ベクトルのパラメータは以下の式 1 であり、一行目から、全体の強度、直行成分の強度差、 $\pm 45^\circ$ 成分の強度差、右回り/左回り円偏光の強度差をそれぞれ示している．

$$S = \begin{pmatrix} E_x E_x^* + E_y E_y^* \\ E_x E_x^* - E_y E_y^* \\ E_x E_y^* + E_y E_x^* \\ j(E_x E_y^* - E_y E_x^*) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S'_0 \\ S'_1 \\ S'_2 \\ S'_3 \end{pmatrix} \quad (1)$$

ここである偏光素子に、入射するビームを S 、その透過ビームを S' とすると、式 2 の 4×4 の変換行列が Mueller 行列であり、すでにほとんどの光学素子が Mueller 行列化されている．

$$\begin{pmatrix} S'_0 \\ S'_1 \\ S'_2 \\ S'_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m_{00} & m_{01} & m_{02} & m_{03} \\ m_{10} & m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{20} & m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{30} & m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix} \quad (2)$$

AFI を構築する光学素子の各 Mueller 行列は PBS 透過 $= M_T$ 、PBS 反射 $= M_R$ 、QWP $= M_{QWP}$ 、ミラーでの反射 $= M_{ref}$ とするとそれぞれ以下の式 (3)～(6) で与えられる．

$$M_T = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} T_s + T_p & T_s - T_p & 0 & 0 \\ T_s + T_p & T_s - T_p & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2\sqrt{T_s T_p} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2\sqrt{T_s T_p} \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$M_R = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} R_s + R_p & R_s - R_p & 0 & 0 \\ R_s + R_p & R_s - R_p & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2\sqrt{R_s R_p} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2\sqrt{R_s R_p} \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$M_{ref} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} \quad (5)$$

$$M_{QWP} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos^2 2\theta & \sin 2\theta \cos 2\theta & \sin 2\theta \\ 0 & \sin 2\theta \cos 2\theta & \sin^2 2\theta & -\cos 2\theta \\ 0 & -\sin 2\theta & \cos 2\theta & 0 \end{pmatrix} \quad (6)$$

以上より AFI の Muller 行列は以下の式 (7) で与えられる．このとき CCR も偏光に寄与するが入射角度、反射面の組み合わせによって一意に Mueller 行列が求まらないので注意が必要である．

$$M_{AFI} = M_t M_{QWP} M_{ref} M_{QWP} M_R M_{CCR} M_R M_{QWP} M_{ref} M_{QWP} M_T M_{ref} M_T M_{QWP} M_{ref} M_{QWP} M_R M_{CCR} M_R M_{QWP} M_{ref} M_{QWP} M_T \quad (7)$$

ここで重要なのは式で記述されるパスを通ったビームのみ AFI の機能が得られるという点である．これに p 偏光を示す Stokes ベクトル

$$S = \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (8)$$

を作用させるとその解 S' は

$$S' = I_0 \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (9)$$

となる．よって AFI からの出射ビームは p 偏光であることがわかる．ここで I_0 はミラーの反射率と PBS の仕様さらに CCR での偏光の回転度合によって変化する、ビーム強度に関する係数である．[3][6][7][8][9]

5 Contrast

Michelson 干渉計と AFI において END-mirror を回転させることによりコントラストがどのように減衰するかを計測し比較した (図 5)．Michelson に比べ AFI はミスアライメント時でも高いコントラストを維持していることがわかる一方で、Michelson 干渉計のコントラストが 99.6 % であったのに対し、AFI では 98.3 % となり感度の悪化が示唆される結果となった．

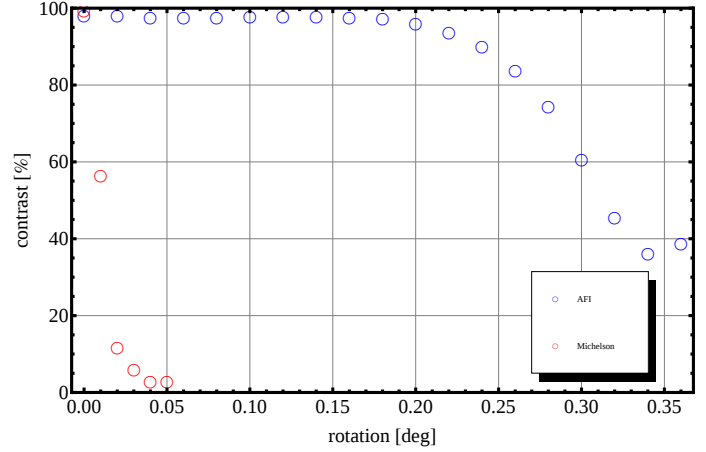


図 3: Michelson と AFI の Contrast の比較

6 AFI の感度

Cavity-mirror のローカルセンサとして干渉計を用いる理由はその他の候補に挙がるセンサに比べ高い感度が期待できるためである．したがって AFI にも Michelson 干渉計と同程度の感度が要求される．AFI の感度を取得し Michelson 型干渉計の感度と比較した．その結果が以下の図 4 に示すものである．

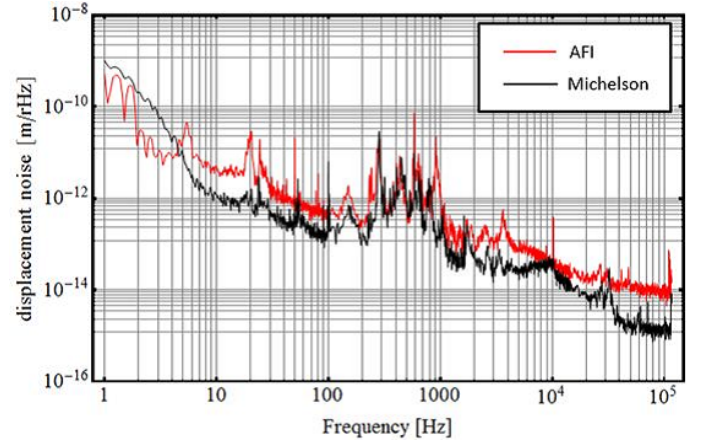


図 4: AFI の感度

AFI は Michelson 干渉計に比べ感度が悪い結果が得られた、これは Michelson 干渉計に比べコントラスト低いため S/N 比が悪くなったことによるものだと考えられる．

7 今後の展開

フリースペースでの実験をさらに進め shotnoise レベルまでの感度を実現する。さらにモノリシックと呼ばれる、クリアセラム上に光学素子を接着したものを製作する。これにより各素子が同一の系に閉じ込められることでノイズの低減ならびに小型化を実現する。

8 参考文献

参考文献

- [1] 安東正樹, "Fabry-Perot 型レーザー干渉計重力波検出器の制御", 東京大学理学系研究科物理学専攻修士論文 (1996)
- [2] 高城毅, "宇宙空間レーザー干渉計重力波検出器の可能性", 東京大学理学系研究科物理学専攻修士論文 (2003)
- [3] Eugene Hecht / Alfred Zajac, "OPTICS", Wesley Publishing Company (1979)
- [4] Fabian E. Pena-Arellano and Clive C. Speake, "Mirror tilt immunity interferometry with a cat's eye retroreflector", Vol.50, No.7/applied optics (2011)
- [5] J. J. Snyder, "Paraxial ray analysis of a Cat's eye retroreflector", Vol.14, No.8/applied optics (1975)
- [6] Russell A. Chipman, "Mueller Matrices", College of Optical Sciences University of Arizona (2010)
- [7] 谷隆一, "偏光", 関西学院大学研究業書第81編
- [8] Ralph Kalibjian, "Stokes polarization vector and Mueller matrix for a corner-cube reflector", Optics Communications 240 (2004) 39-68
- [9] S. E. Segre, V. Zanza, "Mueller calculus of polarization change in the cube-corner retroreflector", Optical Society of America (2003)