

レーザー歪み計を用いた能動防振の提案

三代浩世希

2019 年 7 月 26 日

概要

能動防振は 0.1Hz 以下の低周波では慣性系に対して防振できない。正確に言えば変位センサーで DC 制御を行っているためローカルの地面に対して防振している。この状態で腕共振器を組むと、基線長が短い場合は低周波地面振動は同相成分として現れるため問題になりにくい、km スケールでは逆相成分である基線長変動に現れてしまうことで、lock acquisition が不安定になる。LIGO では sensor correction と呼ばれる手法で変位センサーから地面振動成分を取り除き、慣性系に対して防振できるよう補正する試みがなされている。しかし慣性センサーは低周波で感度が悪くなることや、tilt-horizontal coupling による傾斜成分のカップリングなどによって、原理的に低周波防振には限りがある。本提案では sensor correction のセンサーに GIF のレーザー歪み計をつかう。レーザー歪み計は基線長伸縮を原理的には DC まで直接測定することが可能であり、基線長が一定になるように変位センサー信号を補正することができる。腕共振器の低周波地面振動による不安定性を改善することにより、ロックロスを低減することが期待される。

目次

1	基線長安定化のための能動防振	1
1.1	従来の能動防振	1
1.2	レーザー歪み計をつかった能動防振	5

1 基線長安定化のための能動防振

1.1 従来の能動防振

Pre-Isolator の目的はステージを慣性系に対して静止させることである。したがって FeedBack で用いるセンサーには慣性センサーを用いなければならない。しかし図 1 が示すように一般的に慣性センサーは低周波で地面振動よりもノイズが大きいため、ループゲインを低周波で大きくすることができず、DC 位置を制御することができない。

一方で共振器長制御のためには、ステージの位置制御をしなければならない。そのため低周波ではローカルな変位センサーをつかって、地面の揺れに追従するようにしている。このように慣性センサーと変位センサーをあわせたセンサーのことを super sensor と呼ぶ [1]。低周波でノイズが大きくなる慣性センサーには high-pass フィルターを、変位センサーには同じカットオフ周波数の low-pass フィルターをかけている。これらフィルターは相補フィルターと呼ばれており以下のような関係式で結ばれる。

$$L(\omega) + H(\omega) = 1 \quad (1)$$

ここで、 $L(\omega)$, $H(\omega)$ はそれぞれ low-pass フィルターと high-pass フィルターである。このような super sensor を用いて、高周波では慣性系に、低周波では地面に対して FeedBack 制御をおこなっている。

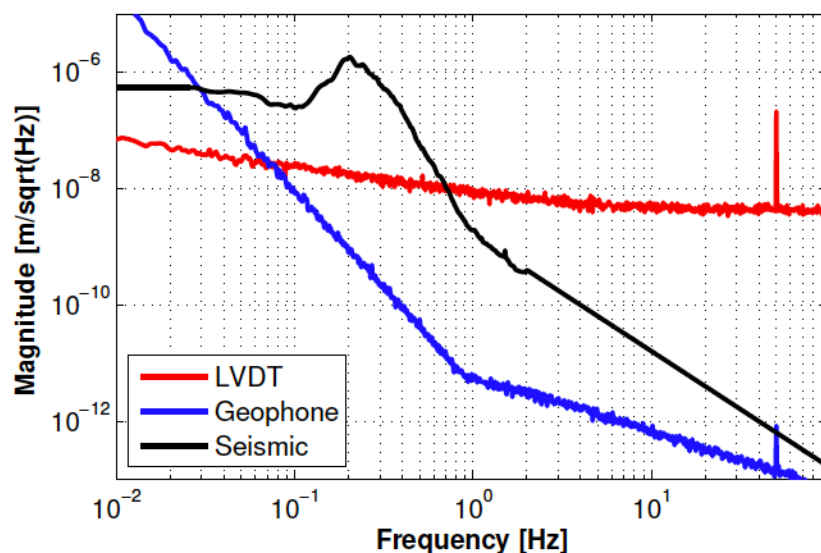


図 1: 地面振動とセンサーノイズの比較。黒線は地面振動。赤線は LVDT、青線は Geophone のセンサーノイズを変位に換算したものである。30mHz いかでは地面振動 x_0 よりも Geophone はノイズが大きい。参考文献 [2] の Fig5.6 から転載。

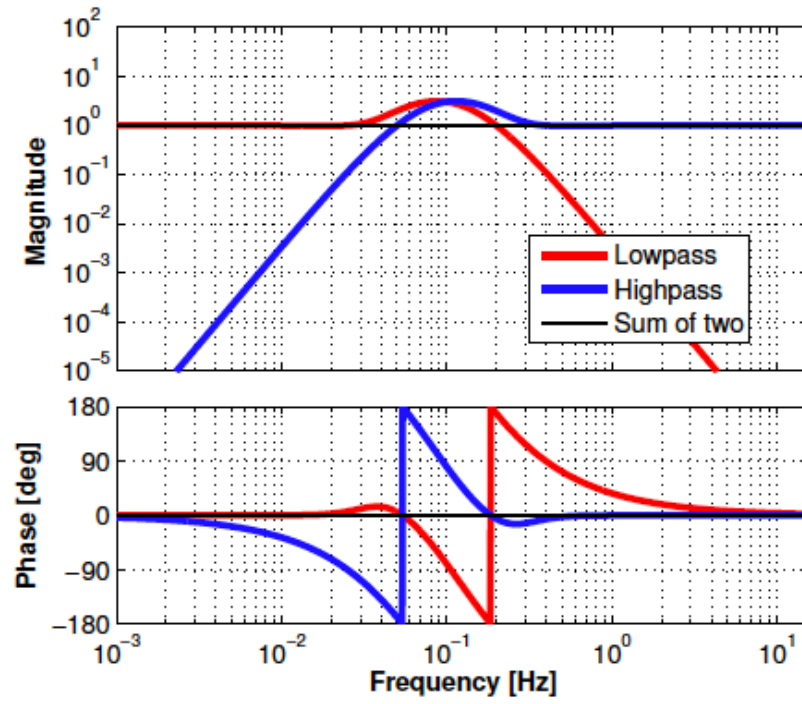


図 2: Blanding フィルター。0.1Hz にカットオフ周波数をもつ相補フィルター。
図 1 によれば、0.1Hz で Geophone のノイズが LVDT よりも大きくなるので、0.1Hz にカットオフを持たせなければならない。したがってローパスは LVDT にハイパスは Geophone にかけている。参考文献 [2] の Fig5.8 から転載。

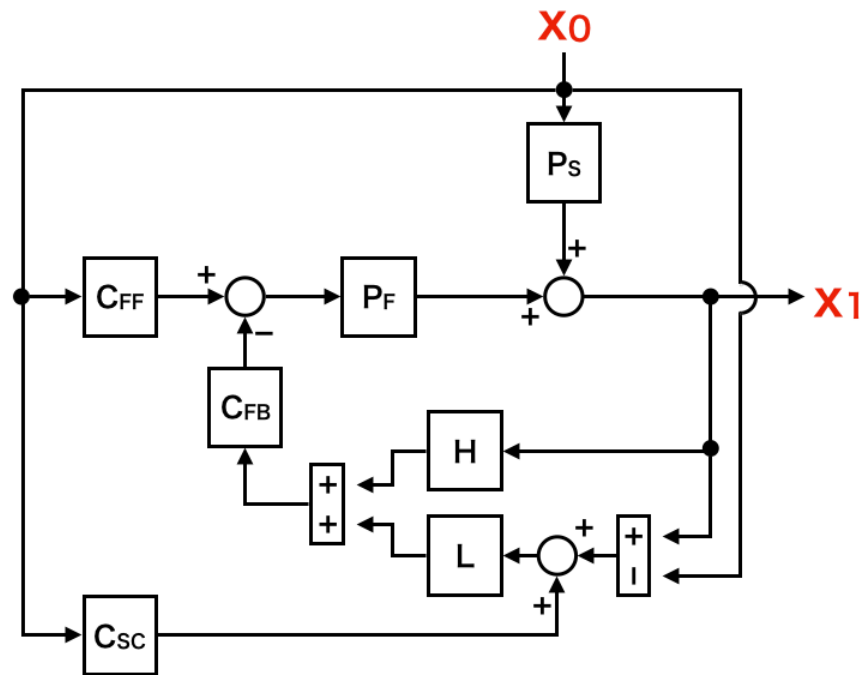


図 3: LIGO の Preisolator で使用している能動防振のブロック図。参考文献 [3] から引用した。ここで、 P_s は地面振動の変位 x_0 からステージの変位 x_1 への伝達関数である。 C_{fb} , C_{ff} , C_{sc} はそれぞれ feedback、feedforward、sensor correction の制御フィルターである。さらに H , L は super sensor のための相補フィルターであり、それぞれ慣性センサーのためのハイパスフィルターと変位センサーのためのローパスフィルターである。 G はループゲインをあらわしており $G = C_{fb}P_f$ という関係であり、このときの P_f はステージのアクチュエータからステージの変位への伝達関数である。

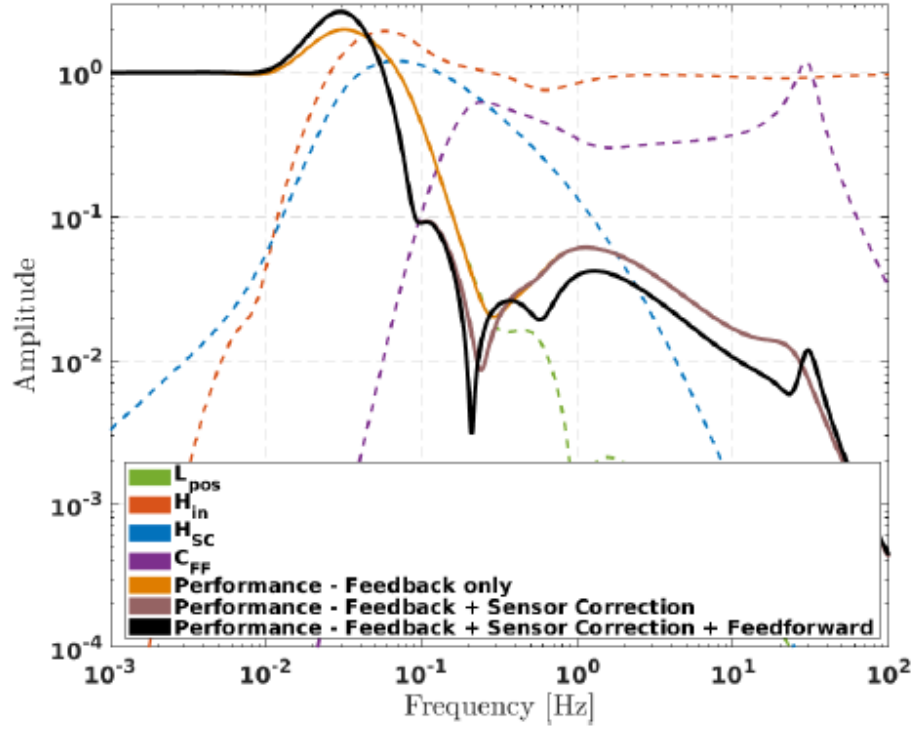


図 4: 参考文献 [4] の Fig3.13 から転載。

ところで、変位センサーを使うということはステージが地面と一緒に動くことを意味している。これは比較的小さいスケールの腕共振器であれば、低周波地面振動は同相な地面振動雑音として除去されるので問題となりにくい。しかし km スケールの腕共振器では、とくに RMS の大きな脈動の帯域では、逆相成分である基線長伸縮は同相成分とくらべて 1/4 程度にしか低減できない [5]。このような問題に対して LIGO では sensor correction と呼ばれる feed forward 制御を加えた試みをおこなっている [1][3]。

LIGO の sensor correction は feed back ループにある変位センサーから地面振動成分を取り除く方法である。LIGO の能動防振のブロック図を図 3 に示す。^{*1}この図においてステージの変位 x_1 を地面振動 x_0 で表すと

$$x_1 = \frac{1}{1+G} \left[(P_s + P_f C_{ff}) x_0 \right] + \frac{G}{1+G} \left[L(1 + C_{sc}) x_0 \right] \quad (2)$$

になる。ここで低周波の外乱抑制を高めるために式 (2) のゲイン G を十分に大きくすると式 (3),(4) になる。式 (4) によれば、feed back のみの場合、ステージの変位 x_1 はローパスフィルターに沿って地面振動 x_0 を流入させる。しかし sensor correction を加えて $C_{sc} = -1$ となるようにフィルターを作れば地面振動からの寄与を減らすことができる。

$$\lim_{G \rightarrow \infty} x_1 = L(1 + C_{sc}) x_0 \quad (3)$$

$$= \begin{cases} Lx_0 & (C_{sc} = 0) \\ 0 & (C_{sc} = -1) \end{cases} \quad (4)$$

実際に使われている制御フィルターを図 4 に示す。sensor correction に使うセンサーには結局のところ慣性センサーをつかうので、フィルター C_{sc} は、super sensor と同様に、低周波で十分に信号を落とさなければならない。また高周波ではコヒーレンスが悪くなるため、実際にはバンドパスフィルターを用いる (図 4 の青色の破線)。さらに慣性センサーは低周波では tilt-horizontal coupling と呼ばれる傾斜成分が並進成分にカップルする性質があるため、むやみに低周波成分をパスすることはできない。傾斜成分を補償する別の sensor correction が提案されているが [4]、慣性センサーを用いている以上、原理的に低周波帯域での補償には限りがある。

ちなみに sensor correction とは別に高周波帯域のステージの要求値を満たすために、LIGO ではもう一つの feed forward を用意している。それはゲインが小さい帯域で効果を表す。式 (5),(6) にゲインを小さくした場合のステージの変位 x_1 を示す。式 (5) によれば、feed back のみの場合は、ステージの変位 x_0

^{*1} KAGRA ではまだ sensor correction は実装されていない。なので KAGRA としては地震計をつかう LIGO を踏襲するよりも GIF の歪み計をつかったほうがいい。現段階だと X アームは歪み計で Y アームは地震計にするとか。

はステージの地面振動応答 P_s に沿って地面振動を流入させる。このとき、sensor correction と同様に、 $C_{ff} = \frac{P_s}{P_f}$ となるようにフィルターをつくれば地面振動からの寄与を減らすことができる。

$$\lim_{G \rightarrow 0} x_1 = P_s x_0 + P_f C_{ff} x_0 \quad (5)$$

$$= \begin{cases} P_s x_0 & (C_{ff} = 0) \\ 0 & (C_{ff} = \frac{P_s}{P_f}) \end{cases} \quad (6)$$

本節では、PreIsolator は変位センサーを低周波帯域で FeedBack センサーにつかっていることが原因で、ローカルな地面にステージが追従してしまうことが問題であると述べた。従来の方法ではその解決のために sensor correction をもちいて、地面振動に追従しないよう制御信号を補正しているが、慣性センサーを使っているので DC まで補正することができない。

本提案では、視点を変えて、2つの共振器鏡それぞれを慣性系に対して防振するのではなく、エンドテストマス (ETM) をインプットテストマス (ITM) に追従するよう補正をする。つまり、共振器長を一定に保つように補正するという意味である。補正するために用いるセンサーには、腕に併設されたレーザー歪み計をもちいる。これは基線長の伸縮を原理的には DC まで直接計測することができる。つまり ETM と ITM の地面振動の変位の差である基線長伸縮 ΔL

$$\Delta L = x_0 - y_0 \quad (7)$$

を測ることができる。ここで x_0, y_0 は ETMX と ITMX それぞれの場所での地面振動である。つまり x_0 で動いている ETM のステージからレーザー歪み計で測った基線長 ΔL 分引いてやれば

$$\text{ETM のステージの変位} = x_0 - \Delta L = x_0 - (x_0 - y_0) = y_0 \quad (8)$$

のように ETM のステージを ITM に追従するように補正することができる。詳細は次節で述べることにする。

1.2 レーザー歪み計をつかった能動防振

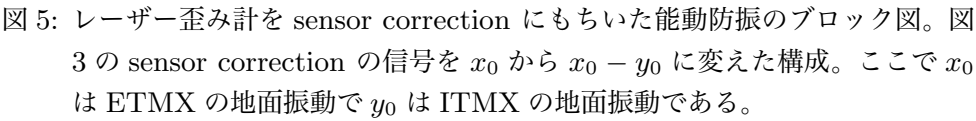
本提案では sensor correction のセンサーにレーザー歪み計をつかう。これにより ETM のステージの変位を ITM の地面振動 y_0 になるよう補正する。つまり図 5 のとおり、 C_{sc} に入れる信号には、基線長伸縮である $x_0 - y_0$ を入れる。 x_0, y_0 はそれぞれ ETM と ITM の地面振動を表す。このときの ETM のステージの変位 x_1 は

$$x_1 = \frac{1}{1+G} \left[(P_s + P_f C_{ff}) x_0 \right] + \frac{G}{1+G} \left[L(1 + C_{sc}) x_0 - L C_{sc} y_0 \right] \quad (9)$$

のとおりになる。ゲイン G を十分大きくし $C_{sc} = -1$ となるようにすれば、式 (11) のとおり、ETM のステージの変位は ITM と一致する。

$$\lim_{G \rightarrow \infty} x_1 = L \left[x_0 + C_{sc} x_0 - C_{sc} y_0 \right] \quad (10)$$

$$= \begin{cases} L x_0 & (C_{sc} = 0) \\ L y_0 & (C_{sc} = -1) \end{cases} \quad (11)$$



参考文献

- [1] Wensheng Hua. *Low frequency vibration isolation and alignment system for advanced LIGO*. PhD thesis, stanford university, 2005.
- [2] T Sekiguchi. A study of low frequency vibration isolation system for large scale gravitational wave detectors. *PhD thesis*, 2016.
- [3] F Matichard, B Lantz, R Mittleman, K Mason, J Kissel, B Abbott, S Biscans, J McIver, R Abbott, S Abbott, et al. Seismic isolation of advanced ligo: Review of strategy, instrumentation and performance. *Classical and Quantum Gravity*, Vol. 32, No. 18, p. 185003, 2015.
- [4] S. Biscans. Optimization of the advanced ligo gravitational-wave detectors duty cycle by reduction of parametric instabilities and environmental impacts. *PhD thesis*, 2018.
- [5] 三代浩世希. X アームの基線長伸縮. *JGW-L1808556-v3*, 2018.