

ICRR 輪読

Calibrating gravitational-wave detectors with GW170817

Takaaki Yokozawa

2019/4/15

すでに、Abstract から、何を言っているのかよく分からない(言っていることは理解できるが、納得できない) ので、参考論文の review(以前やったことがあるもの) のスライドで LIGO O2 calibration について説明した後でこの論文の主張をピックアップしていき最後に自分の意見と見解を記述していきます。

Abstract

- CBC 波形は GR で予言できる
- ですので、重力波の検出器レスポンスに制限を与えることができる (??)
- 重力波信号単体で相対的な振幅や周波数依存性などは制限できる (??)
- さらに光学観測等で距離や inclination がはっきり決まれば (??)、絶対振幅の制限ができる
- GW170817 の信号での calibration 精度の確認を行った。LV の相対的な振幅誤差が $\pm 20\%$ 、相対位相で、 ± 15 度、distance と inclination の制限で相対振幅誤差が $\pm 15\%$
- 5-10 年の数百イベント観測できれば % レベルに達するとシミュレートした
- 天体現象での calibration の可能性を示した

1 Introduction

GW170817 の話は省略

現状の calibration の精度は数 % の振幅と数度の位相。これは、Photon calibrator のレーザー絶対強度の不定性や、周波数特性の時間変化の導入の困難さが一つ挙げられる、他にもある。calibration には物差しが必要で、レーザーの波長を使う・レーザーの輻射圧を使う・重力勾配を使うなどが最先端。

本論文では、天文現象を使った calibration に着目する、GR の精度が良ければ。

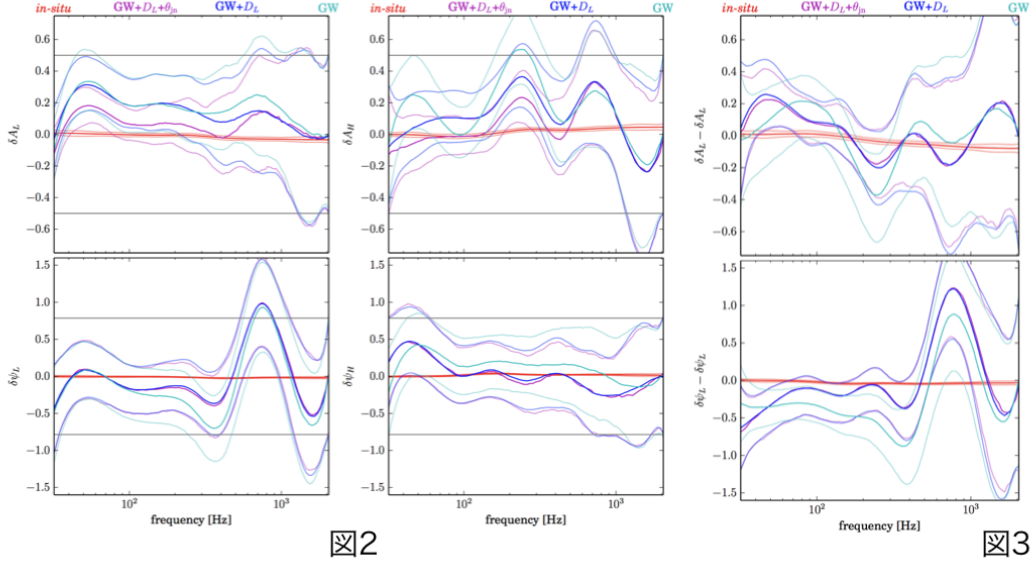


Figure 1: 本論文の図 2 と図 3、左が Livingston、中央が Hanford、右が相対的なもの

2 Formalism

シミュレーションを行うにあたって、定常ガウスノイズ n を仮定する。データ d は、

$$d = n + (1 + \delta A)e^{i\delta\phi}(F_+h_+ + F_\times h_\times) \quad (1)$$

と記述する。シミュレーションや解析には LALInference を使用する。天体 calib の難しいところに、 δA 、luminosity distance(D_L)、inclination angle θ_{jn} の縮退がある、が D_L と θ_{jn} が EM などで決まったら、 δA の精度が上がる。 $\delta\phi$ の縮退は特にならない。(と記述があるが、tidal やスピン(NSNS だと精度が良さそうだが)の波形精度の方が個人的にはきになる。)

3 Calibration from GW170817

LALInference の detector calibration の prior を緩くして、GW170817 での calibration というのを行ってみた。つまり、calibration エラーも MCMC のパラメータとして astro calibration を行っていくということらしい。波形には、TaylorF2 を使っている。(prior は calibration 論文でわざわざ MCMC でパラメータ推定をしているのがここで prior として利用できるからである。)

Toy model に関しては読む気になれなかったので省略 (Fig.1 とか Appendix A とか) 図 2 と図 3 が GW170817 での calibration の結果である。4 つの条件での posteria を図示してみた。

- (水色:GW) calibration のゆるい prior での解析結果、source 分布は、一様分布

- (紺:GW+ D_L) calibration のゆるい prior と NGC4993 の距離不定性
- (紫:GW+ $D_L+\theta_{jn}$) calibration のゆるい prior と $D_L+\theta_{jn}$ を利用。jet 方向から少しだけ外れているであろうことから範囲を決めた。
- (赤:in-situ) 比較のために、直接求めた calibration priro を使用

EM の constrain を加えてもそんなに変化はなかった。(当たり前だが、統計誤差が大きすぎる。) LIGO2 台では、inclination の制限はほぼできないので、多少良くなるのは確認できる。 H_0 は well known だとする(??) ここには載せないが、図4と図5で joint posteria 分布(振幅、位相)を載せている。もしも、ここで、赤とその他の色に違いが見られたらおもしろいところ。低周波の δA には少しストレッチがあるか? phase の calibration エラーは、chirp mass と相関がある。Livingston の高周波の形に関する記述はなし。

4 Calibration from future events

どんなに SNR が良くても直接 calibration したものには及ばないので統計を稼いでみてどうか確認してみる。(が、エラーが時間変化しないとか、 $\sigma \propto 1/\sqrt{(N)}$ とか議論している。僕からしたら、もし振幅や位相にストレッチがあったら calibration のエラーよりも新物理を疑うが。。。そもそも cumulative で posteria 分布が鋭くなるとは思えない。。。) これも載せないが、図6に観測イベント数と cumulative での calibration error の図を載せている。予想通り、 $\sigma \propto 1/\sqrt{(N)}$ となっていて、1%を達成するには、1000event 以上必要。全てのイベントで D_L と θ_{jn} が求められるわけではないと思うので紫と水色の間くらい。

5 Discussion

ここからは横澤意見

- 重力波で検出器の calibration をするというのはこれまでは非現実的だったが、議論すること自体は非常に興味深い。他の素粒子検出器と違って、地上で重力波原を用意することはできないが。
- 直接求めた calibration error の prior を MCMC に組み込むというのは確立しているのだが、その組み込んだ MCMC の中で calibration error の prior を緩くするというのは少し間違った評価の仕方だと思います。O2cal の論文で示した通り、まずは、DARM loop のモデルを作り、その中のパラメータと実測とのズレを系統誤差にして prior にしている。もっと loose なことをしているのかもしれないが、この論文に記述がなかった(ように思える、トイモデルと実 MCMC での比較で実証したつもりになっているかもしれないが)ので信用できない。アンカー点での誤差とその間を spline interpolation しているとの記述があったが、(おそらく O1 では (O2 でも?) このようにキャリブレーションエラーを入れていたはずなので)、アンカー点を loose にすれば信用できるものになる??

- I さんからの情報と Y さんと議論の中で、LIGO の offline の人たちが astro calibration に力を入れようとしているという情報がある。それは主には、(横澤推測)low latency と offline calibration で大きな違いが現れなくなっていて astro calib というテクニックをなんとか駆使してエラー値を下げようとしているのではないと思われる。(もう一つあるが、ここに残すと問題になるかもしれないので輪読に参加した人だけに秘密にします。)しかし、あまりに凝ったことをやってもどうかと思う。それは、最初から記述している通り、GR との違いがそんなに大きくないことがなんとなく観測されているが、完全に信用していいものかがわからないからである。GR と関わりのない、相対的な振幅や位相というものの評価という意味ではやる価値があると思う。図 4 はそういう意味でもいい図。LIGO2 台だから in-situ と consistent なだけかもしれない。Virgo と KAGRA と LIGO で正しい calibration が行われているか? という relative astro calibration は発展するかもしれない。
- 本論文にも触れられているが、簡単に検出器にアクセスできない宇宙干渉計を確認するには astro calib が重要だと思います。
- 位相につながってくるが、timing が正しいことはまだわかっていない。GW170817 のようなイベント (EM で方向がしっかりわかっている) を LVK で観測して confirm ができるはず。