



# 低温レーザー干渉計CLIO(30) デジタル制御IV

2010/9/13(月) 日本物理学会2010年秋期大会  
於 九州工業大学戸畑キャンパス

宮川 治、大石奈緒子、斎藤陽紀、三代木伸二(東大宇宙線研)、  
麻生洋一(東大理)、  
Stefan Ballmer、辰巳大輔(国立天文台)、  
CLIO collaboration



### 多自由度で複雑な制御を必要とするLCGTでは デジタル制御は必須である

- LCGTと同じような制御帯域幅であるCLIOにデジタル制御システムを導入し、実際の干渉計で稼働することにより、デジタル固有の技術を蓄積する
- CLIOの感度向上のための期間短縮に貢献する
- デジタルシステムのLIGOグループとの共同開発により、国際協力体制を築く
- LCGT建設時にスムーズにデジタル制御を導入できるようにする



# CLIOのこれまでと将来



- Cooling test masses, reduction of thermal noise

Replacement by digital control, monitoring system

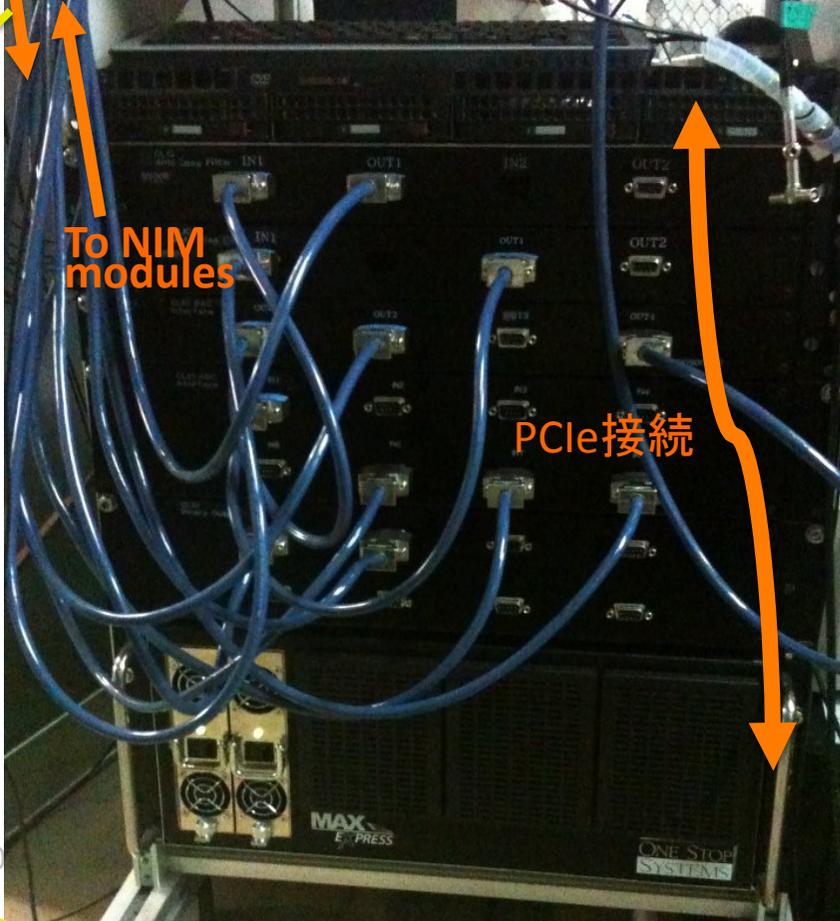
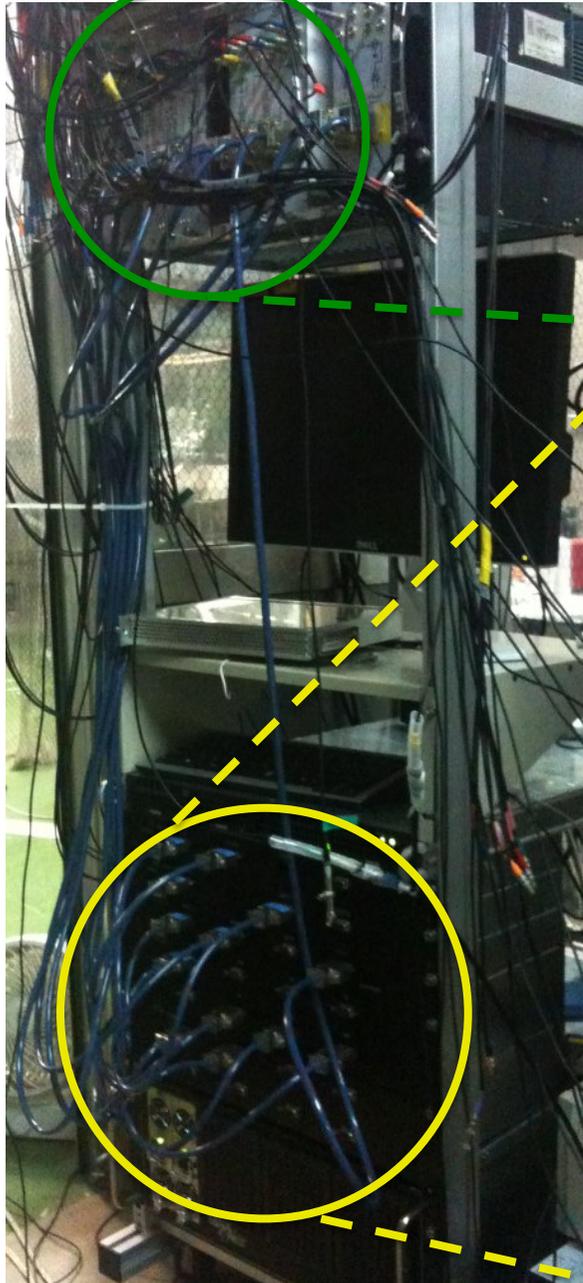
- Local SPI for active damping system
- Silicon mirror interferometer

Digital systemによる制御は、時間的、能率的に  
有利な実験手段を提供する

- Flexible digital filters
- 自動初期アラインメントシステム
- Advanced lock acquisition strategy
- 常時感度モニタ
- 様々な干渉計自動調整システム

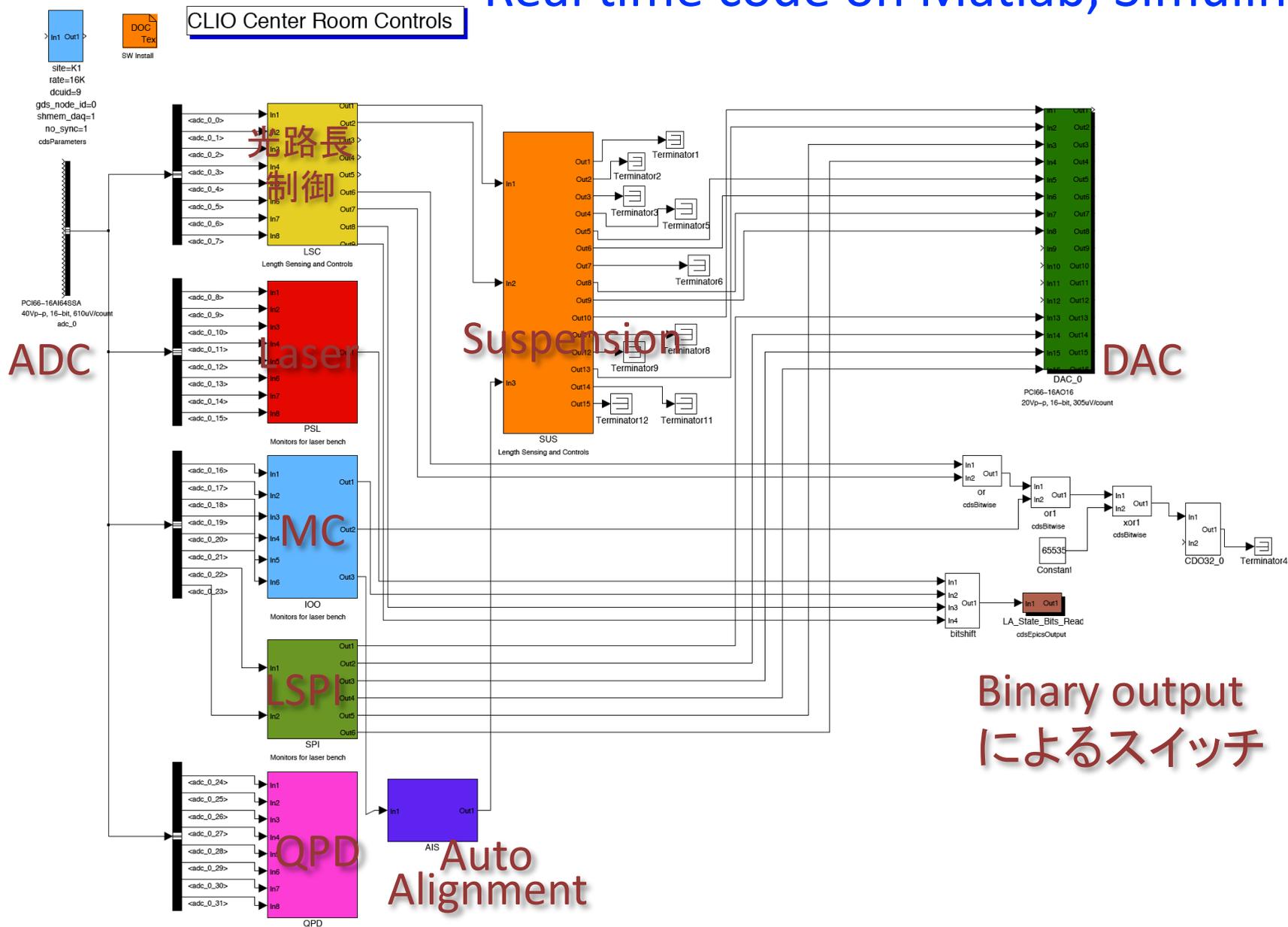


# Pictures



- Real time PC  
CentOS 5.2+real time kernel  
4core x 2 Xeon
- Anti Imaging filters
- Anti Alias filters
- DAC adapter
- ADC adapter
- Binary output adapter
- ADC/DAC
- In Expansion Chassis
- ADC:32ch/枚、\$4K
- DAC:16ch/枚、\$3.5K
- Binary Output:32ch/枚、\$250

# Real time code on Matlab, Simulink



Binary output  
によるスイッチ



# 線形化と、閾値によるトリガー

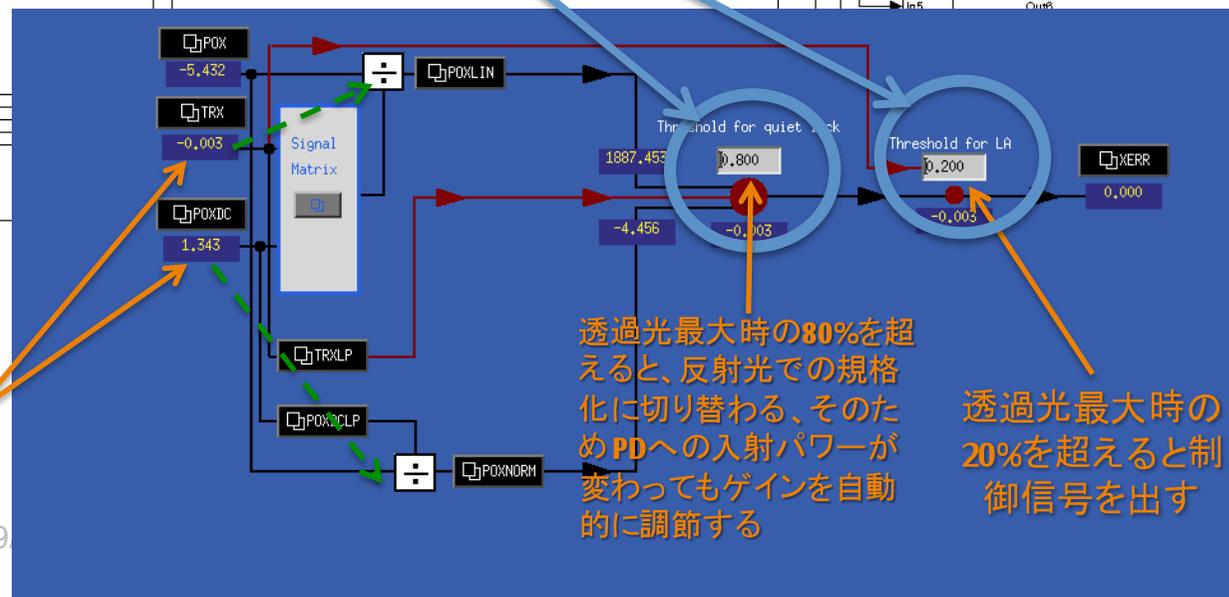
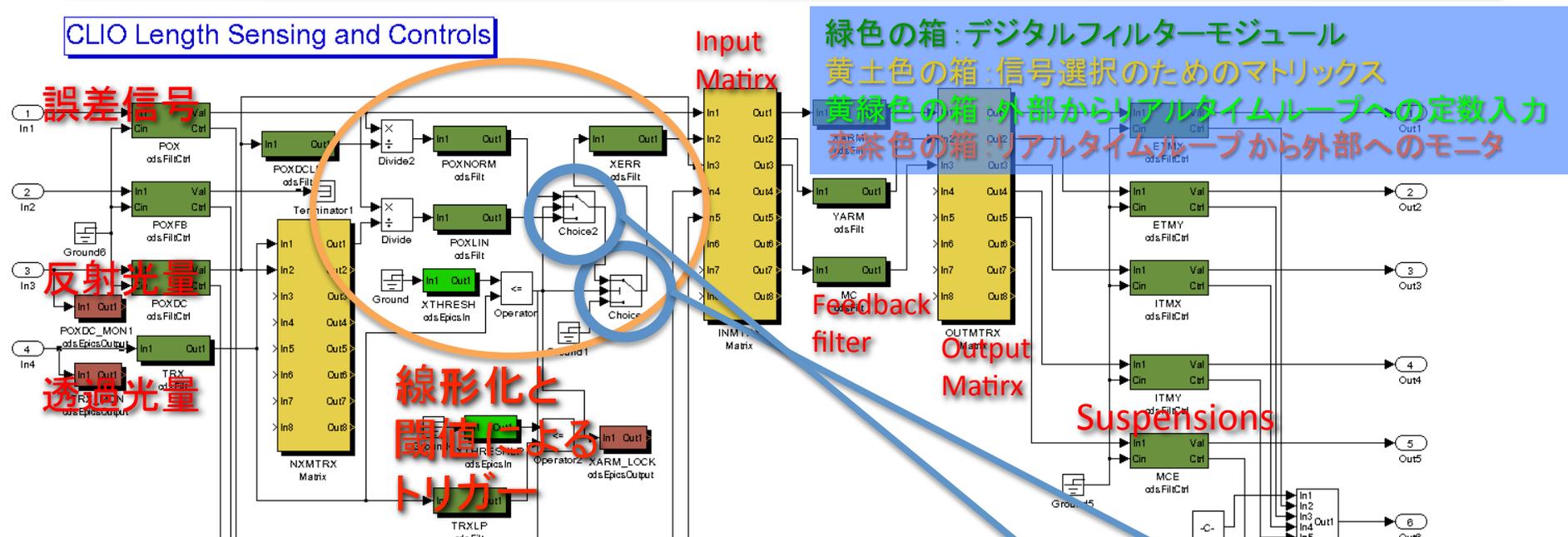


## CLIO Length Sensing and Controls

1 誤差信号  
2  
3 反射光量  
4 透過光量

線形化と  
閾値による  
トリガー

緑色の箱 : デジタルフィルターモジュール  
 黄土色の箱 : 信号選択のためのマトリックス  
 黄緑色の箱 : 外部からリアルタイムループへの定数入力  
 赤茶色の箱 : リアルタイムループから外部へのモニタ

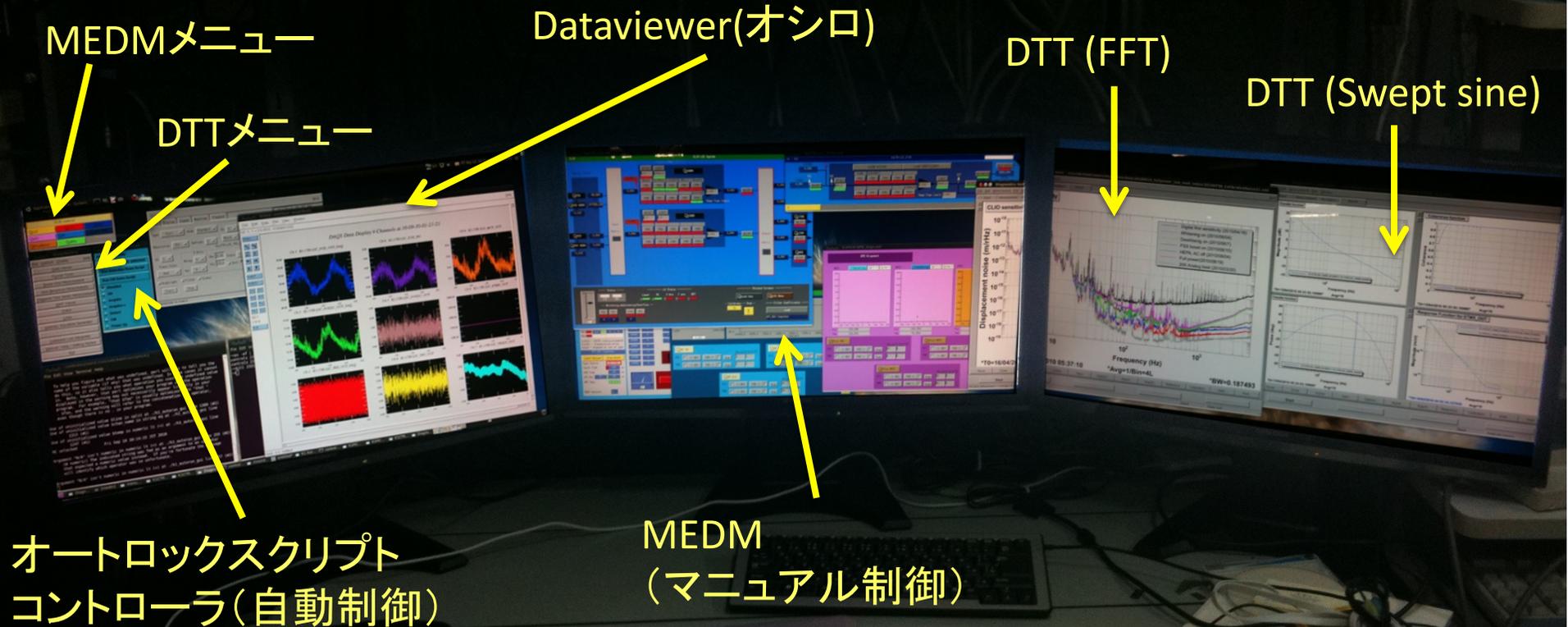


- ロックすると1になるようにPDのゲインを調整してある
- ロックしたときに、割り算した信号と生の信号のゲインが同じになり、切り替えが容易になる

透過光最大時の80%を超えると、反射光での規格化に切り替わる、そのためPDへの入射パワーが変わってもゲインを自動的に調節する

透過光最大時の20%を超えると制御信号を出す

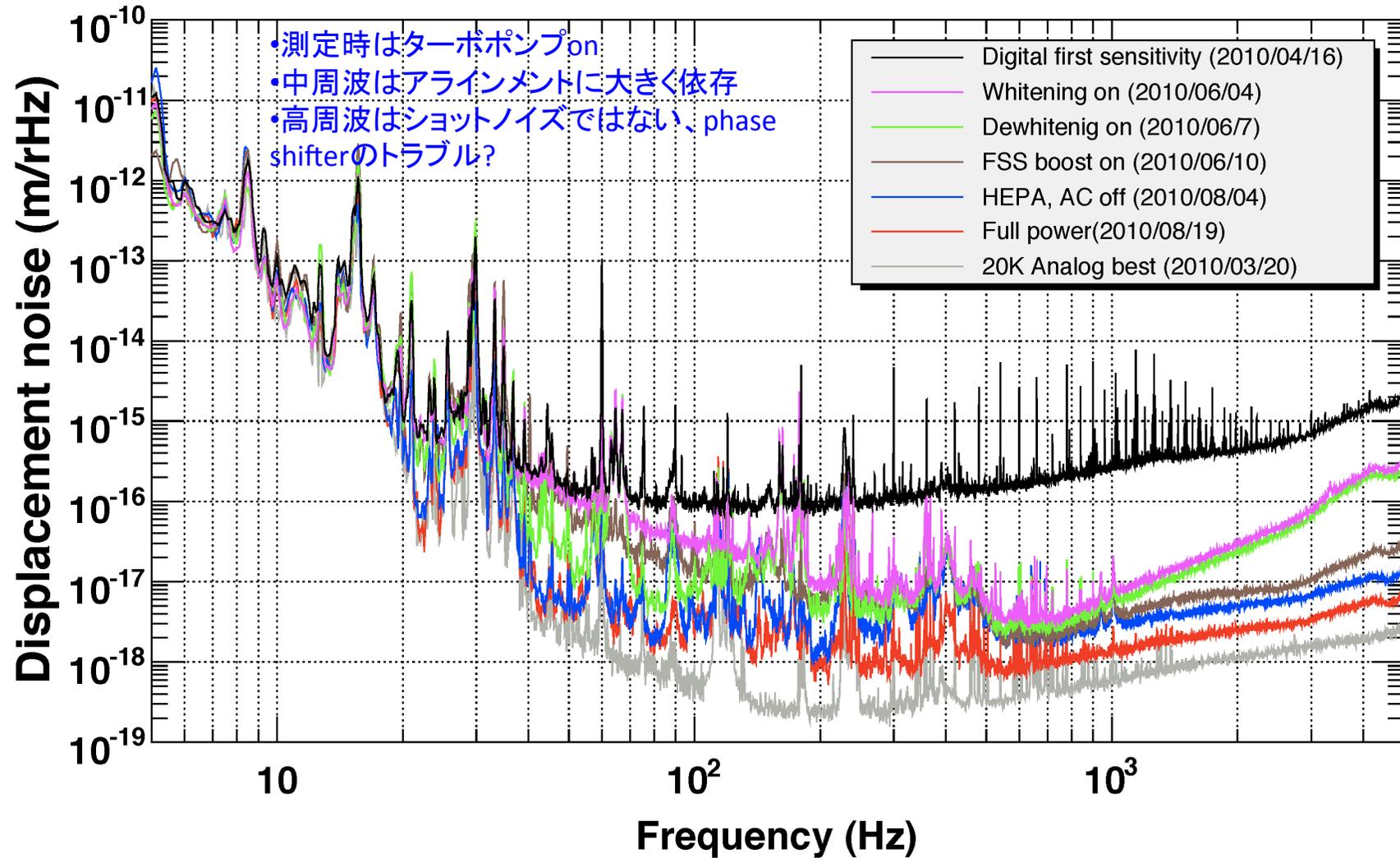
# Client system



- スクリプトにより自動でロックし、測定、改善するという体制ができつつある

# Digital制御での現CLIO感度

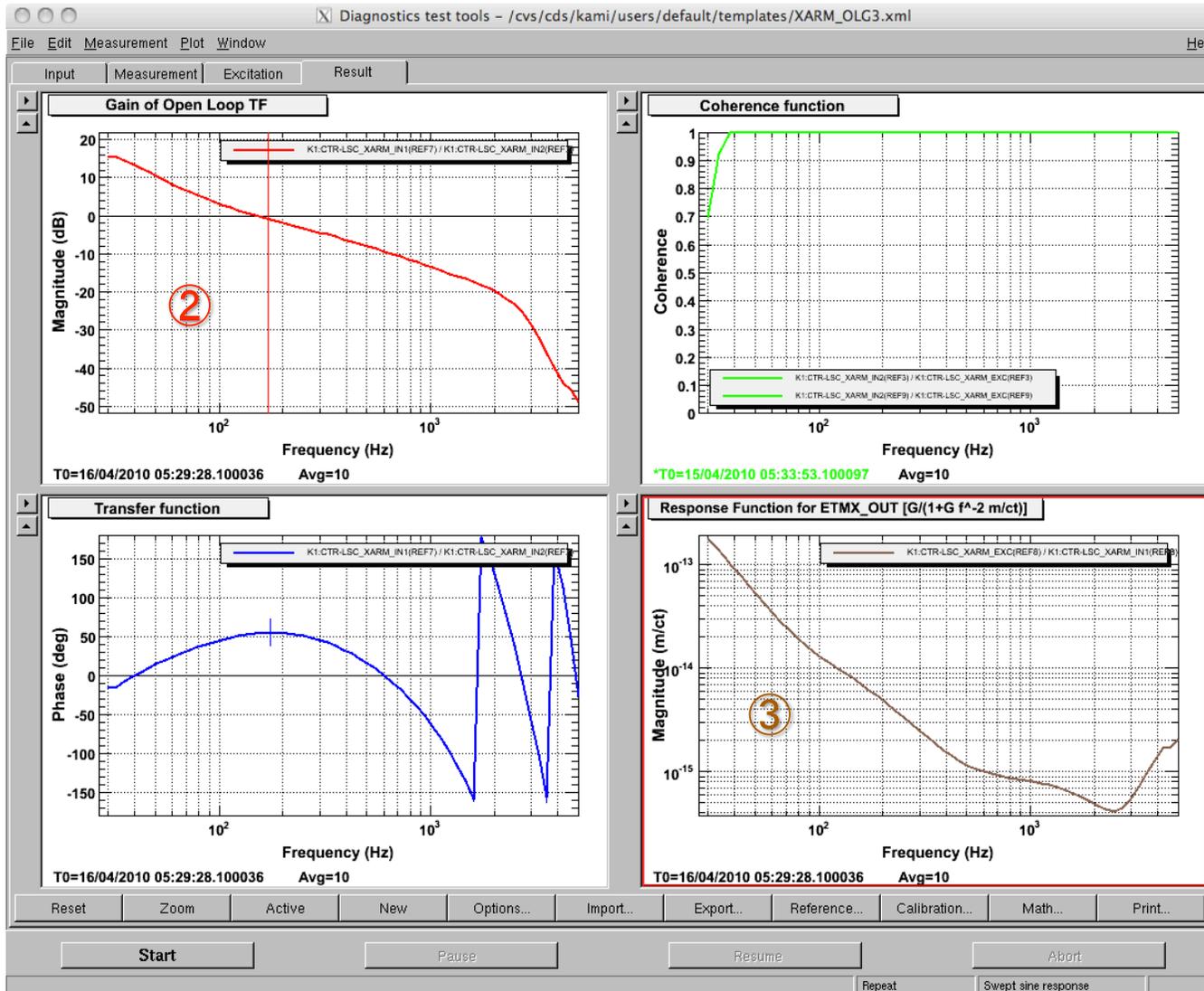
## CLIO sensitivity



\*T0=16/04/2010 05:37:10

\*Avg=1/Bin=4L

\*BW=0.187493



1. ロック中、サスペンションアクチュエータ直前のノイズ①をデジタル内で測定

2. Open loot TF: Gを測定②

3. ②を  $(1+G)/G \cdot f^2 - 2 \cdot m/ct$  に変換③

4. Calibrated noise: ① \* ③ (前ページの図)

5. 次回以降CalibrateしたいときはUGFを常に同じになるように制御ゲインを調整すればよい

→ 常時感度モニタの実現

- UGFより低い周波数ではフィルターの形を任意に変えてもOK(高い周波数を変えたらOLTFの再測定)
- ノイズ測定ポイント以前ではゲインを変えても構わない(測定点以降のゲイン変化は補正が必要)



## PDへフルパワーを入射したときの問題点

1. PDへ小さいパワーを入れてロック(サチるのを防ぐため)
2. ロック後、PDへの入射パワーを増加(S/Nを良くするため)
  - ところが、PDフルパワー入射する際、ある一定パワー以上でノイズが大きくなり、更に上げるとロックが落ちてしまう
3. Mixerの時点でわずか $\pm 130\text{mV}$ の出力でサチっていることが判明
4. ロック時パワーを増やしていくとError信号のRMSが $\pm 130\text{mV}$ を超えてしまって、フルパワーまで持っていけない

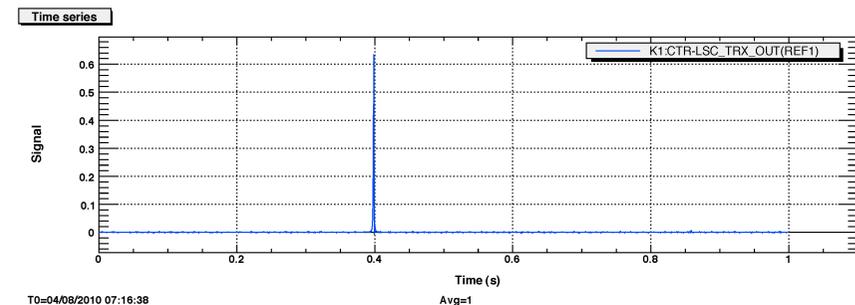
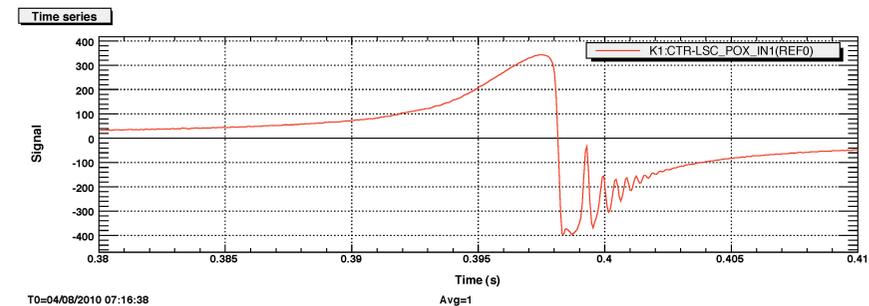
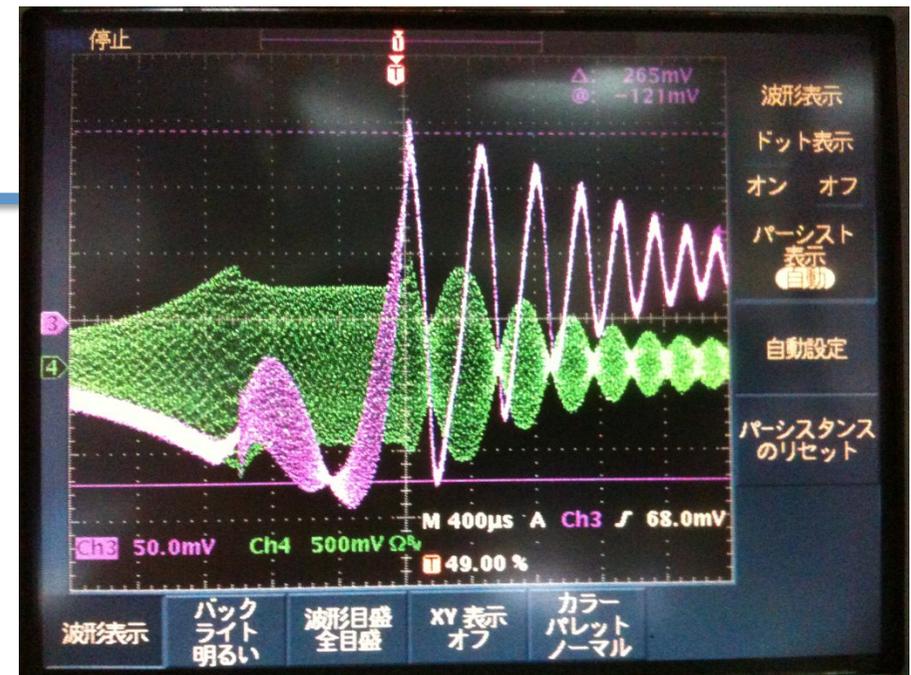
### 解決策:

1. PDのゲインを下げる
2. Mixerをもっと出力の大きい物に変える
3. Modulation indexを下げる(今回はこれ)

疑問:でもなぜアナログでは問題なかったのだろうか?

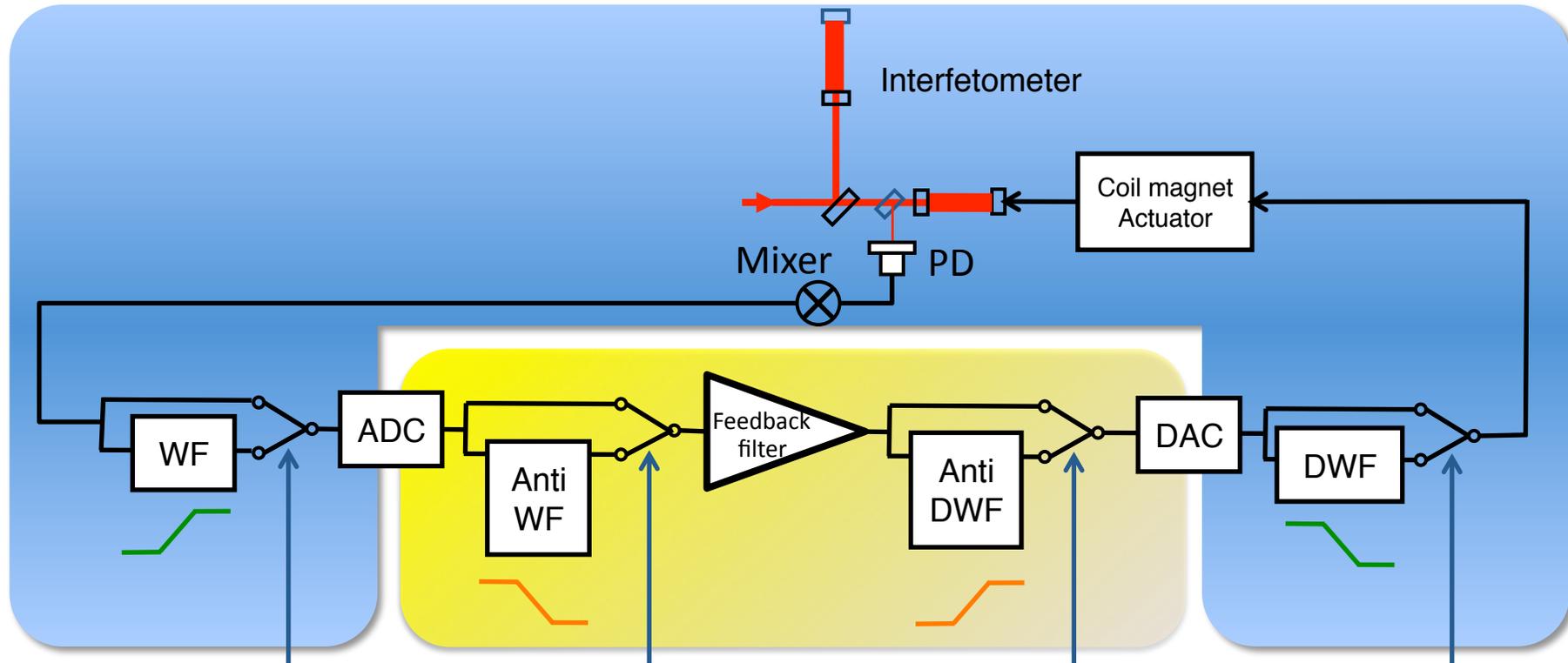
解: DigitalのUGF:170Hz, AnalogのUGF:550Hz;  
280Hzに大きなピークが有り、RMSを制限しているが、DigitalではUGF以上なのでつぶせない

UGFを高く取れないDigital固有の問題点の一つ





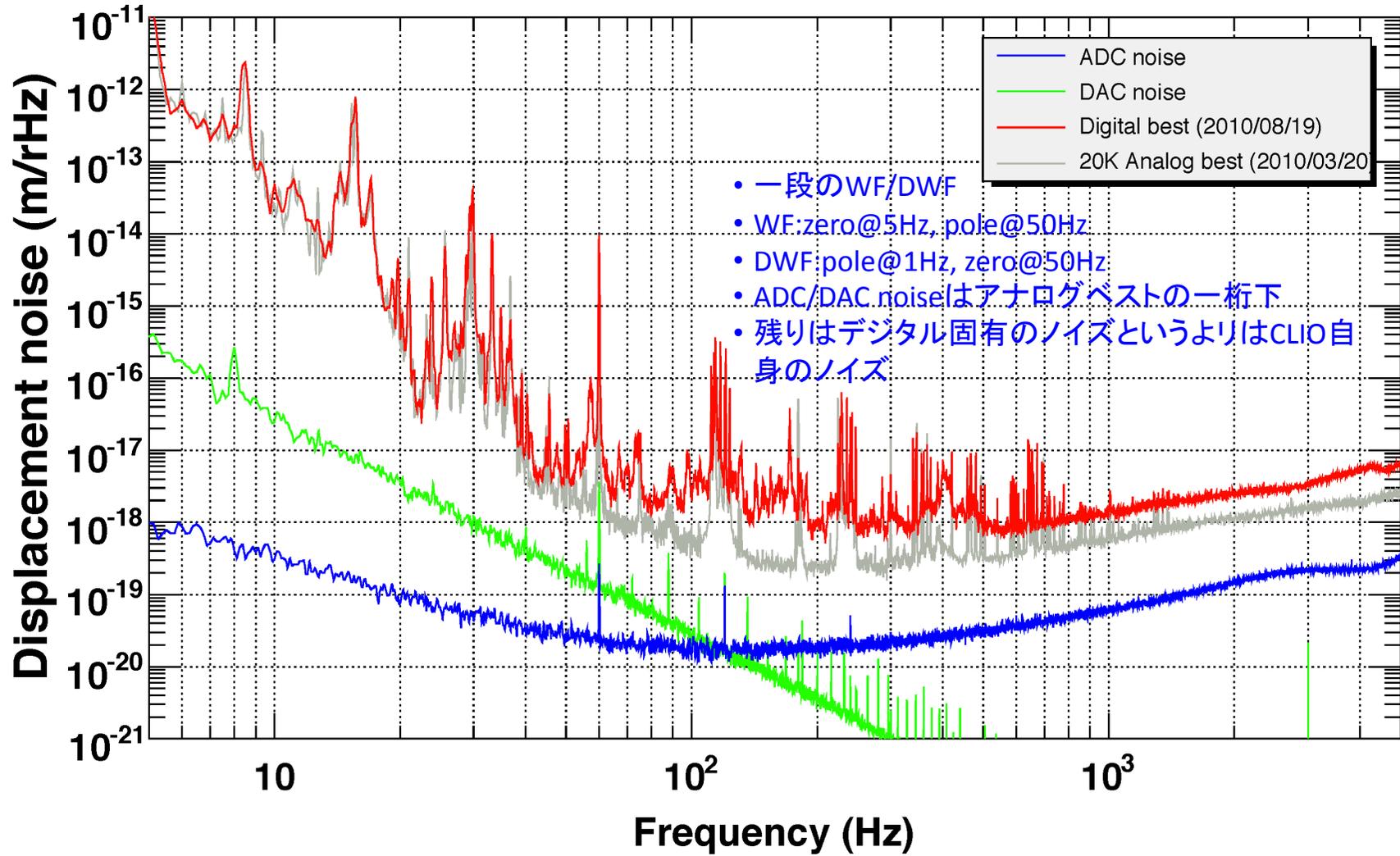
# Switching Whitening/Dewhitening filter



- AnalogのfilterとDigitalのAnti filterがロック中に同時にオンになる  
→WhiteningとDewhiteningの形を合わせる必要がない  
→WhiteningとDewhiteningを同時に独立にon/offできる

# AD/DAC noise

## CLIO sensitivity



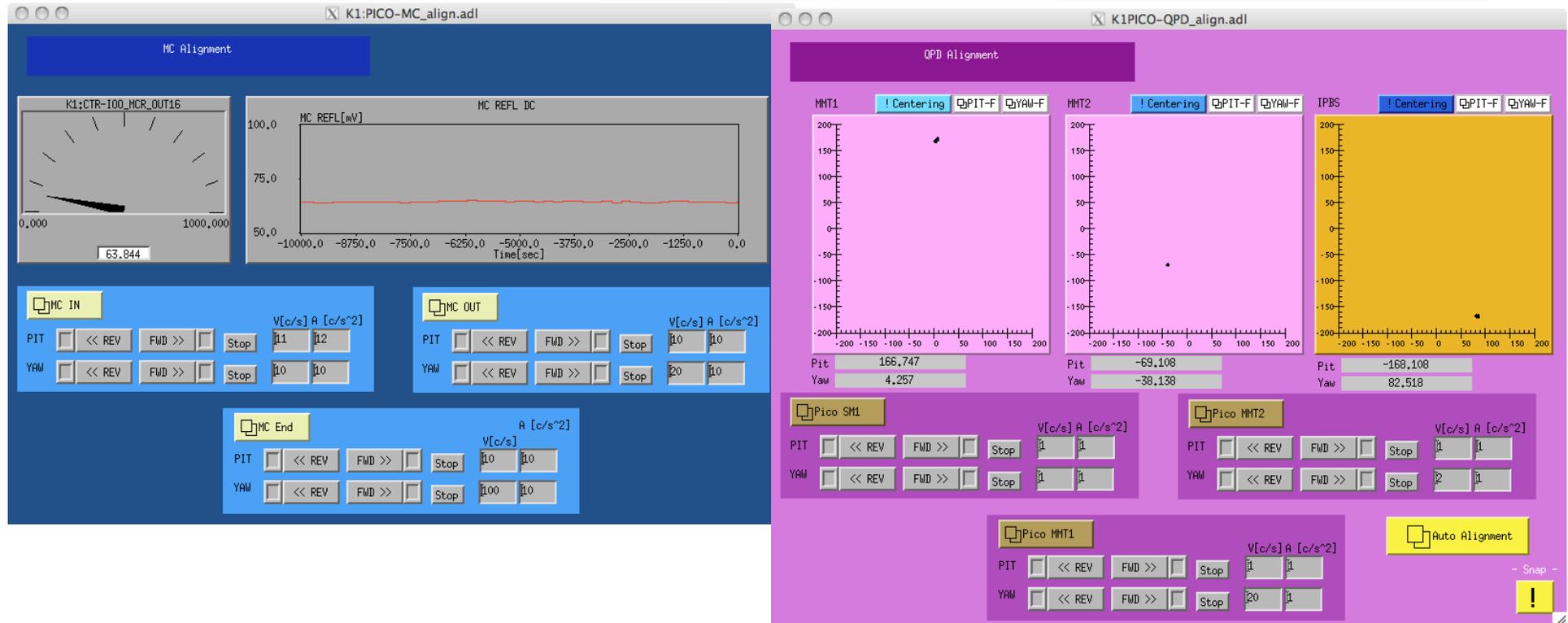
\*T0=08/09/2010 01:16:38

\*Avg=17/Bin=4L

\*BW=0.187493



# QPDを利用した自動入射ビームアライメント



##MMT1 QPD centering

#pitch

```
python /cvs/cds/kami/scripts/AutoAlignment/DitherAlignment.py --freq 5 --excGain 0 --fbGain 0.1 --readBackChan "K1:CTR-AIS_MMT1_PIT_OUT16" --feedBackChan "K1:PICO-SM1_PIT" --successCond 10 --fbWait 1 --timeout 120
```

#yaw

```
python /cvs/cds/kami/scripts/AutoAlignment/DitherAlignment.py --freq 5 --excGain 0 --fbGain 0.005 --readBackChan "K1:CTR-AIS_MMT1_YAW_OUT16" --feedBackChan "K1:PICO-SM1_YAW" --successCond 40 --fbWait 1 --timeout 60
```



# 開発状況のまとめ



- CLIO用デジタルシステムのLIGOとの共同開発の準備
  - Requirements
  - MOU
- Real time systemの開発
  - 計算機のセットアップ
  - ADC/DAC/Binary output等の入出力カードの準備
  - 制御対象にあわせたReal time codeを書く(Matlab上)
  - MEDMIによるGUIでのヒューマンインターフェースの準備
- AA/AI/Whitening/Dewhitening回路の初期開発、テスト、デバッグ、量産体制
- Lock acquisition
  - 光路長制御のMass lockのループを完全にDigital制御で置き換え完了  
信号→whitening→AA→ADC→Real time PC→DAC→AI→Dewhitening→Actuator
  - 線形化、入射パワーによる規格化などのAdvanced lock
  - MCロックアクイジションのスク립ト化
  - 一本目の腕まで含めた、フルオートロックシステム
- Calibration、常時感度モニタ
- Whitening/DewhiteningによるADC/DACノイズの低減
- CLIOレベルの感度で実用的に稼働可能かどうかのチェック
- アライメント
  - Pico motor driverの開発
  - QPDオートセンタリングシステム
  - 初期フルアライメントシステム(腕を含む)
- 温度、湿度、ダスト、音、地面振動などのSlow信号モニター(年単位のデータ蓄積)
- オートNoise Budget
  
- その他R&Dへの応用 → LSPIの制御にも使用(齊藤君の発表)

第0 phase

第1 phase

第2 phase

第3 phase



## LCGTのために必要なこと



- 複数台での拡張ボックスのテスト (CLIO手持のものでテスト可能)
- 複数台でのPCでのテスト (CLIO手持のものでテスト可能)
- タイミングシステム
  - Columbia大の協力で、aLIGO用のものを手配できる予定
- 解析ソフト (主にリアルタイム)
- 観測試験
  - ↑----- CLIOでのゴール -----↑
  - ↓----- CLIOではできないこと -----↓
- 3km先に飛ばす技術の開発
  - 方式の候補はいくつか挙がっているが、まだ決定的ではない
- どこまでのチャンネル数に対応するか (1024ch程度を想定)
- 大規模データストレージシステム
- RSEに対応できるか

LCGTの各要素技術開発でデジタルシステムを早くから融合できるよう、CLIOと同様のものを5セット程度開発し、配分する予定である



## Summary



- デジタルシステムでCLIOのMass loopをロックした後、キャリブレーション、常時感度モニタ等を開発した
- ロック中のWhitening/Dewhiteningの切り替えに成功し、ADC/DACのノイズを実効的に下げることができた
- 少量のPD入射パワーでロックし、ロック後入射光をフルパワーにする過程で、入射パワーで規格化するためゲインを自動補正できる
  
- Digital controlを使い、アナログで出したCLIOのベスト感度の2倍から、一桁くらいのところまできた、残りはむしろCLIO固有のノイズである
- デジタル固有のノイズハンティングは、ほぼ終了したと考えていい
  
- その他、オートアライメント等の各種自動化、ノイズハンティング手法の開発等は引き続き行う
- 将来的には量子測定やシリコン鏡を使った干渉計の制御にも役に立つことになる
- CLIOで開発した技術はそのままLCGTへと適用できるため、今後も**LCGTのプロトタイプとして開発を続けていくことが大切である**