



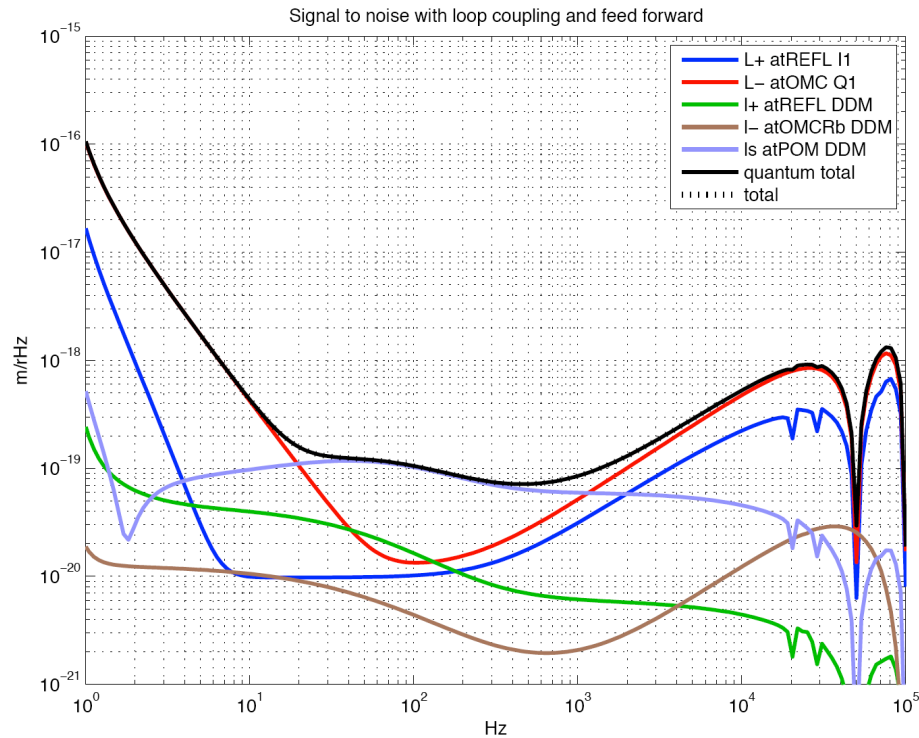
# LCGTにおける 帯域幅可変の可能性

2009/8/6(木) LCGT干渉計帯域幅特別作業部会  
東京大学宇宙線研究所 宮川 治

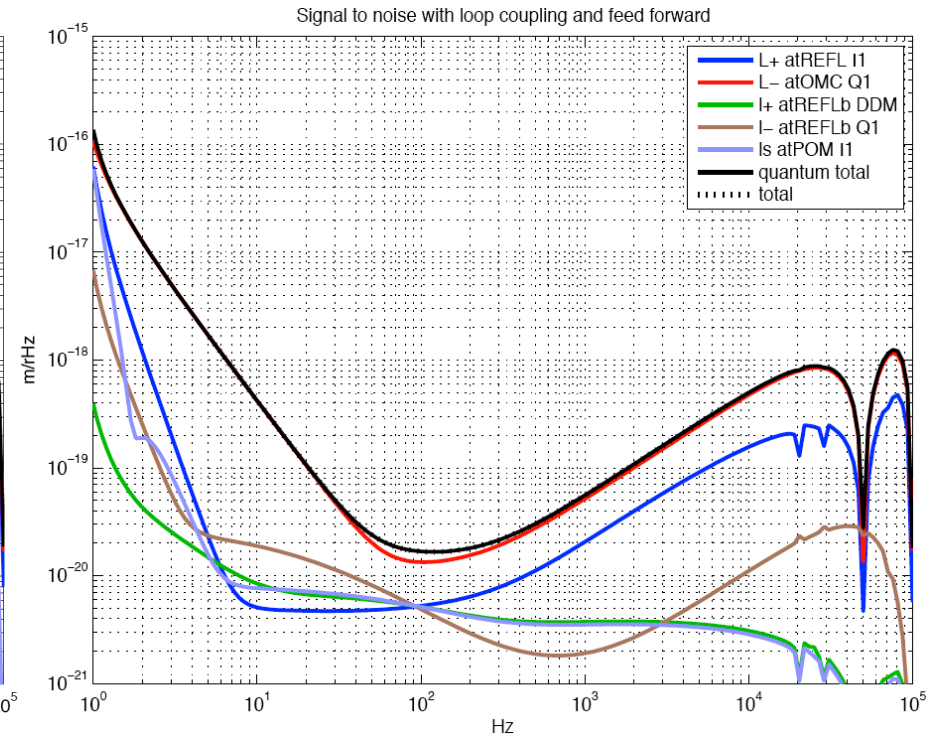


## 前回の復習

### All DDM



### DDM+SDM

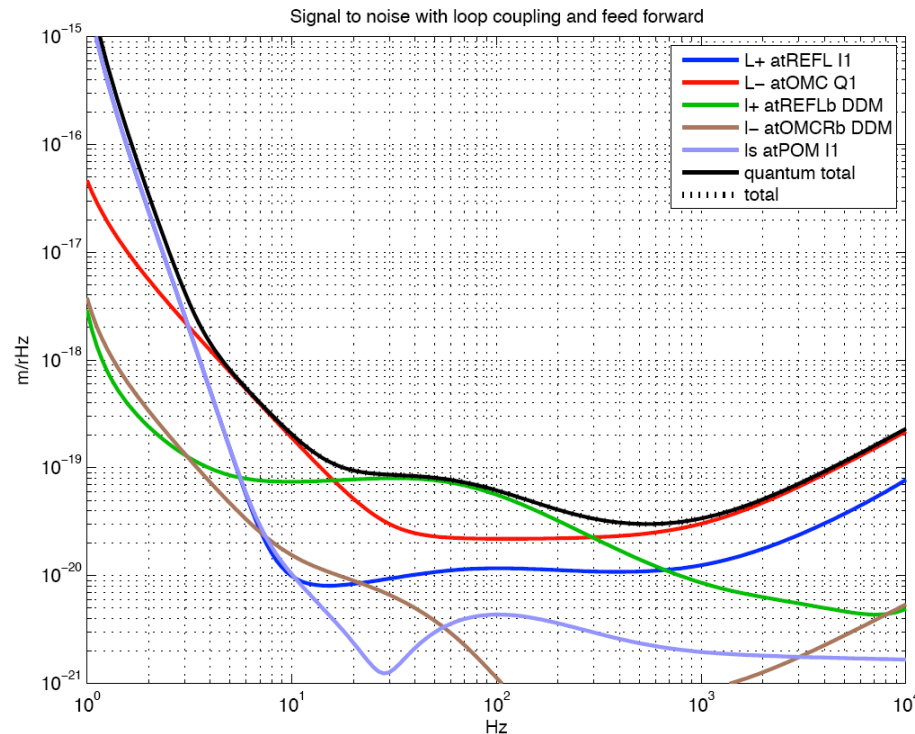


- 非対称性が有るとDDMではfeed forward 1/30でもL-が他の自由度からのループノイズで汚される
- 例えばsingle demodulationを考えると同条件でもループノイズをかなり回避できる



## 重要なパラメータ

- トータルパワーで75W (carrier +  $f_1$ (5次まで) +  $f_2$ (PMの場合5次まで、AMだと1次まで))
- PM-AMの場合、Mach-Zhenderの各腕で変調指数  $m_1=0.2$ ,  $m_2=0.4$ 、これで**実効的に変調指数0.1**となる
  - この場合**キャリアが60W**になってしまい、**感度が1割程度変わってしまう**ので入射パワーを150Wから**200W**に増やす等対策が必要、もしくはAMを捨てるか
- 各鏡のHR面のロス: **45ppm**
  - PRG=11を保証できるぎりぎりの値(AMの場合すでに入射60Wなので本当はもっと欲しい)
  - それでもサファイアで大型ミラーでこの値の**実現はかなり厳しい**と考えられる
  - **T=0.008のlow finesse cavity**にしたため45ppmという値を許容できる、できれば**もっとlow finesseの方が安全**
- EMの透過率:10ppm(腕一本でキャビティ内ロスがトータル100ppmになる)
- 主要信号取得ポート:
  - REFL (干渉計戻り光)
  - AS (dark、OMC透過、DC readoutで使用)
  - OMC (OMC反射、RF readoutで使用)、更にOMCRb ( $l$ - DDM用 pick off:10%)
  - POM (PRM-BS感に設置のpick off、反射率1000ppm)
  - POX (X arm反射光、実際にはFM AR面→FM HR面となる光、反射率1000ppm)
- 制御帯域幅: [ $L_+$ ,  $L_-$ ,  $l_+$ ,  $l_-$ ,  $l_s$ ] = [30k, 200, 50, 20, 50]
- **非対称性**
  - FMの透過率に $\pm 100$ 分の1のずれ→各腕のfinesse=770, 786
  - EMの透過率に $\pm 5$ ppmのずれ→各腕のcavity反射率=95.01%, 95.40%
- ダイナミックレンジの制限による感度悪化を考慮
  - PDのノイズレベル1nV/rHz
  - PD最大入射パワー: 100mW for  $L_+$ ,  $l_+$ ,  $l_-$ ,  $l_s$ , 2.5W for  $L_-$
- Optickleの新バージョンの検証はすんだが、今日の計算はまだ旧バージョンでやっている



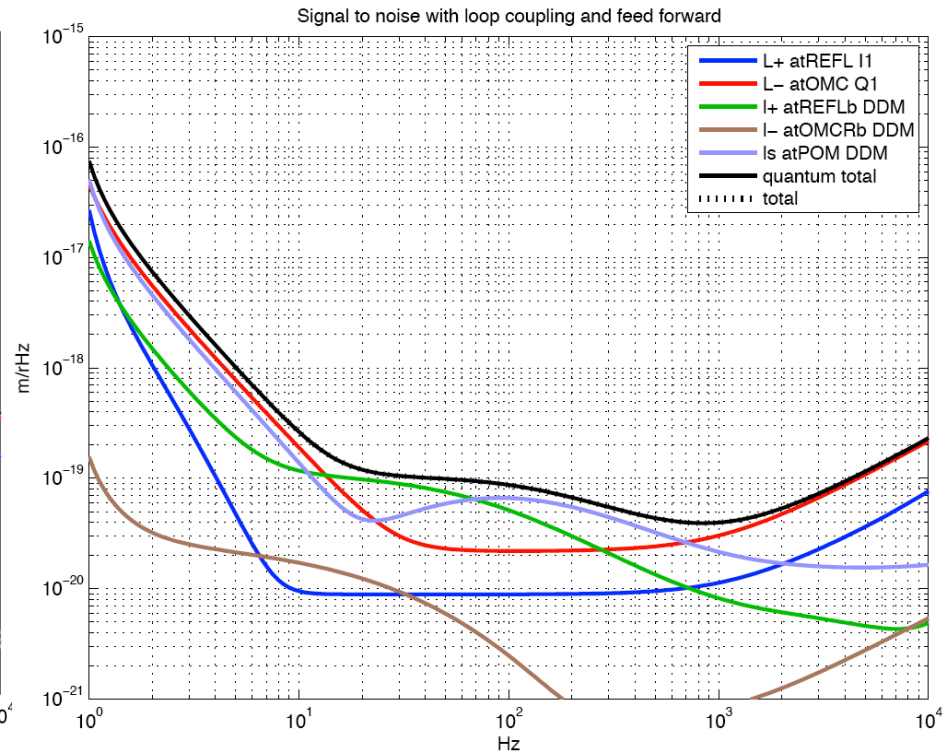
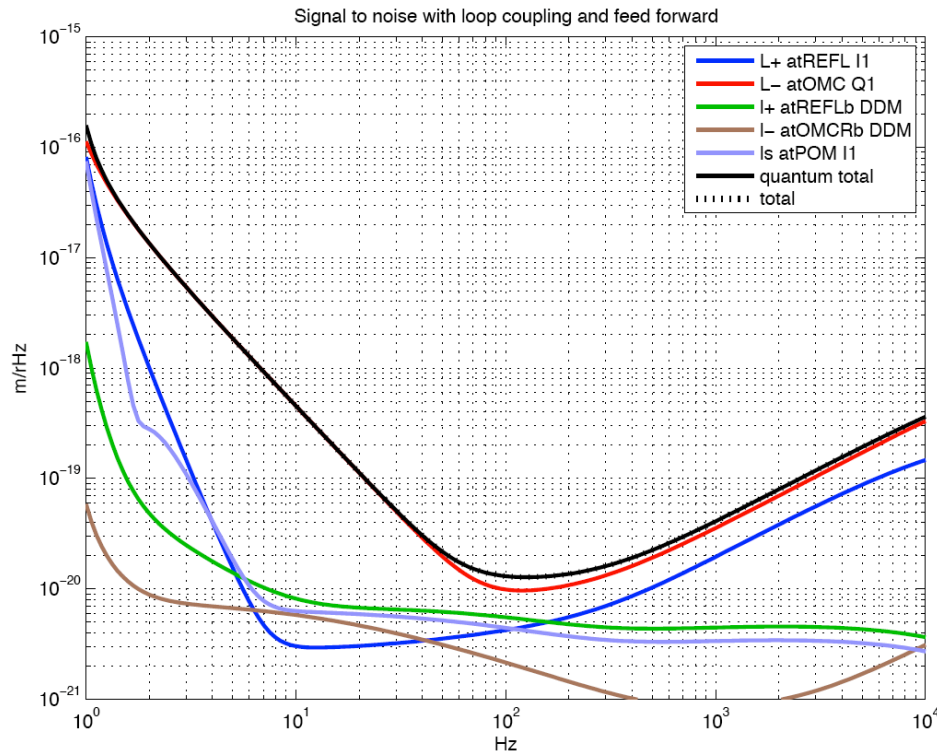
- 2005年とほぼ同じ条件で光学パラメータと鏡間距離及び変調周波数を変えた( $l_-$ 取得ポートのみASから10%ピックアップにDDMしたものに変更)

- $T_{FM}=0.008$ (パワー),  $r_s=0.94$ (振幅)
- $G_{PR}=10.7$
- $f_1 = 11.25\text{MHz}$  PM, MICH完全透過
- $f_2 = 45\text{MHz}$  AM, MICH完全反射
- $l_{as}=6.67\text{m}$ ,  $l_+=54.96\text{m}$ ,  $l_s=64.96\text{m}$
- RF readout
- $l_-$ にのみFeed Forward (FF), gain 30
  - $l_+$ ,  $l_s$ にいれても感度が悪化

- これではほぼベストエフォート、非常に厳しい
- $f_2$ がAMのためSingle Demodulation (SDM)で使用できずポート数が不足
- $l_s$ にSDMを使うので $L_+$ ポート間との縮退による低周波での $L_+$ と $l_s$ のカップリングがひどい
  - かといって $l_s$ をDDMにすると信号が小さいため更に悪化する
- なぜこんなに厳しいかというと、変調方法に罪がある訳でなく、光学パラメータが変わったため

変調方式、鏡間距離はそのままに、  
鏡の反射率を2005年デザインに戻した

全てDouble Demodulation



- 新デザインの感度悪化は変調方式のせいではない、鏡の反射率を変えたのが問題
- SDMによるLoop couplingの影響が今のところあまり定性的に言えないのが問題

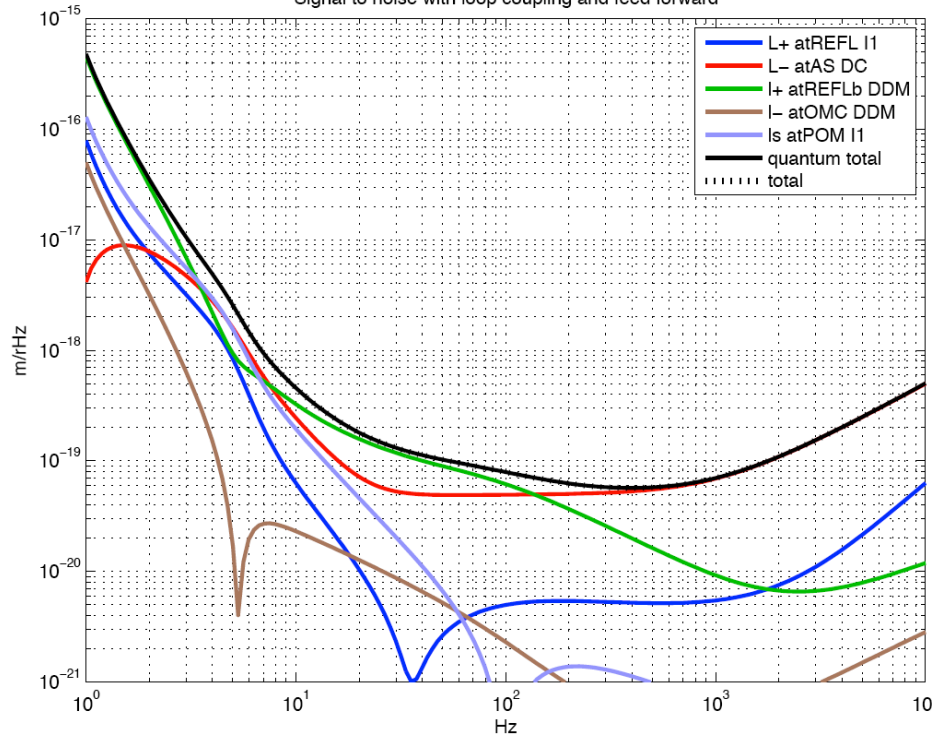
- DDMのため $l_s$ 信号が小さすぎて感度を悪化



# BRSE 2009 + DC readout

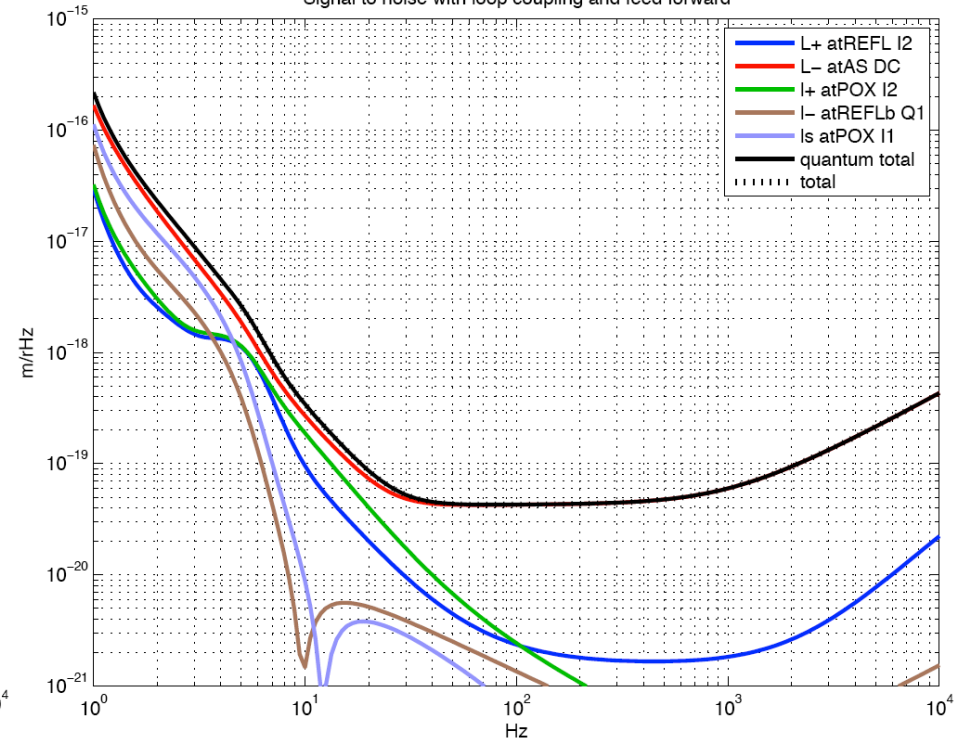
## DC readout, PM-AM

Signal to noise with loop coupling and feed forward



## DC readout, PM-PM

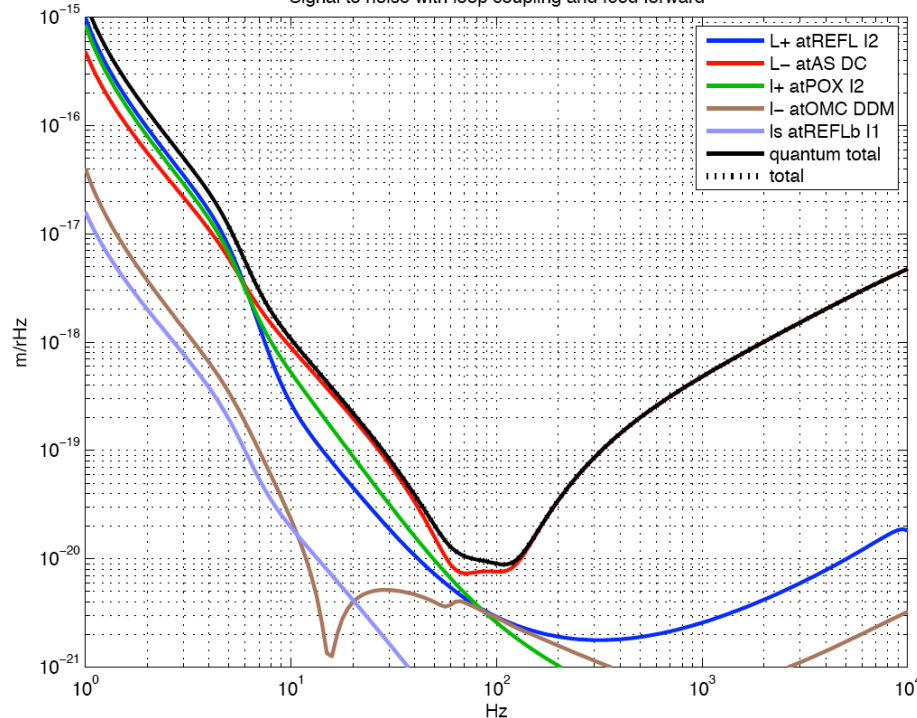
Signal to noise with loop coupling and feed forward



- 前々ページの設定にL-信号の取得をDC readoutにした
  - 後述するが、非定常散雑音のためDRSEではDC readoutがdefaultとなるから
  - 当然Output Mode Cleaner (OMC) が必要となる
- Dynamic range制限で感度が25%ほど悪化
- 依然厳しい

- $f_2$ もPMなのでSDMを $f_1, f_2$ ともにとれ、それぞれ反応が異なるのでカップリングを防ぎやすい
- だいぶましたが、20Hz以下の低周波はやはり汚される
- DDMを原理的に使えなくなるので、ロックアキュジションは3倍波復調等で腕からの影響を少なくする必要がある

Signal to noise with loop coupling and feed forward



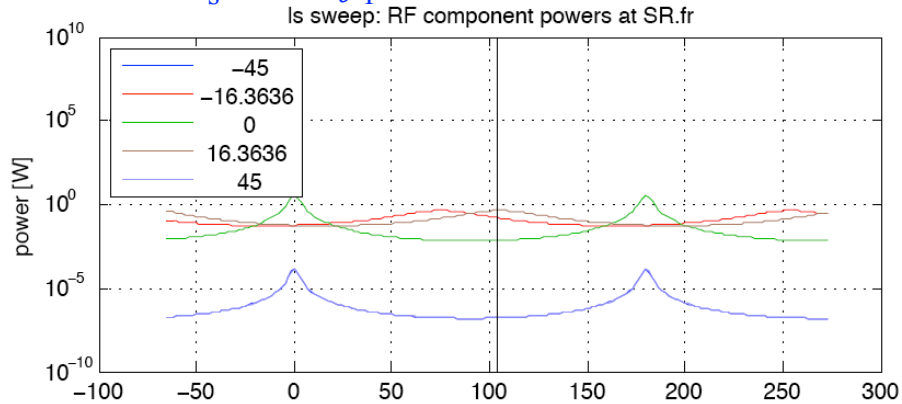
- $f_1 = 16.36\text{MHz}$  PM, DRMIでlow finesse
- そのためMC長が150m
- $f_2 = 45\text{MHz}$  PM, MICH完全反射
- PM-PMのため干渉計入射carrierパワー73.5Wに増加
- Detune phase = 13.5deg
- EM offset = 1e-12m
- DC readout
- $l_+$ ,  $l_-$ ,  $l_s$ にfeed forward, gain 30

- DRSEはunbalanced SBになるのでPM-PMでもDDMも使える
- これらの信号取得ポートでほぼベストエフォート
  - $l_s$ にDDMは可変範囲が狭くなるので厳しい
  - $L_+$ ,  $l_+$ に $f_1$ 復調はエラー信号がひずむので $f_2$ 復調がいい
- 宗宮計算より少し感度がいいがHomodyne phaseの最適化をしていないためか?
- Dynamic range制限で感度が15%ほど悪化
- 裾が少し引っかかるので、制御帯域を下げるか、より大きなFFゲイン等が必要

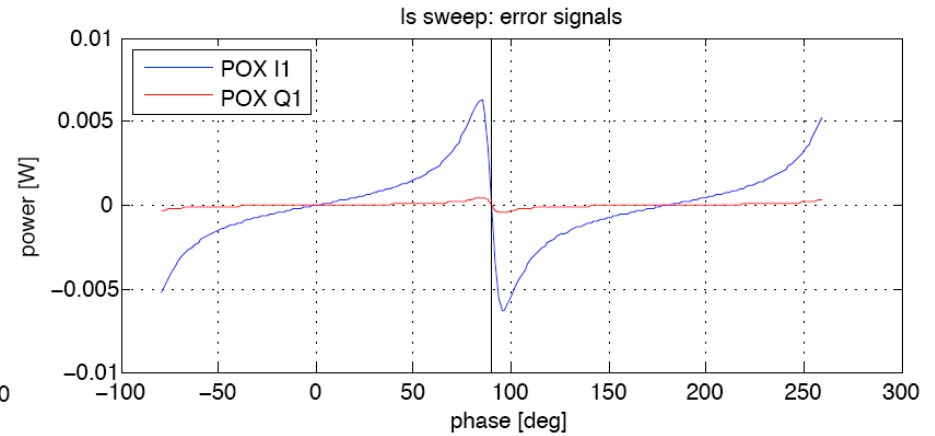
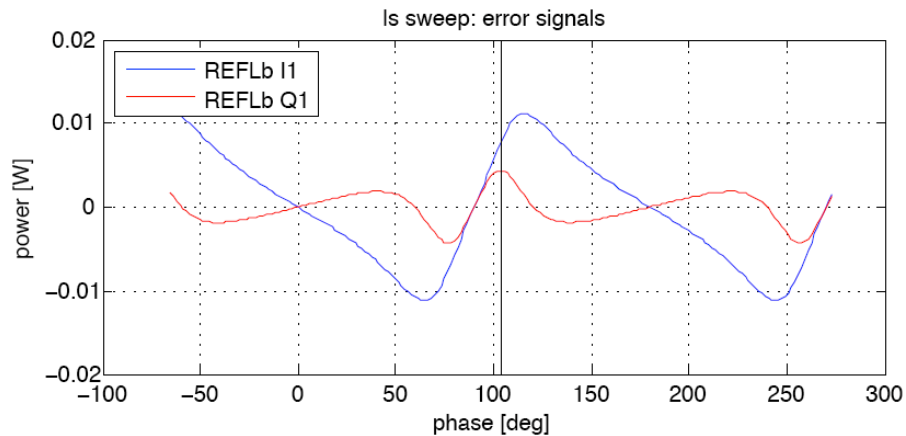


# $l_s$ エラー信号

## DRSE $l_s$ 信号、 $f_1=16.36\text{MHz}$



## BRSE $l_s$ 信号、 $f_1=11.25\text{MHz}$ 、PM-PM



- 105度がロックポイント
- なんとかスロープの範囲内、ただし105度でオフセットゼロにはならない

- $f_1$ がMICHで完全透過なのでフィネスが高く、エラー信号の線形な範囲が狭い

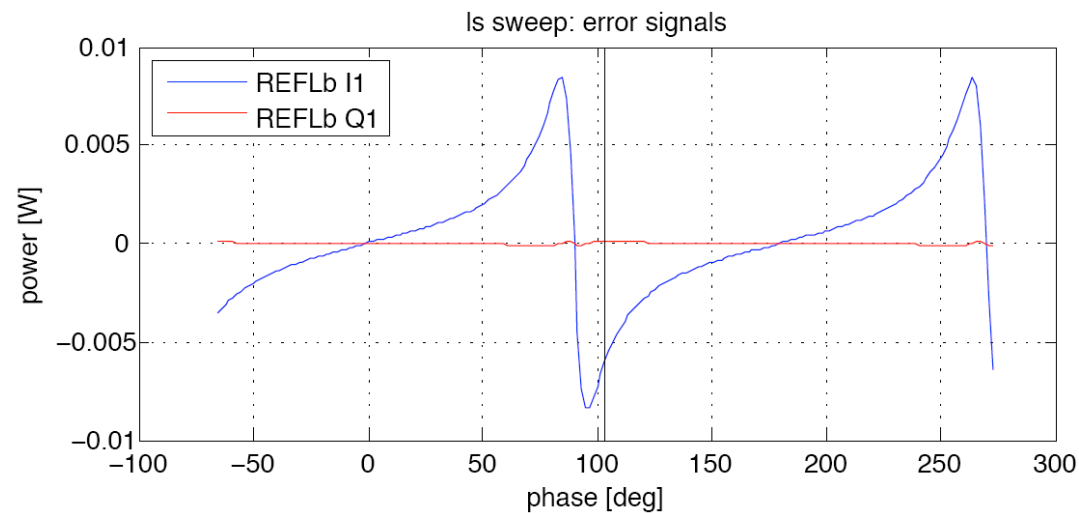




## 参考: $f_1$ を一つにまとめる

いっそのことDRSEに $f_1=11.25\text{MHz}$ を適用できないか

- MCの長さが10m程度になる
- DRSEはPM-PMでSDMもDDMも使える
- BRSEは $f_2$ をAMにしてDDMも使うか、PMにしてSDMだけにするか選べる
- ただし、detuneの範囲が5度程度と狭い
- もう少しきちんと考えた方がいい





## まとめ

- ループノイズに関してはBRSE、DRSEともにとりあえず厳しい
  - 特にBRSEに関してはAM、言い換えるとDDMを捨てなければだめ
  - ロックアクイジションで腕からの影響を少なくするためには3倍波復調等を考える必要がある
- が、非対称性も考慮する等、現実的なモデルにある程度近いので、実現は不可能ではない
- SDMは信号は大きい、縮退によるカップリングには注意すべき
- MCの長さ制限が厳しい場合、 $f_1$ をBRSEとDRSEで一つにまとめる方向に行かなければならない
- DC readoutではEMにオフセットを入れるため、PDのDynamic range制限で感度が悪化する
- Homodyne phaseの最適化をする余地があるかも



## 干渉計帯域幅を考えるにあたり(私見)

- BRSEとDRSEの切り替えを考えたとき、共に制御信号をとる方法はある(MCの長さはまだ検討する必要がある)
- ただし、実現可能感度はシミュレーションを走らせて考えなければならない等、定性的な単純な話ではすまなくなっている
- その上で、**ループノイズに関してはBRSE、DRSEともにとりあえず厳しい**
  - これは切り替えとかの問題ではなく、**LCGT自身も持っている厳しさのため、帯域幅切り替えとはある程度独立して考えていいのでは**
- Advanced LIGO等との競争を考えた場合、低温である限りDetunedでないと戦えないので、**切り替えをdefault案として提案するのではないだろうか**
- 本当に大丈夫かどうかはアライメント制御を含む今後の更なる検討が必要