

LCGT Suspension 概念設計

三代木伸二
東京大学宇宙線研究所

平成 14 年 5 月 1 日

目次

1	感度目標の設定	2
2	神岡の地面振動	2
3	主鏡防振系と制御	2
3.1	主鏡防振系	2
3.1.1	振り子のみで構成	2
3.1.2	補助干渉計付き	2
3.1.3	制御 (アクチュエーター効率)	3
4	Heat Link 防振系	4
4.1	Heat Link ワイヤーへの制限	4
4.2	防振系	4
4.2.1	振り子のみで構成	4
4.2.2	補助干渉計つき	5
4.3	Heat Link ワイヤーの熱雑音	5
5	とりあえずのまとめ	5

1 感度目標の設定

10Hz 以下の感度目標値の設定は、防振装置の構造（振り子の段数、補助干渉計の有無や構造）や制御性（ダンピング、アクチュエーター効率や配置）に大きな影響をおよぼす。LCGT のデフォルトの感度目標は、資料「LCGT の目標感度 ver.2」にあるように、3Hz で $2 \times 10^{-18} \text{ [m}/\sqrt{\text{Hz}}]$ のレベルで Radiation Pressure Noise と交差することになっているが、資料「LCGTvariation.pdf」では、10Hz 以下の急峻な傾きを持つ形の感度の SN への寄与は、Binary-NS の total mass が $10^2 M_{\odot}$ 以下ではほとんどないこともしめされているので、検出目標とする重力波源と防振装置の実現性のバランスを考えることは重要である。また、鏡やより上流の質点に制御を行うかぎり、そこから（電気系の雑音） \times （振り子の伝達関数）の雑音が混入することは不可避で、制御系の雑音レベルと振り子だけを考えた “生の” 防振レベルとの関係も考慮する必要がある。補助干渉計を併用する場合は、そのレーザーの周波数雑音や Shot 雑音も考慮する必要がある。

2 神岡の地面振動

LCGT は神岡鉱山内に設置される。その地面振動レベルは、3 Hz で $10^{-10} \text{ [m}/\sqrt{\text{Hz}}]$ 、10 Hz で $3 \times 10^{-11} \text{ [m}/\sqrt{\text{Hz}}]$ 、100 Hz で $2 \times 10^{-12} \text{ [m}/\sqrt{\text{Hz}}]$ である。

3 主鏡防振系と制御

3.1 主鏡防振系

3.1.1 振り子のみで構成

必要な防振比は、地面振動が 3[Hz] で $10^{-10} \text{ [m}/\sqrt{\text{Hz}}]$ 、目標感度は $2 \times 10^{-18} \text{ [m}/\sqrt{\text{Hz}}]$ なので、4 枚の鏡の和を考えると、一枚鏡では 10^{-8} が必要。例えば、これは、振り子だけで考えると、8 段振り子（1Hz 共振）や、1 段振り子（0.05Hz 共振） \times 5 段振り子（1Hz 共振） 2 段振り子（0.05Hz 共振） \times 1 段振り子（1Hz 共振）になる。当然、縦防振は、水平に対し 1-2 段分少ない数だけ入れなければならない。ちなみに Advanced LIGO で提案されているのは、1 段振り子（Inverted Pendulum + GAS） \times 5 段振り子であり、オーストラリアグループが提案しているのも同等な構造をしている。

3.1.2 補助干渉計付き

ここでいう補助干渉計とは、十分防振された参照鏡と、鏡に置き換えられた主鏡防振装置の上段質点とで Fabry-Perot 共振器、あるいは、Michelson 干渉計を構成し、安定化されたレーザー光を媒介として、上段質点の振動レベルをループゲイン分の 1 までアクティブに低減する方法のことを想定している¹。他に、両腕において Upper Mass 同士でも FP 共振器を構成する方法もある²。メリットは、理想的には、振り子の段数を、ループゲインを大きくとればとるほど多く減らせることと、アクチュエーター雑音も同時に減らせることである。例えば、鏡の直上質点（ M_{up1} ）

¹ 森脇さんの案。

² この方法では、懸架装置の構造的対称性による Common mode rejection と同じレーザーによって両腕の Upper Mass FP 共振器が制御されることによる Upper mass 間の同相変位による Common mode rejection の二つが地面振動の低減に貢献する。麻生君の実験など。

に制御をかけ、ゲインが 500 程度あれば、1 段振り子 (0.05Hz 共振) × 2 段振り子 (1Hz 共振) で可能になる。ちなみに、1 段振り子 (0.05Hz 共振) × 2 段振り子 (1Hz 共振) の場合の各部の振動レベルは、

- Ground → 1×10^{-10} [m/√Hz] @ 3 Hz
- $M_{Inv.Pend}$ → 3×10^{-14} [m/√Hz]
- M_{up1} → 1×10^{-17} [m/√Hz]
- 鏡 → 1×10^{-18} [m/√Hz]

となる。ただし、常温部での姿勢制御等を考えると、2 段よりは 3 段のほうがよいかもしれない。また、 M_{up1} への制御ゲインが 10^5 程度あれば、3 段振り子 (1Hz 共振) でも可能である。高いゲインをとるには、 M_{up1} への制御のみでは不可能なので、補助干渉計に高周波を受け持つアクチュエーターが必要 (EOM など) になり、クロス周波数は 1 kHz 以上が望ましい。

ただ、補助干渉計を使う場合、結局レーザーを使用するので、3 Hz で 10^{-17} [m/√Hz] 相当の周波数雑音や Shot 雑音を出せないと、 M_{up1} より上流で制御する必要がでてくる。

3.1.3 制御 (アクチュエーター効率)

LISM より、追従すべき DC ドリフトは 10^{-5} m 程度あると見積もられる。一方、電気回路雑音の下限を 3×10^{-9} V/√Hz@10[Hz] とすると、例えば、1 段振り子 (0.05Hz 共振) × 5 段振り子 (1Hz 共振) の振り子のみで構成する防振装置の場合の各段へのアクチュエーター効率の上限は、

- 鏡 → 3×10^{-9} [m/V]
- M_{up1} → 3×10^{-8} [m/V]
- M_{up2} → 3×10^{-7} [m/V]
- M_{up3} → 3×10^{-6} [m/V]
- M_{up4} → 3×10^{-5} [m/V]
- $M_{Inv.Pend}$ → 1×10^{-1} [m/V]

となり³、振動の周波数領域別 RMS 値を考慮した上で、各段への制御帯域のふりわけが必要となる。

一方、補助干渉計がある場合、制御を受ける質点へのアクチュエーターの電気雑音もひっくり返って防振制御がなされる。1 段振り子 (0.05Hz 共振) × 2 段振り子 (1Hz 共振) の場合、 M_{up1} への制御からかかる電気雑音の M_{up1} への影響の周波数依存性は f^{-2} であり、この雑音が振り子の伝達関数と地面振動だけを考えて場合の防振性能 $f^{-5\sim 6}$ を上回っているが、ループゲインを適切に選び、3 Hz 以上で M_{up1} の振動レベルが 1×10^{-17} [m/√Hz] をこえないように設計すれば (今は 500@3 Hz とする)、最終の鏡の振り子の防振を考慮することで、3-100 Hz において目標感度とおなじくらいになるので、結局 3×10^{-15} [m/√Hz] @ 3 Hz からアクチュエーター効率の上限を求めてもよく、それは $\sim 10^{-5}$ [m/V] 程度となる。

³ 導出の式は $H_{Couple} \left(\frac{0.05}{f}\right)^A \left(\frac{1}{f}\right)^B \times 3 \times 10^{-9} = 10^{-18}$ 。A, B は各質点に応じた値。

4 Heat Link 防振系

4.1 Heat Link ワイヤーへの制限

Heat Link ワイヤーの特性として重要なのは、

- 熱伝導率
- 等価バネ定数

である。熱伝導の点では、高純度銀 (5-nine)、サファイア、高純度アルミ (5-nine)、高純度銅 (5-nine) しか残らない。サファイアは 20-40K に熱伝導のピークを持ち、アルミ、銅、銀は 10-20K にピークを持つが⁴、ピークになる温度はサイズ効果により、ワイヤー直径が細くなる程高くなると思われる。金属系は超高純度化 (6-nine 以上) によってさらに 10 倍程度熱伝導をのばすこともできるが、維持できる環境や使用条件は未調査である。

等価バネ定数においては、ヤング率が小さいものが望まれるので、結果、アルミと銀しか残らず、二種の差はない。バネ定数とは、U 字で Heat Link ワイヤーを M_{up1} (50[kg] 程度) と Heat Anchor を接続した時の等価なバネ定数のことである。一般にバネ定数は、ワイヤーの直径の 4 乗に比例する。熱伝導率一定を保ちながら、ワイヤーを細くしていく場合、サイズ効果で熱伝導もワイヤー直径に比例して小さくなることから、その分もあわせて本数で熱伝導を補うことを考慮すると、本数はワイヤー直径の 3 乗に反比例し、バネ定数はワイヤー直径に比例する程度しか落とせないことになる。また、伝達関数は、ワイヤーの質量が無視できないので、等価な振り子としての共振周波数の 100 倍程度の周波数以上では、減衰率が一定 ($\sim 10^{-4}$) になると思われる。

必要とされる総熱伝導量は、サファイア鏡の熱吸収率に大きく依存する。都丸君の計算したサファイアファイバーのデータから類推すると、直径 2mm、長さ 0.5 m のアルミワイヤー 4 本で 1.2 W の熱を放出できるが (LCGT におけるレーザーパワーを仮定して、サファイア鏡が 50 [ppm/cm] 程度の吸収を持つ時に発生する熱量に相当)、現状の低振動冷凍機 1 台の性能が 0.5 W 程度なので、台数と振動のトレードオフで最大放熱量がきまる。このワイヤーのバネ定数は 4 本で、50 N 程度であり、 M_{up1} (50 kg) に対する共振周波数は 0.2 Hz 弱程度になる。

4.2 防振系

4.2.1 振り子のみで構成

必要な防振比は 10^{-8} @ 3 Hz。これはかなり厳しい。1 段振り子 (0.1 Hz 共振) \times 2 段振り子 (1 Hz 共振) \times 1 段振り子 (0.2 Hz 共振) \times 1 段振り子 (1 Hz 共振) でやっと達成できるものであり⁵、しかもすべて低温環境に置かなければならない。ちなみに、目標感度を 1×10^{-19} [m/ $\sqrt{\text{Hz}}$] @ 10 [Hz] に緩和すると、2 段振り子 (1 Hz 共振) \times 1 段振り子 (0.2 Hz 共振) \times 1 段振り子 (1 Hz 共振) あるいは 1 段振り子 (0.3 Hz 共振) \times 1 段振り子 (0.2 Hz 共振) \times 1 段振り子 (1 Hz 共振) で達成でき、かなり簡略化できる。

⁴ 4 種ともピーク値は、ワイヤー直径 2mm 程度で $4 \sim 2 \times 10^4$ [W/mK]。

⁵ 最後の 1 段は主鏡の懸架。以降同じ。

4.2.2 補助干渉計つき

主鏡の防振と同様に、補助干渉計により、Heat Link系の振り子の数を減らすことが可能であり、ゲインが $10^3 @ 3$ [Hz] ならば、前述の2段振り子 (1 Hz 共振) \times 1段振り子 (0.2 Hz 共振) \times 1段振り子 (1 Hz 共振) で $10^{-8} @ 3$ Hz の防振比をとることが可能になる。ゲインが $10^5 @ 3$ [Hz] ならば、1段振り子 (0.2 Hz 共振) \times 1段振り子 (1 Hz 共振) で可能になる。つまり、Heat Anchor から M_{up1} にワイヤーで直付けの形になる。

4.3 Heat Link ワイヤーの熱雑音

Heat Link を使う防振系で、特別に考えるべき雑音源に Heat Link ワイヤーの熱雑音がある。Structure Damping を仮定し、ワイヤーの Q 値を 100 とすると、Heat Link ワイヤーの熱雑音は、ほぼ、3-100 Hz の目標感度とほぼ同じになる。よって、十分下げるには、 M_{up1} ではなく、もう一段上の質点に Heat Link する必要がある。

5 とりあえずのまとめ

主鏡の防振および Heat Link の防振ともに、なんらかの補助干渉計の導入により、その構造が簡素化され、各段での actuator 効率への requirement がゆるまる様に見える。より実際的な補助干渉計付き干渉計を考え、問題点を明らかにし、真にメリットがあるかどうかを考える必要がある。

つづく。