

干渉計型重力波検出器TAMA300

開発の現状 XVIII (干渉計開発)

国立天文台, 東大天文^A, 東大宇宙線研^B, 東大地震研^C, ピサ大^D,
カリフォルニア工科大^E, コロンビア大^F, 東工大^G, 情報通信研^H,
東大理^I, 東大新領域^J, 阪市大^K, 電通大^L, TAMA Collaboration^M

新井宏二, 辰巳大輔, 和泉究^A, 高橋竜太郎, 我妻一博^B, 荒瀬勇太^A,
福嶋美津広, 山崎利孝, 石崎秀晴, 高森昭光^C, A.Bertolini^D, R.DeSalvo^E,
佐藤修一, 麻生洋一^F, 阿久津智忠^A, 常定芳基^G, 長野重夫^H, 安東正樹^I,
三代木伸二^B, 森脇成典^J, 神田展行^K, 武者満^L, 藤本真克, 川村静児,
三尾典克^J, 大橋正健^B, 黒田和明^B, 坪野公夫^I, TAMA Collaboration^M

Overview

●低周波防振装置SASを用いた干渉計稼働

これまで:

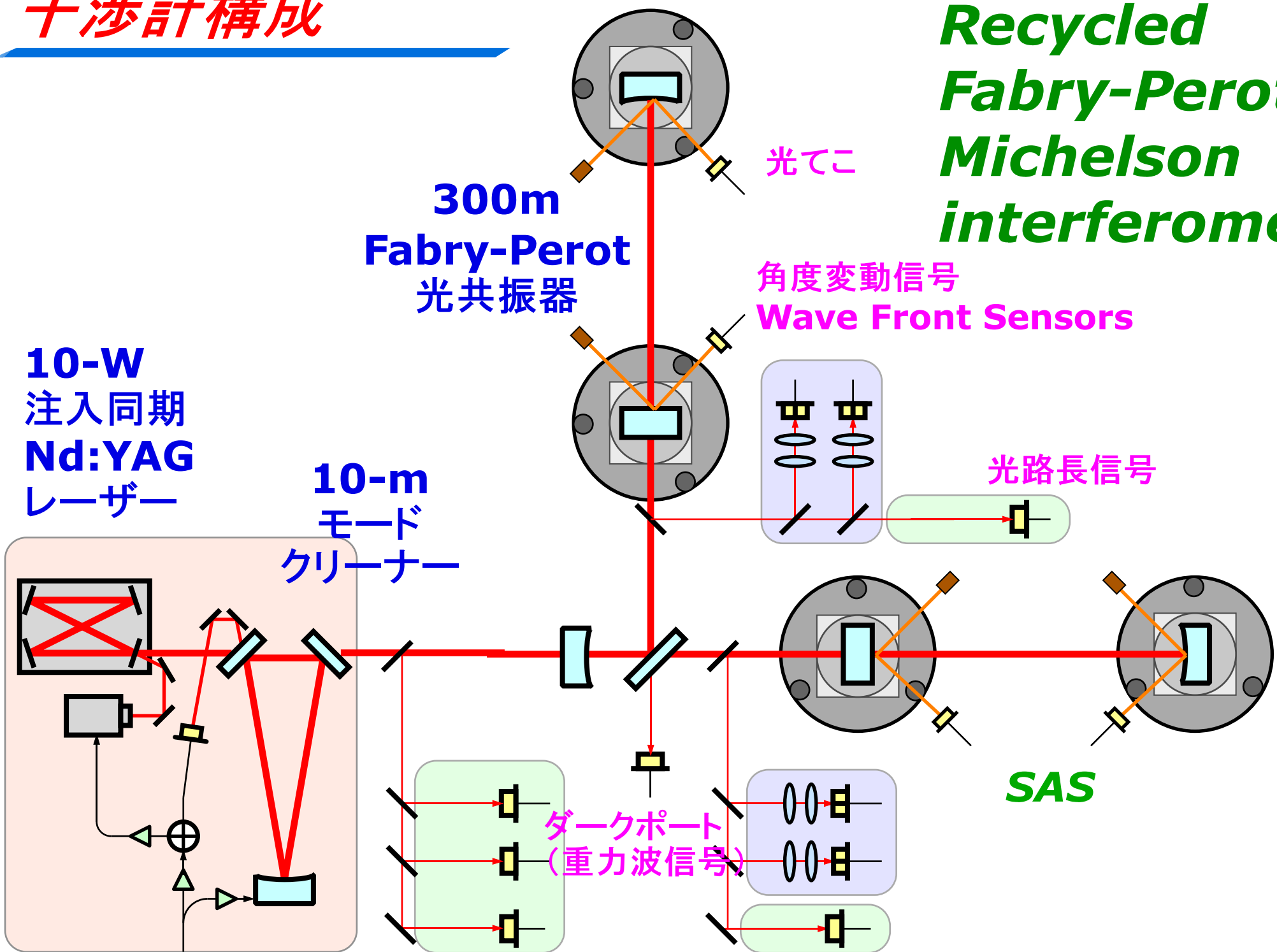
- ・4台のSASによるLocked Fabry-Perot干渉計の稼働

今回:

- ・加速度計を用いたSAS倒立振り子の安定化
IPローカル制御(我妻の発表) + 角度方向ローカル制御
角度・光路長方向の安定度
- ・Recycled Fabry-Perot Michelson干渉計の稼働

干渉計構成

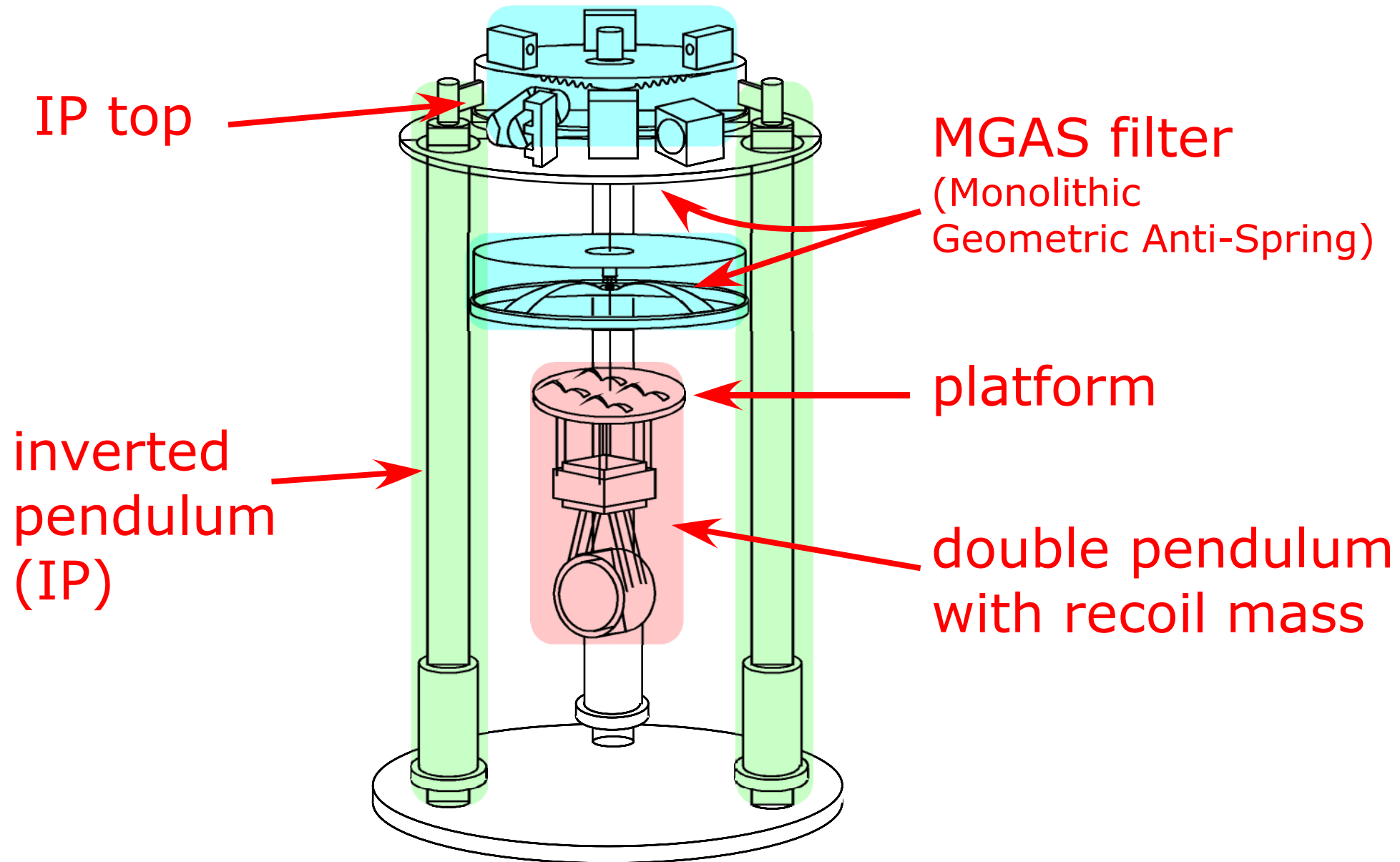
Recycled Fabry-Perot Michelson interferometer



Seismic Attenuation System

- **Structure of SAS**

Multiple pendulum suspended from IP



Seismic Attenuation System

● SASの能動制御

SASのローカル制御で鏡の光路長・角度変動を安定化

=> 干渉計のロックが可能になる

Local control

IP (対地面 変位)

センサー: LVDT
帯域: ~60mHz

IP (対慣性系 変位)

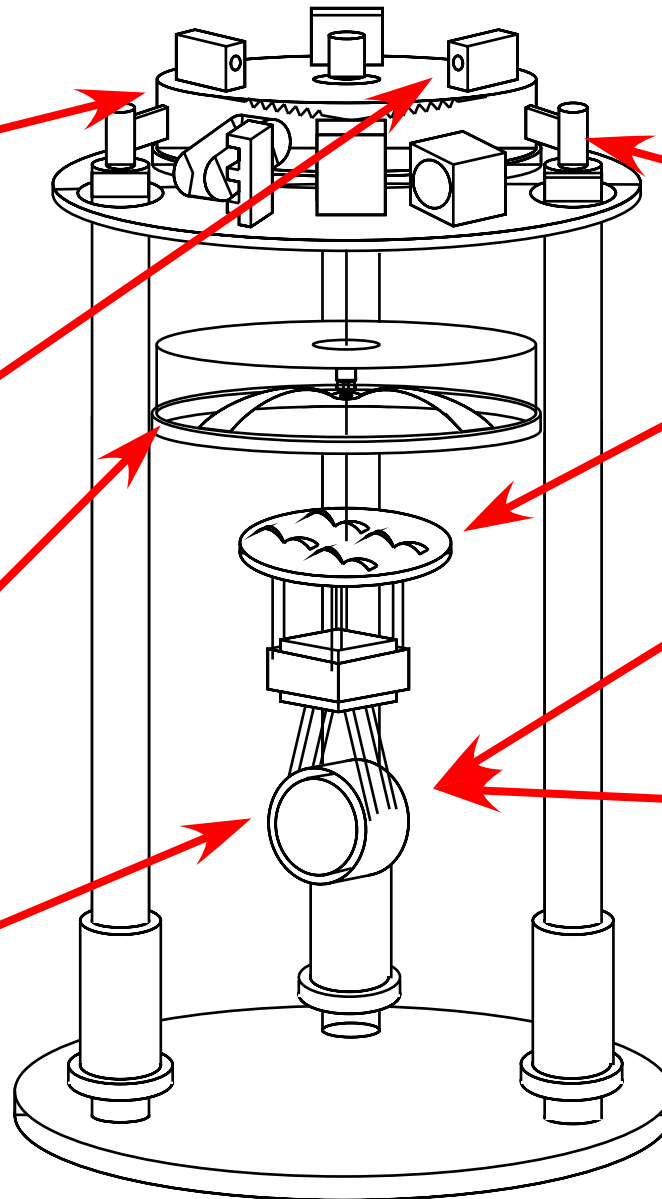
センサー: 加速度計
帯域: 60m~2Hz

ねじれ制御

センサー: フォトセンサー
帯域: 40mHz

テストマス角度制御

センサー: 光てこ
帯域: ~2Hz



Global control

IP

帯域: ~10mHz(予定)

Plat form

帯域: ~10mHz(予定)

テストマス角度

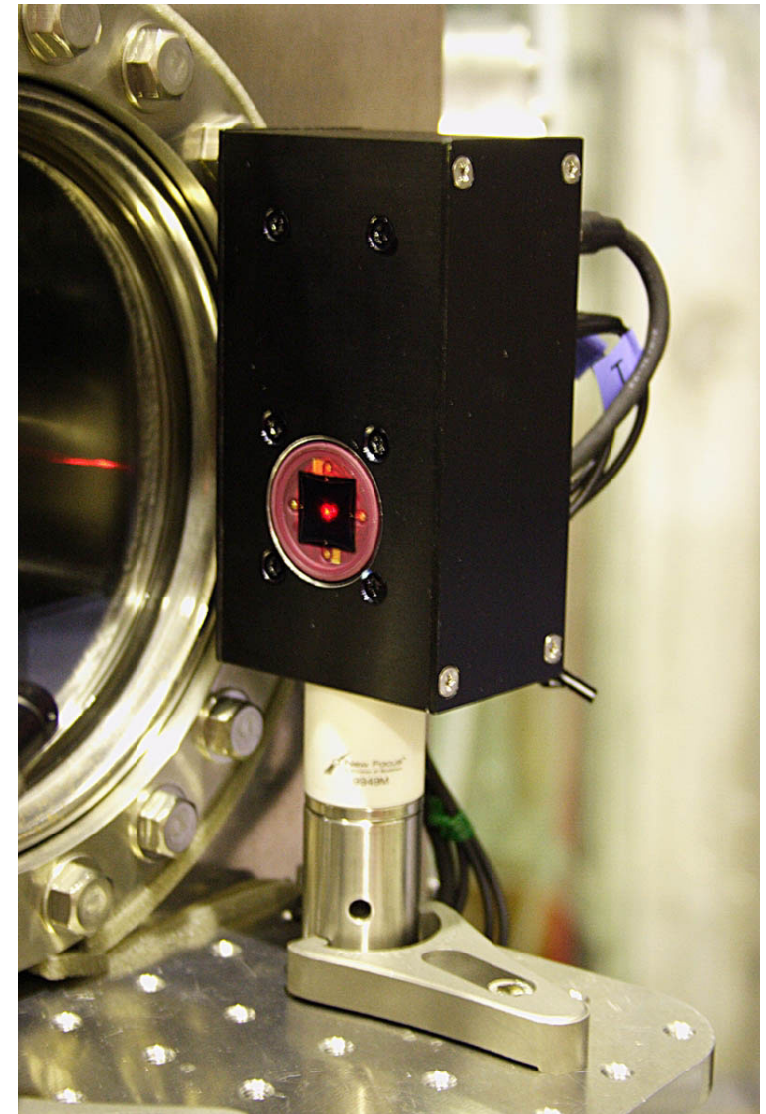
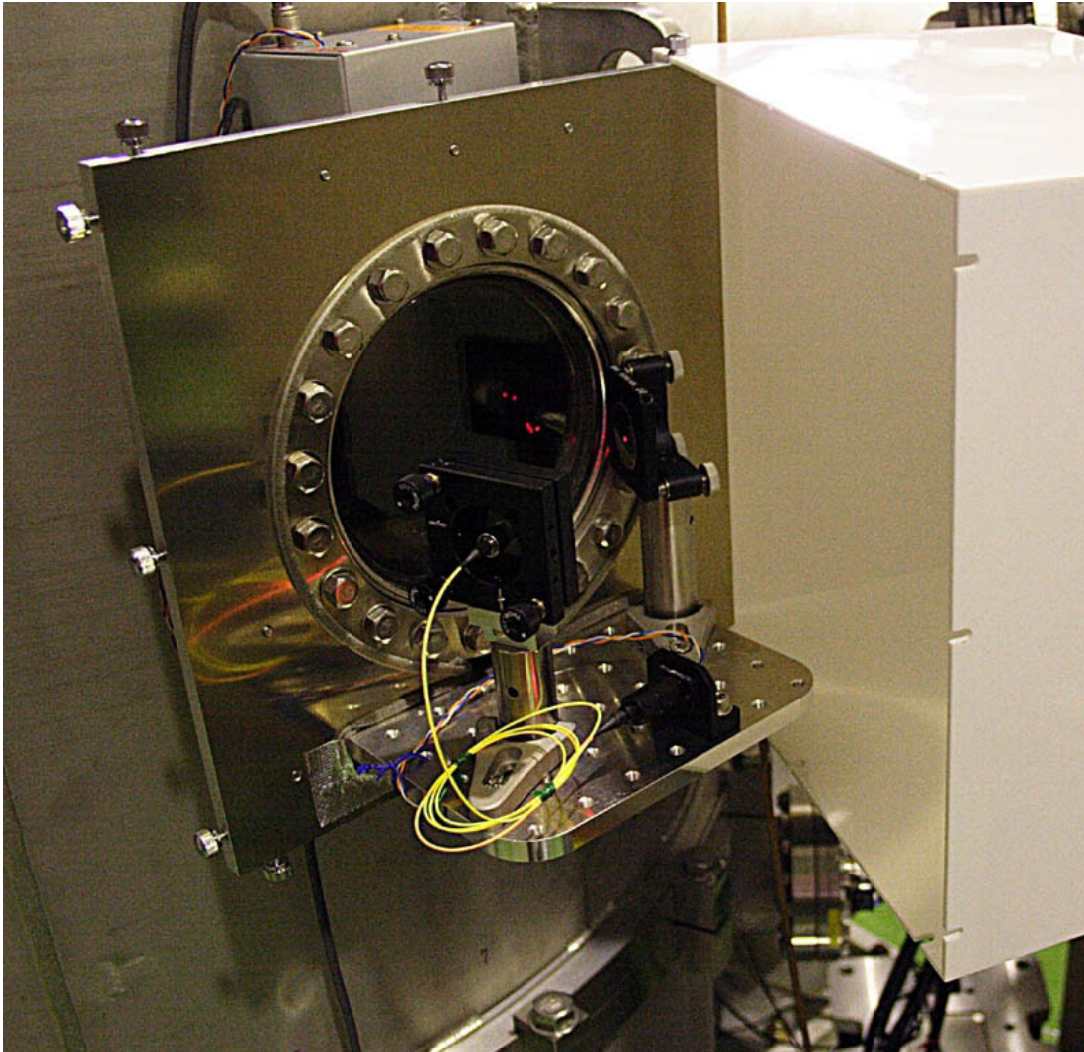
帯域: <3Hz(予定)

テストマス光路長

帯域: <1kHz

テストマス角度ローカル制御

- ダイオードレーザー
窓フランジに光学台を固定

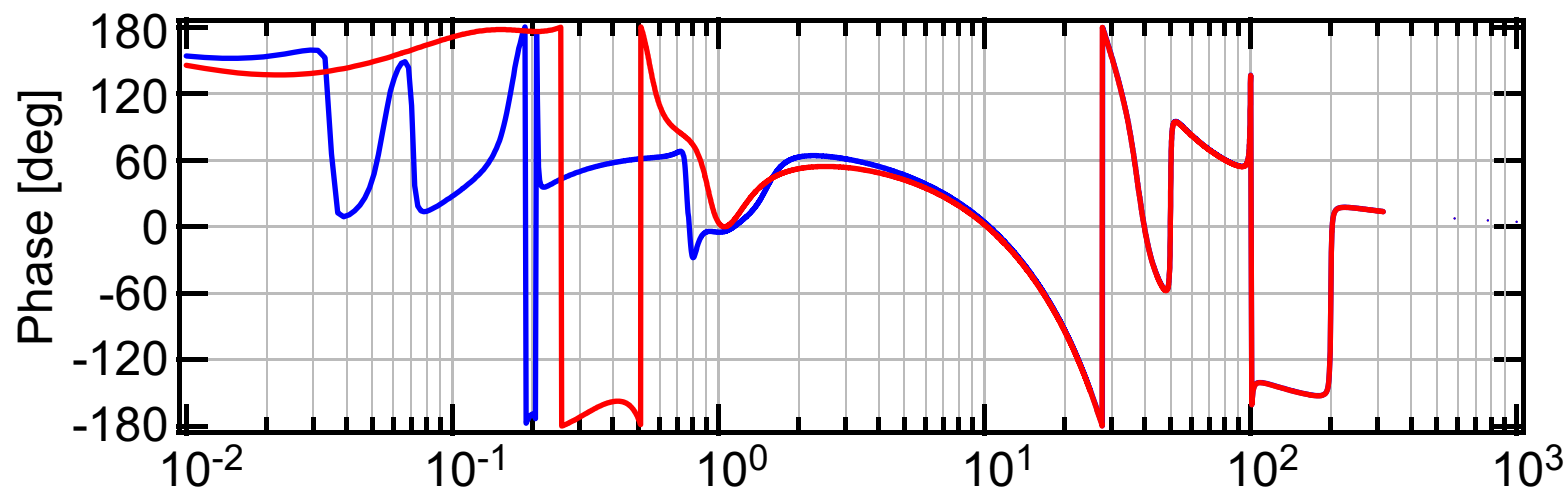
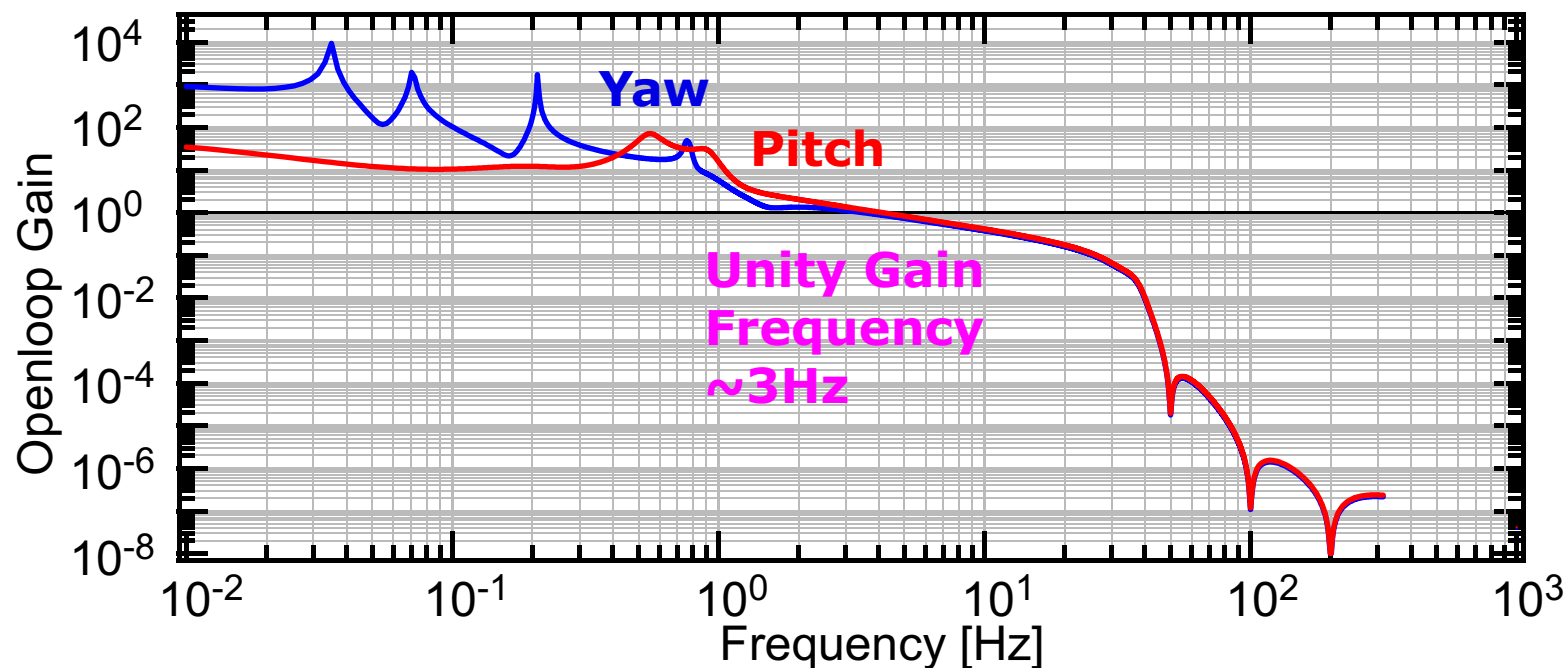


- スポット位置センサ
Aperture size: 12mm x 12mm

テストマス角度ローカル制御

● 角度制御サーボ

低周波の機械共振を安定化するために、フィルタに共振構造を持たせている
⇒ サンプル周波数1kHzのデジタル制御で実現(UGF \sim 3Hz)



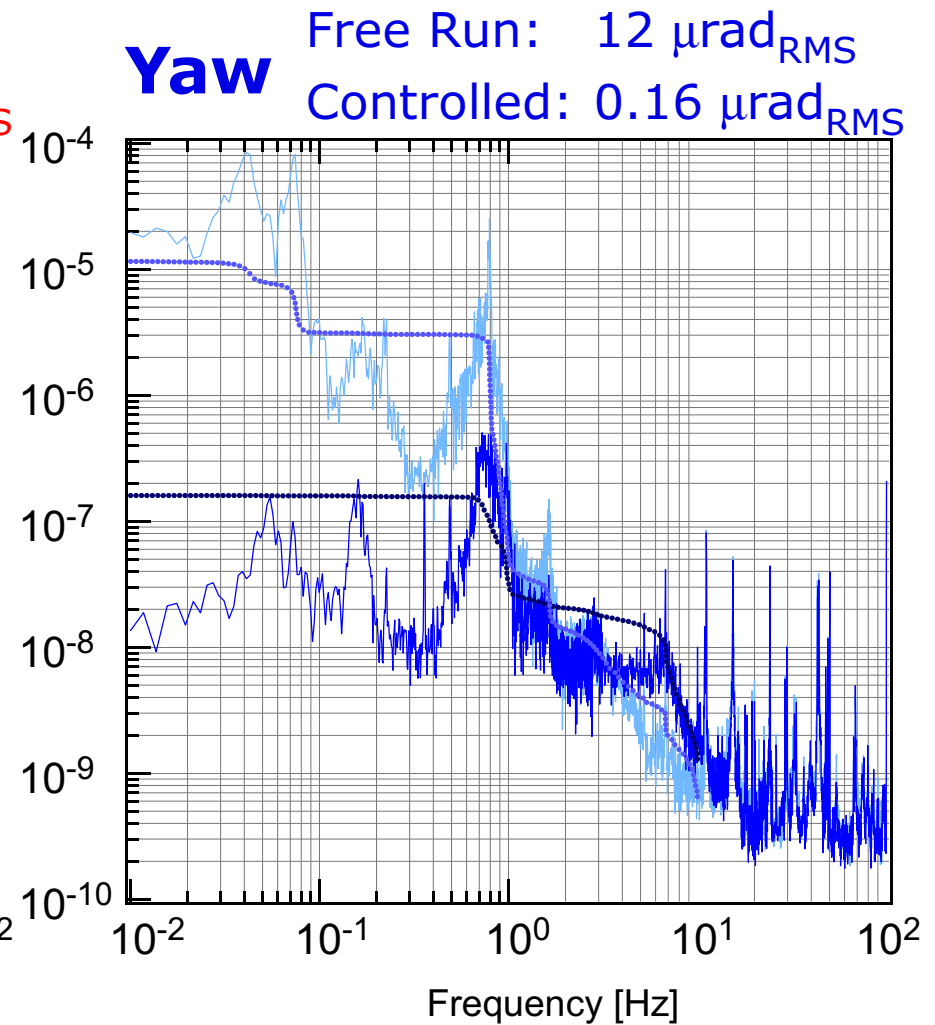
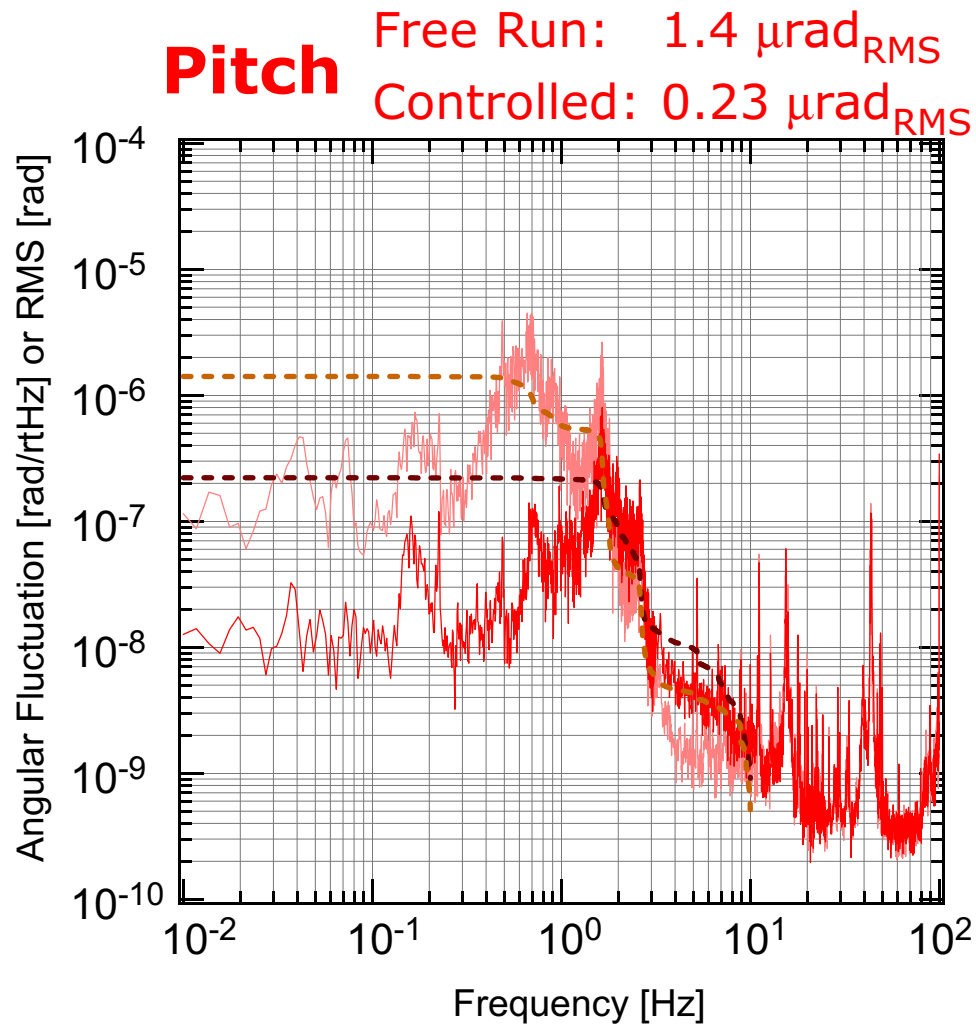
SASの安定度(角度変動)

●テストマスの角度方向安定度

ローカル制御により $\mu\text{rad}_{\text{RMS}}$ 以下までに安定化

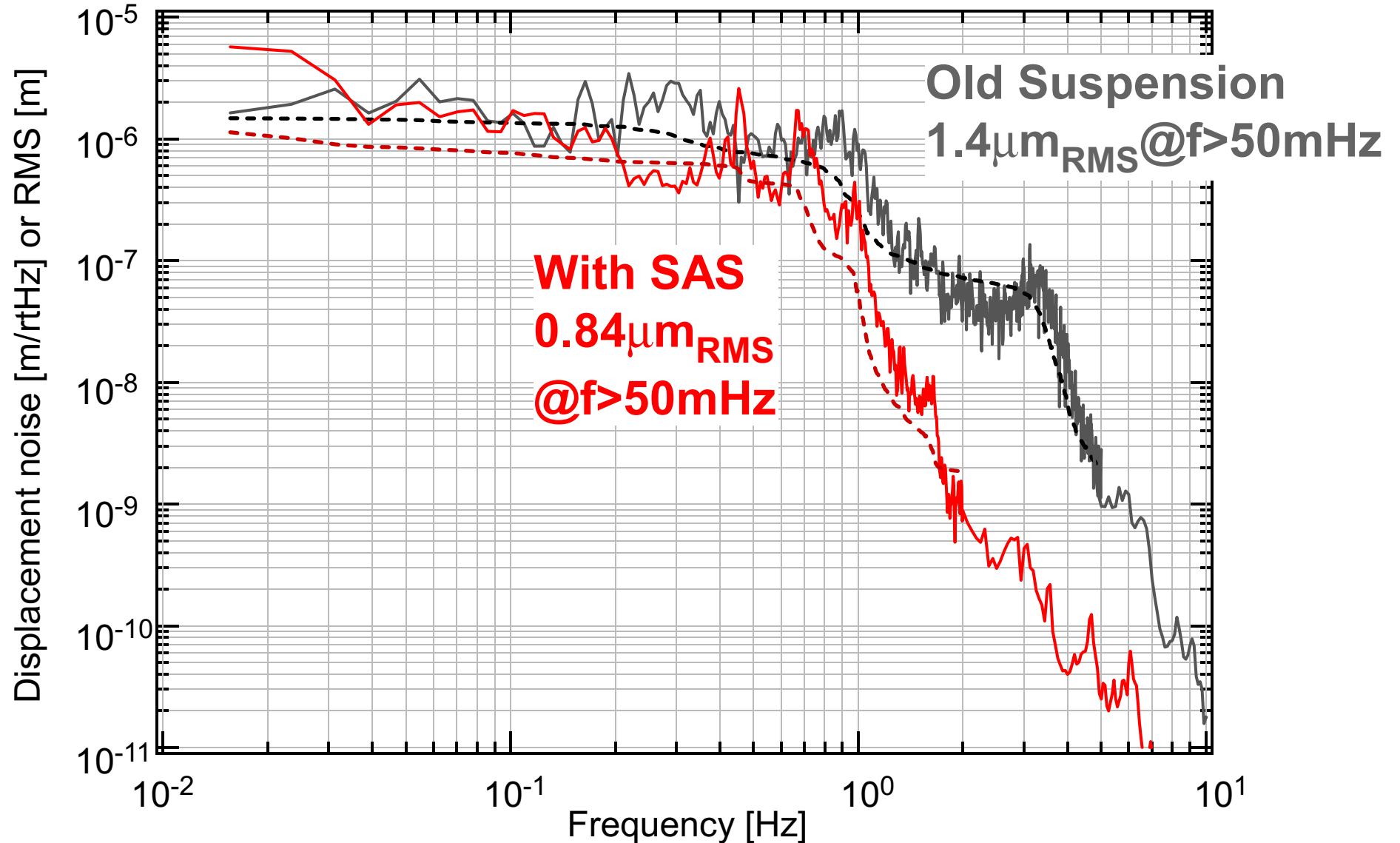
⇒リサイクリング干渉計のロックには十分

(旧サスペンションの受動防振性能 $1.0 \mu\text{rad}_{\text{RMS}}$)



SASの安定度(光路長変動)

- 片腕共振器の光路長変動
- 旧サスペンションでの変動との比較
- ⇒ 0.1Hz以上での改善を確認



リサイクリング干渉計の稼働

- 4台のSASを使ったリサイクリングのロックを確立

- 現在の制御の構成

テストマス光路長制御

光路長4自由度の制御: アナログ制御

ロックアクイジション: DSPを用いたデジタルフィルタ

=> ロック後アナログ系に切り替え

テストマス角度制御

LabViewによるデジタル制御

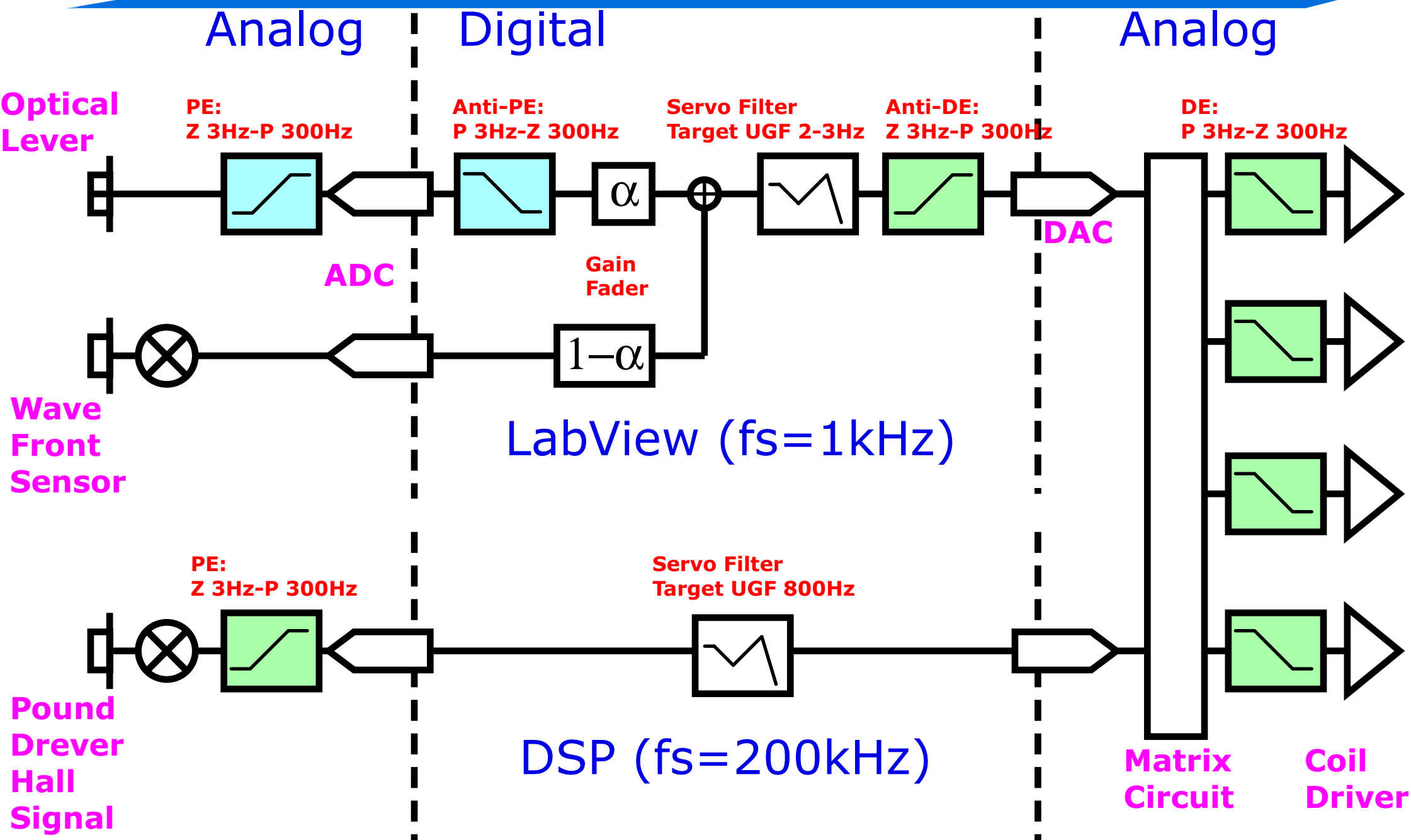
光てこ制御

帯域3Hz

Wave Front Sensing

光てこの制御点のドリフト制御(<~0.1Hz)

デジタル雑音の除去



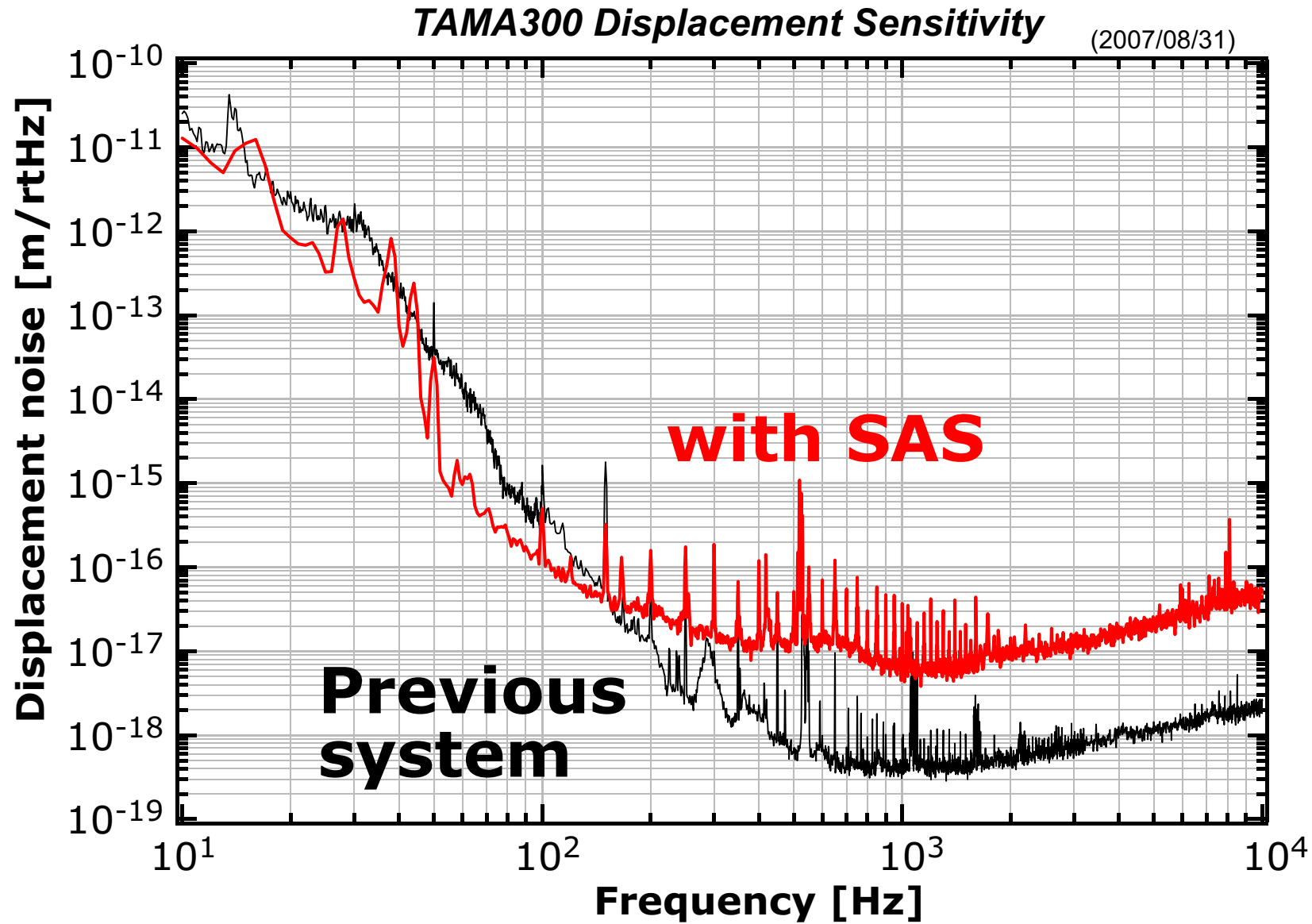
デジタル系の柔軟性を損なわずに雑音除去できる

干渉計の感度

●現在のリサイクリング干渉計の感度

フロア感度 6×10^{-18} m/rtHz@1kHz

150Hz以下で以前の感度からの改善を確認

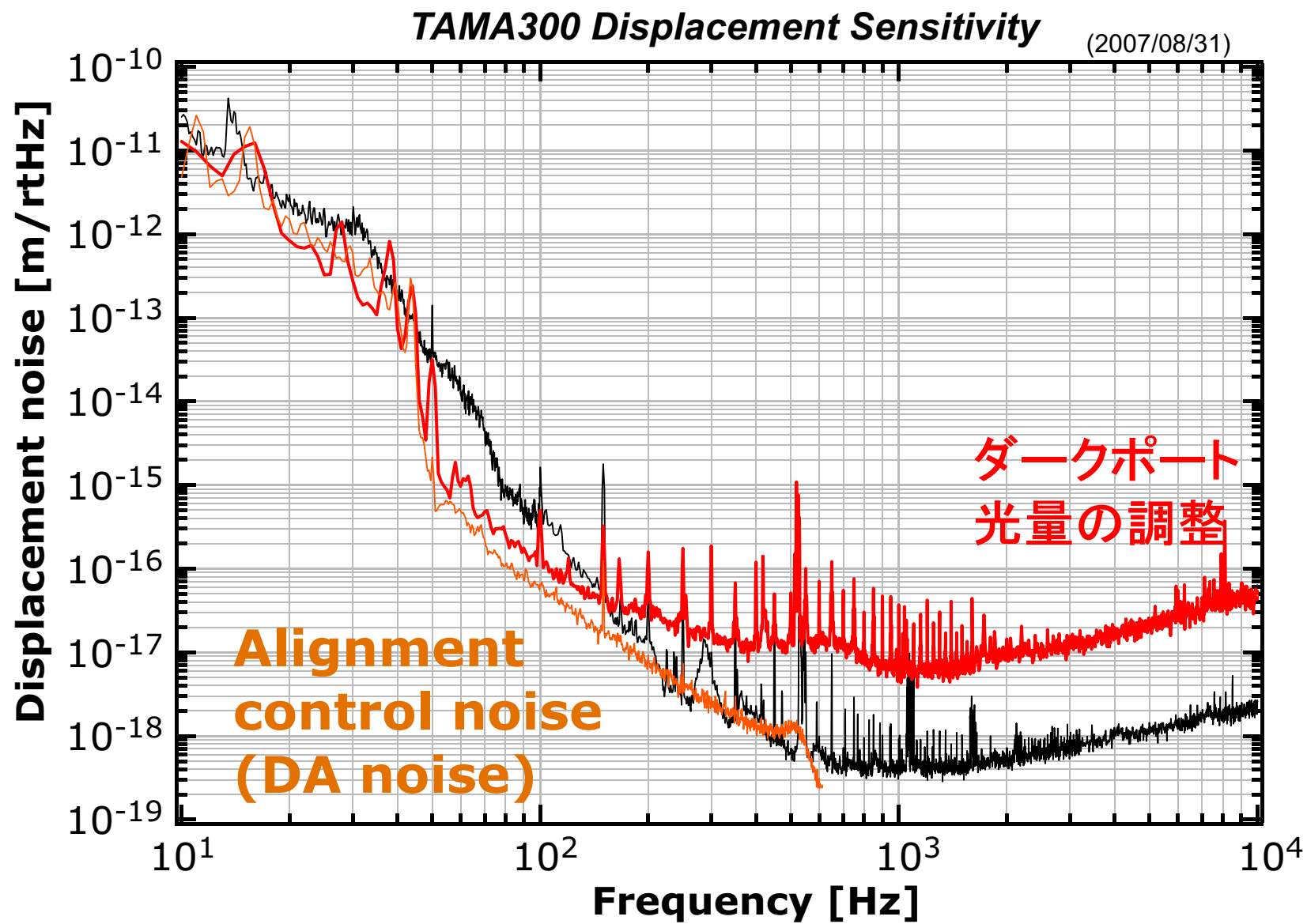


干渉計の感度

● 各種調整進行中

100Hz付近: まだアライメント雑音が落ちきっていない

kHz帯域: フルの光量がdark portに入射されていない



今後の方針

●感度と安定度の向上

- アライメント制御

WFSの利用

S/N比の向上・安定性の向上

入射光軸・RM・BSの制御を中心とするトポロジーへの変更

アライメント系DA雑音の低減

対策済 - 効果を確認する

- kHz帯

dark portの光量増加

コントラスト安定度の向上が必要

- ノイズ寄与測定

干渉計安定度の改善後、各種ノイズ源の寄与を調査

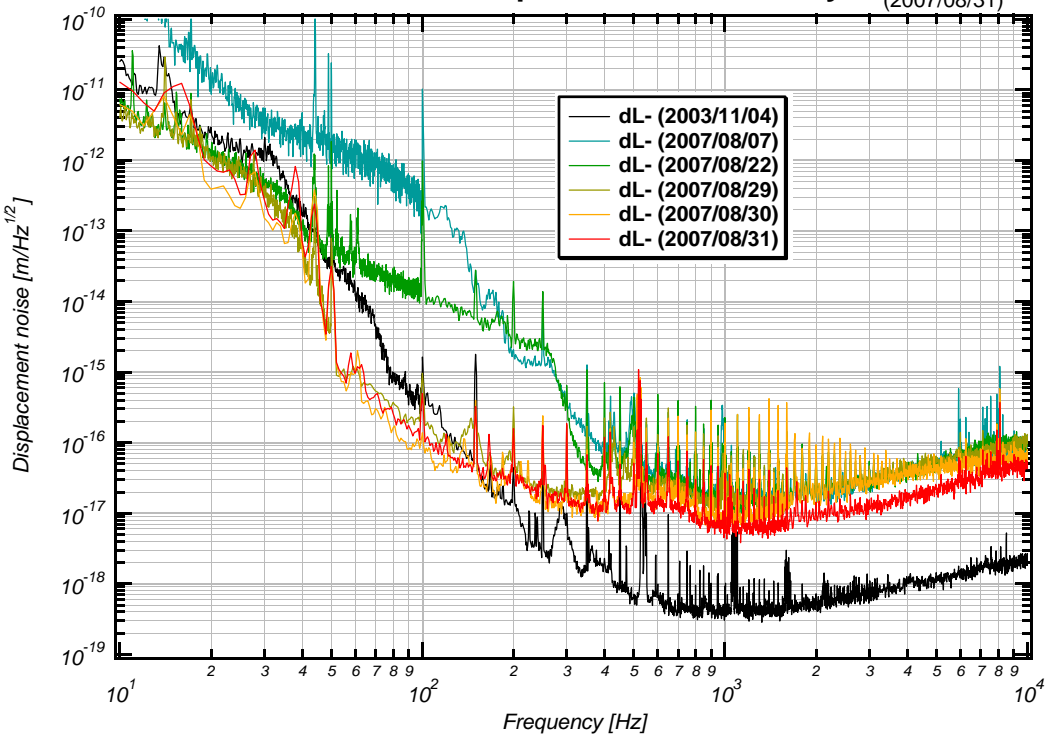
Summary

●TAMA300の干渉計動作

- SASが定常的な動作状態になった
⇒干渉計動作実験が可能な状況
- 各種干渉計サブシステムを順次立ち上げ中
⇒アライメント系を中心にさらなる作業や新しい設計が必要
- 部分的に感度の改善を確認
0.1～150Hzで改善

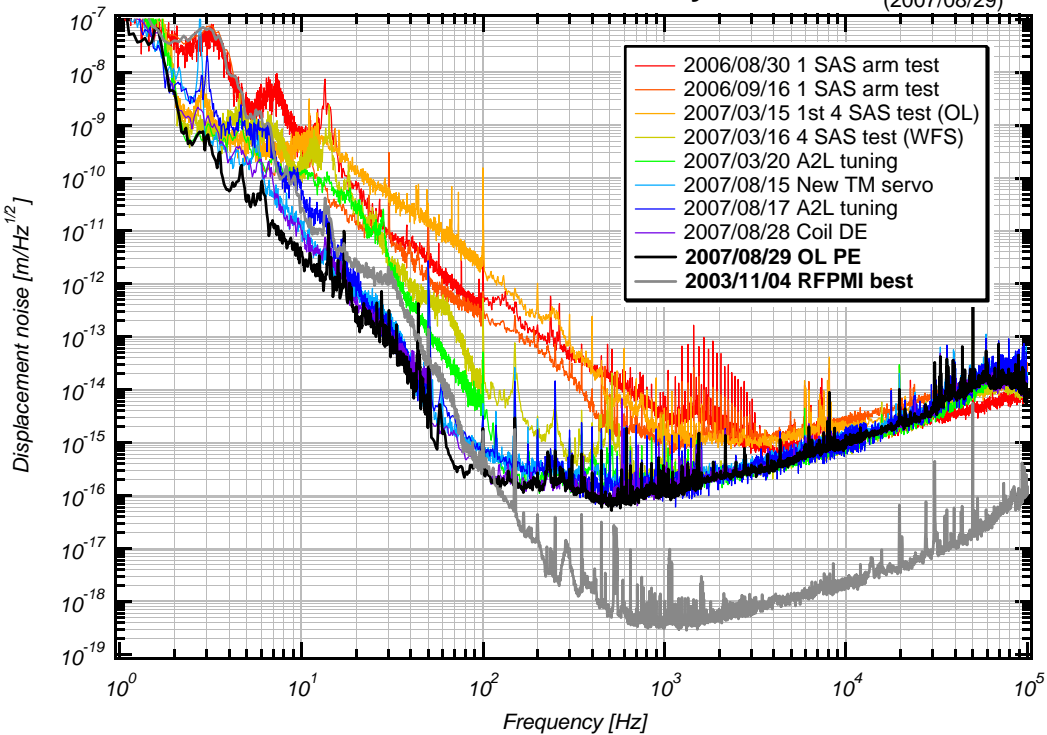
TAMA300 Displacement Sensitivity

(2007/08/31)



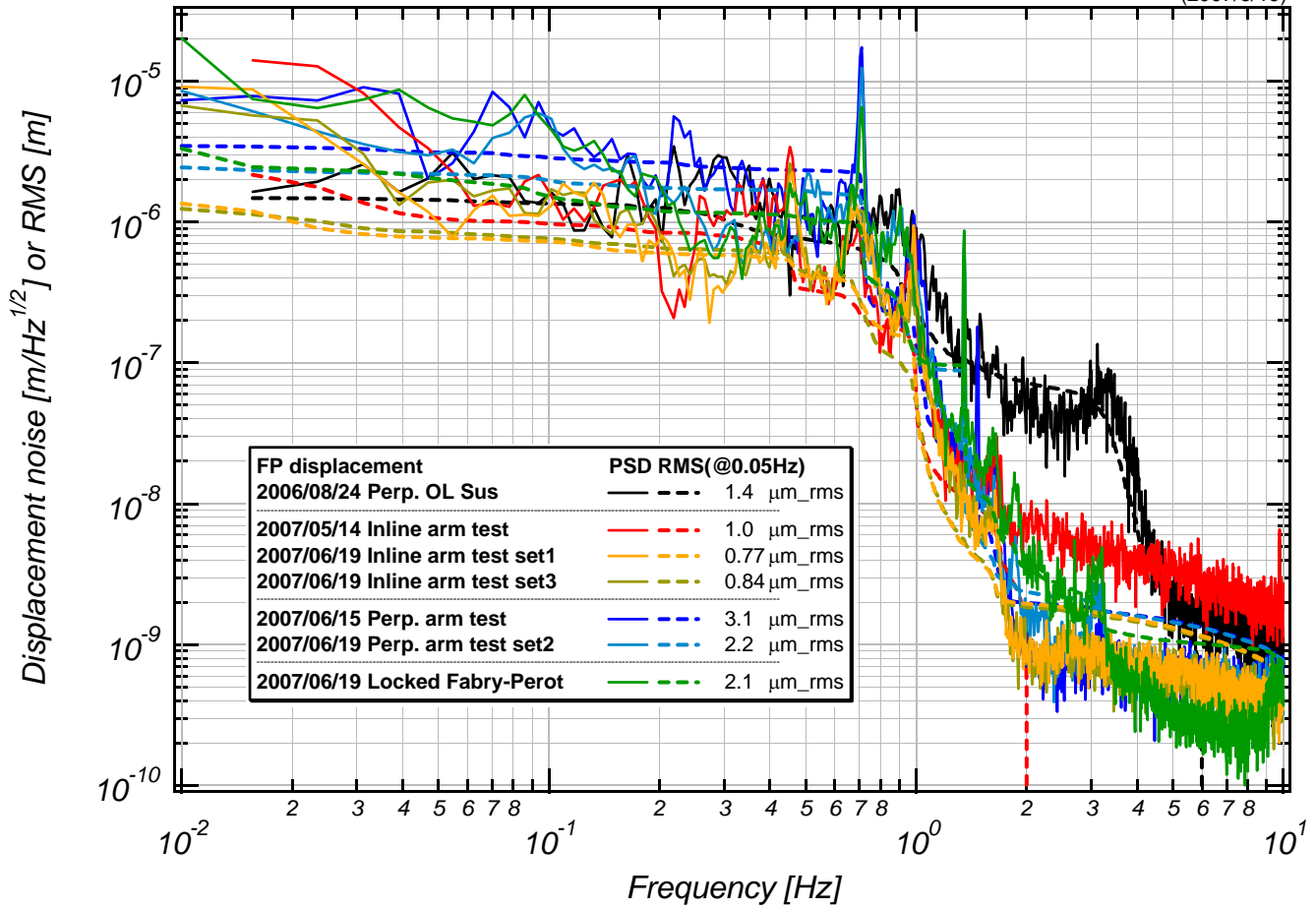
Locked FP Sensitivity

(2007/08/29)



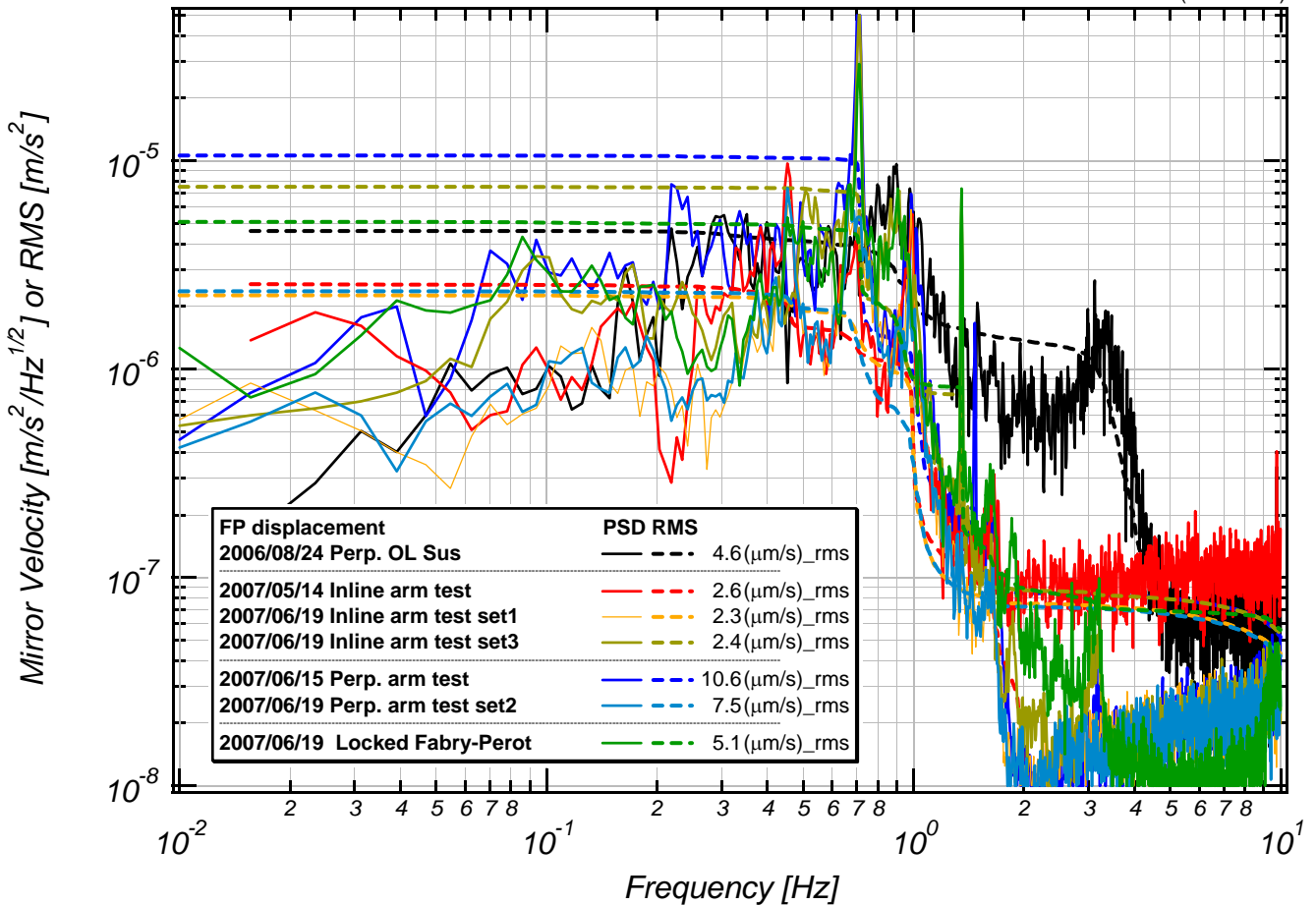
Displacement Noise measured by MCPZTfb & LFP

(2007/6/19)



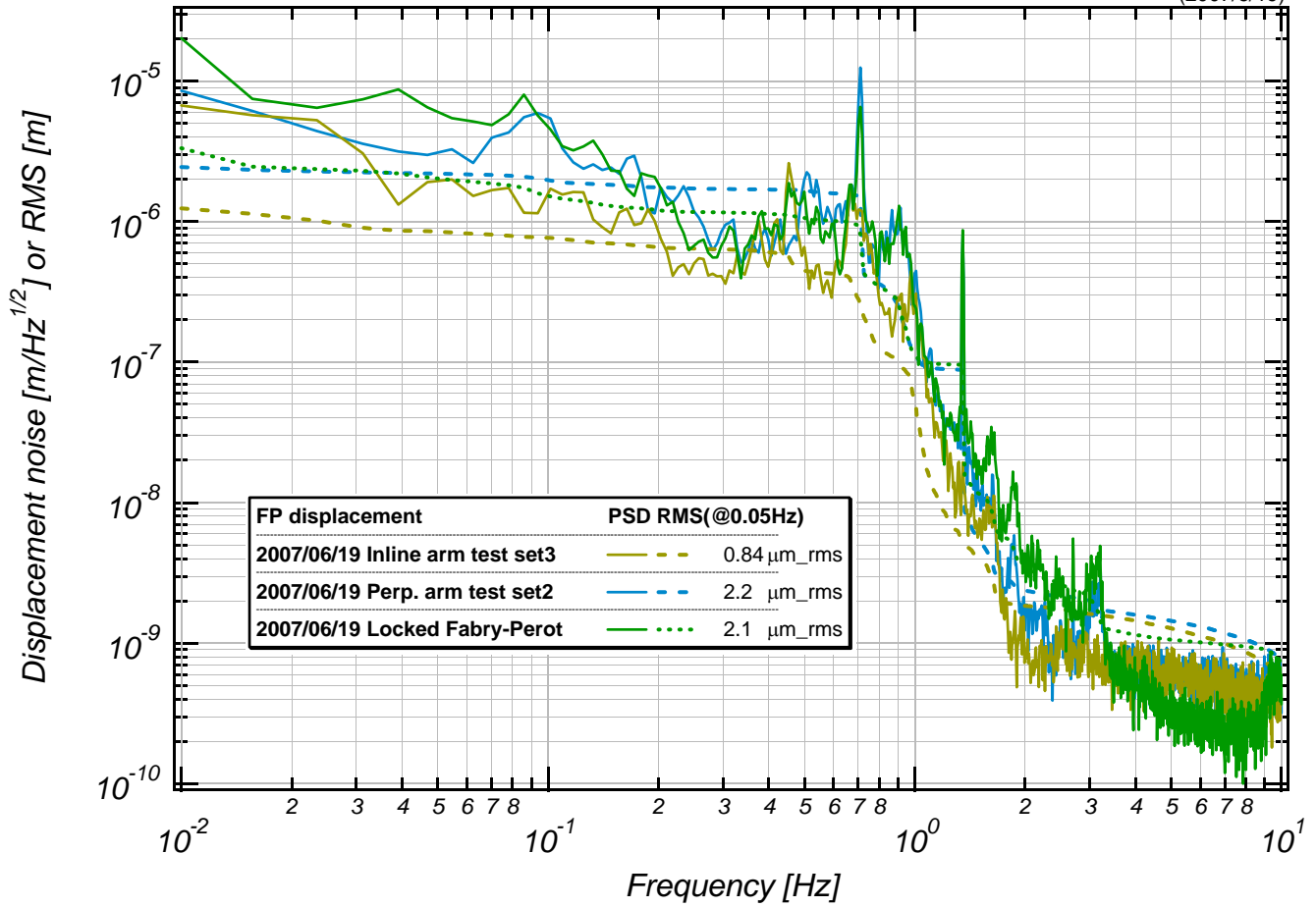
Mirror Velocity measured by MCPZTfb & LFP

(2007/6/19)



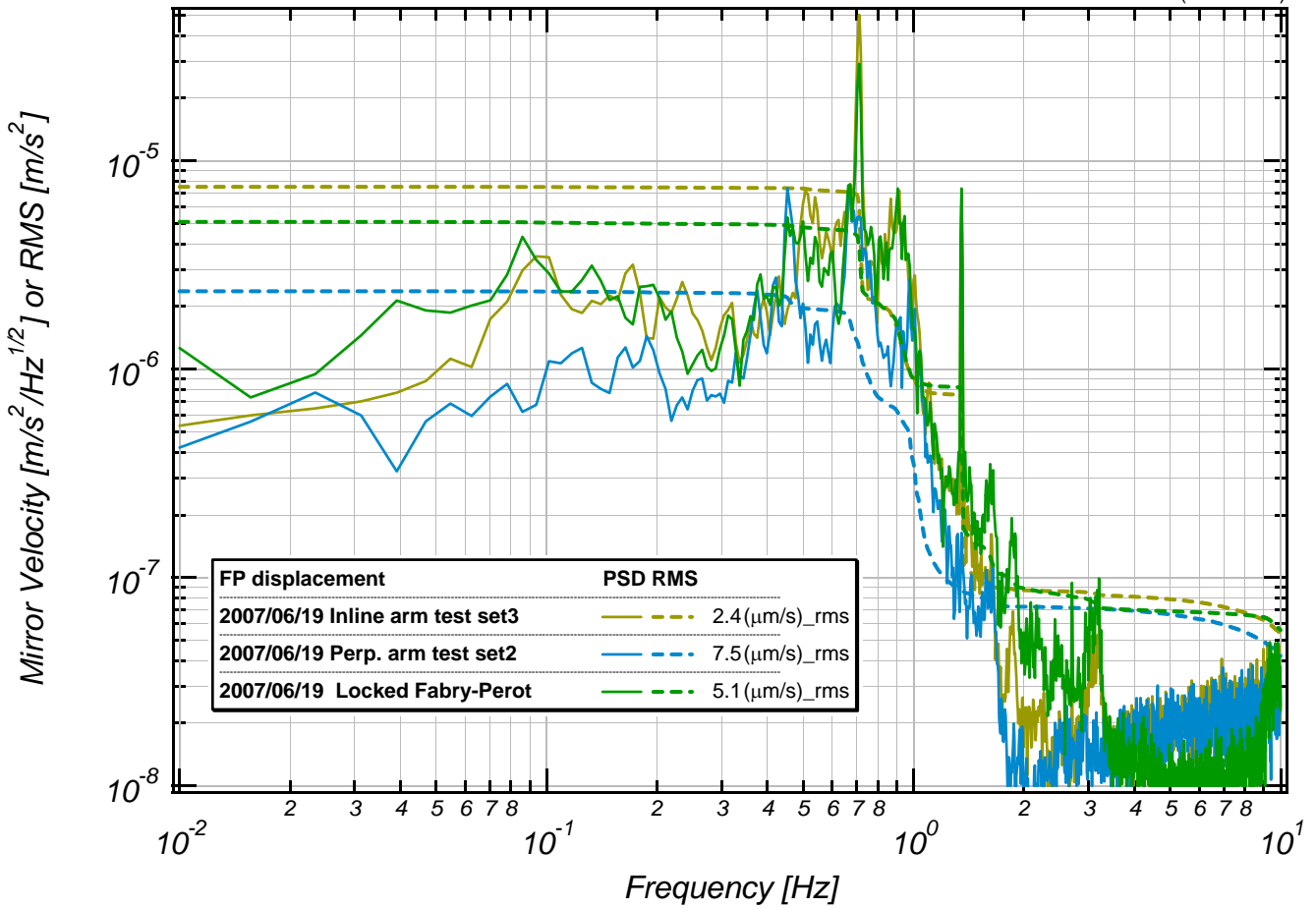
Displacement Noise measured by MCPZTfb & LFP

(2007/6/19)



Mirror Velocity measured by MCPZTfb & LFP

(2007/6/19)



TAMA300 interferometer

● **Laser interferometer GW detector**

- Arm length: 300m
- Location: National Astronomical Observatory of Japan (Mitaka, Tokyo)

● **Purposes**

- Development of the detector capable to catch GW events in nearby galaxies
- Establishment of interferometer technologies for LCGT



Progress of TAMA300

1995-1997 Facility/Vacuum System Construction

Recombined Interferometer

1999-2001 6 times of observation runs
(Total 1370 hours)

Recycled Interferometer

2001 Implement of power recycling

2003-2004 3 times of observation runs
(Total 1740 hours)

Seismic Attenuation System (SAS)

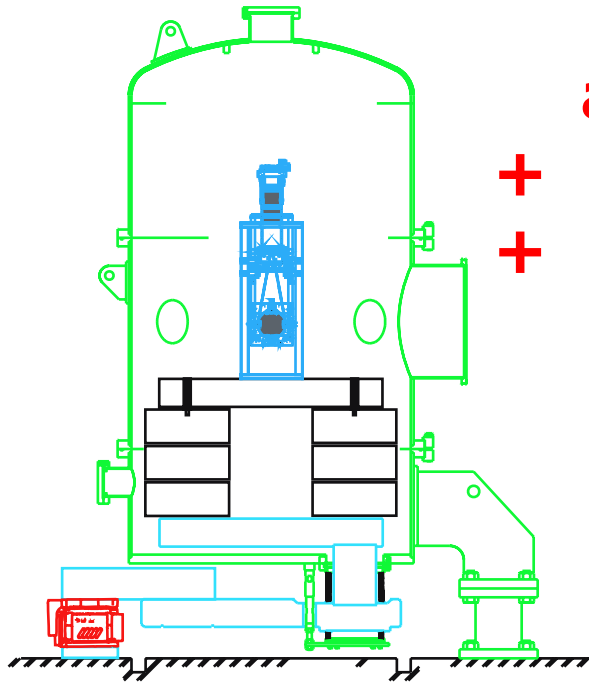
2005 Start installation of SAS

2007 Full interferometer lock with SAS

Current focus

● **Establishment of detector operation with SAS**

Replacement of the vibration isolation system



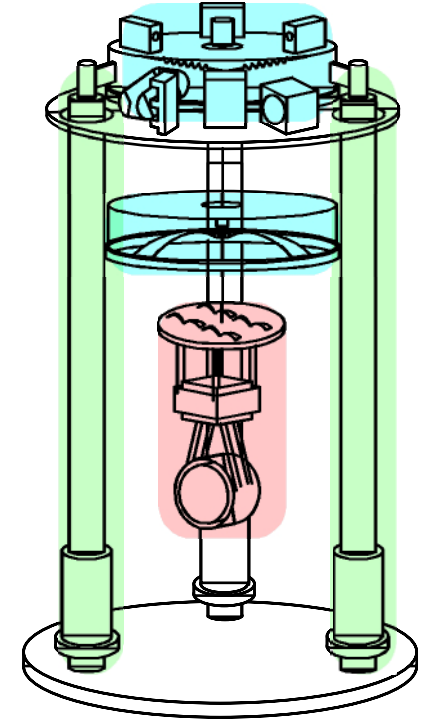
**pneumatic
active isolator**

+ stack

+ double pendulum



**inverted pendulum
+ vertical filters
+ multiple pendulum**



To realize the improvement

- Optimization of SAS control
- Optimization of interferometer control
- Application of digital control system
 - => Enables the complex servo system
 - => High level automatization of the operation

Seismic Attenuation System

● Vibration Isolation

Passive isolation with soft springs + active damping

Torsional

Tortion Pendulum

$f \sim 40\text{mHz}$

Inverted Pendulum

$f \sim 500\text{mHz}$

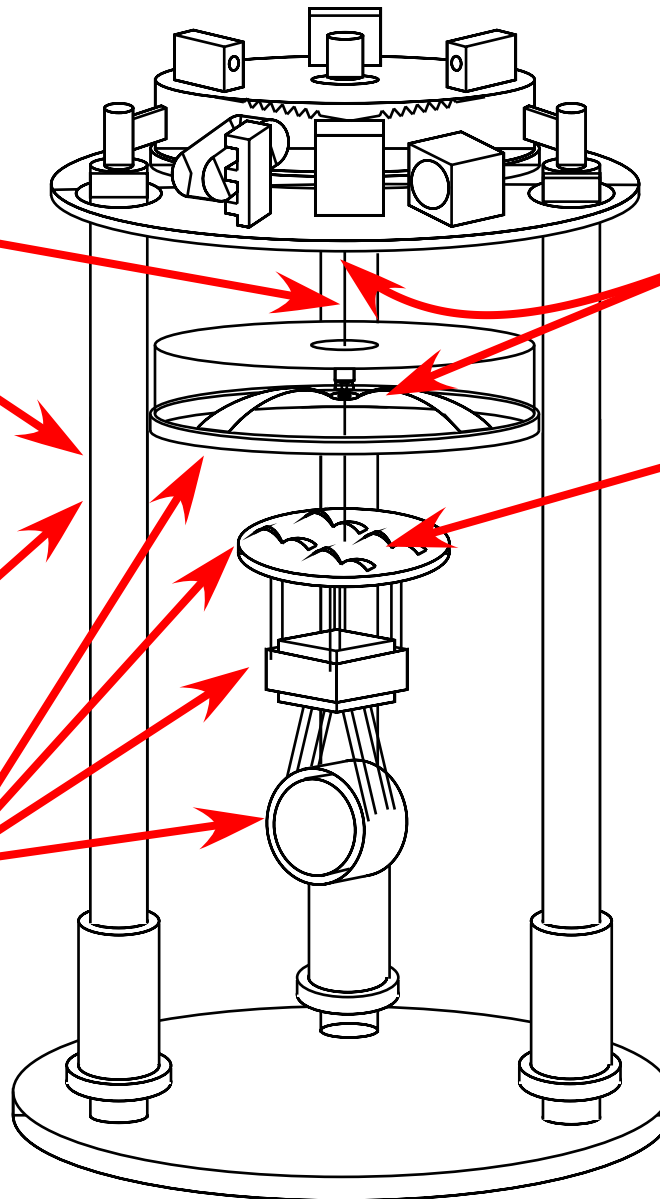
Horizontal

Inverted Pendulum

$f \sim 30\text{mHz}$

Multiple Pendulum

$f \sim 650\text{mHz}$



Vertical

MGAS Filter

$f \sim 500\text{mHz}$

MiniGAS Filter

$f \sim 1.5\text{Hz}$

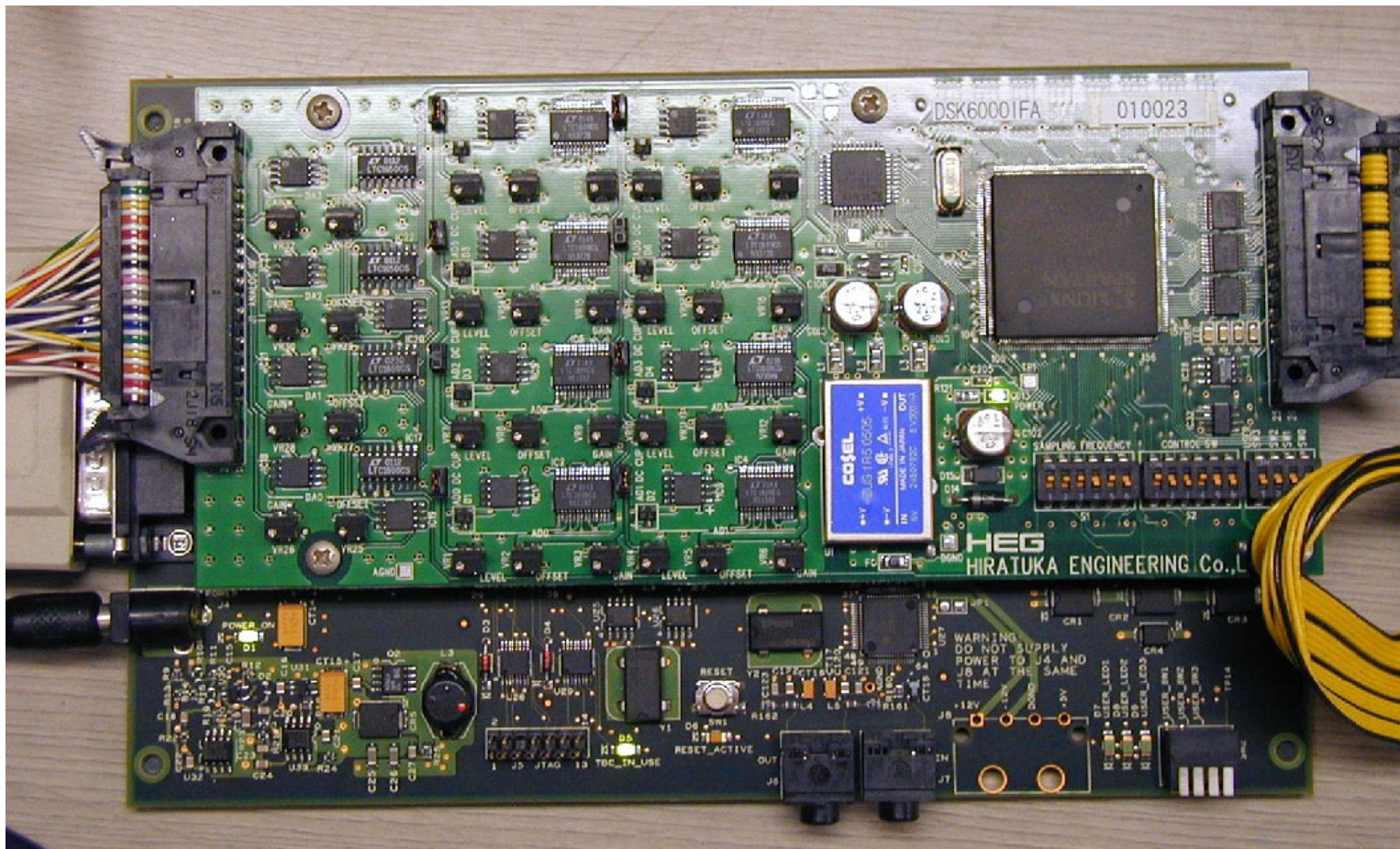
Digital mass lock filter

- **DSP based digital filter** (TI TMS32C6713 225MHz)

Sampling freq: 200kHz

Control BW: ~800Hz

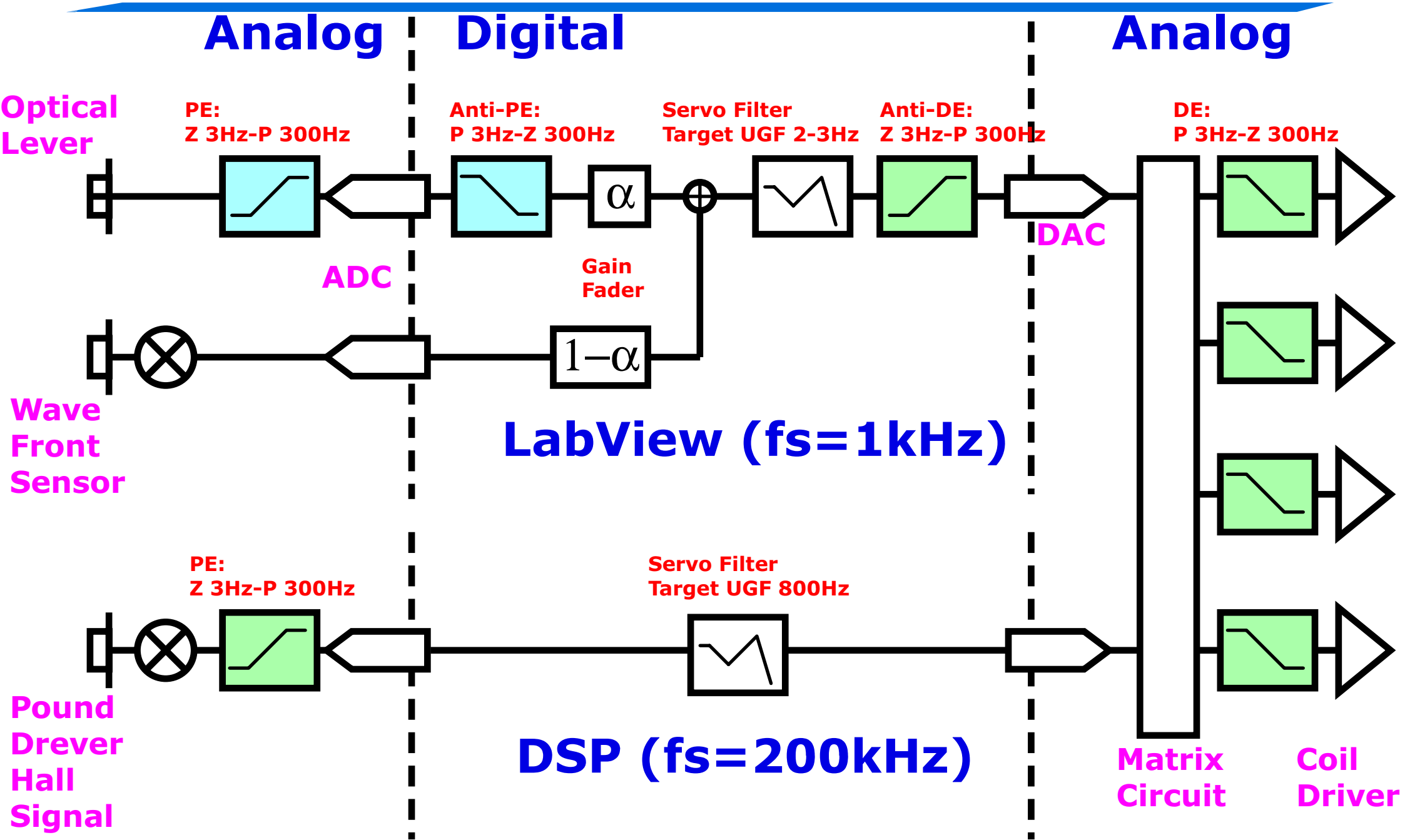
Realized comperable bandwidth to analog filters



Digital mass lock filter

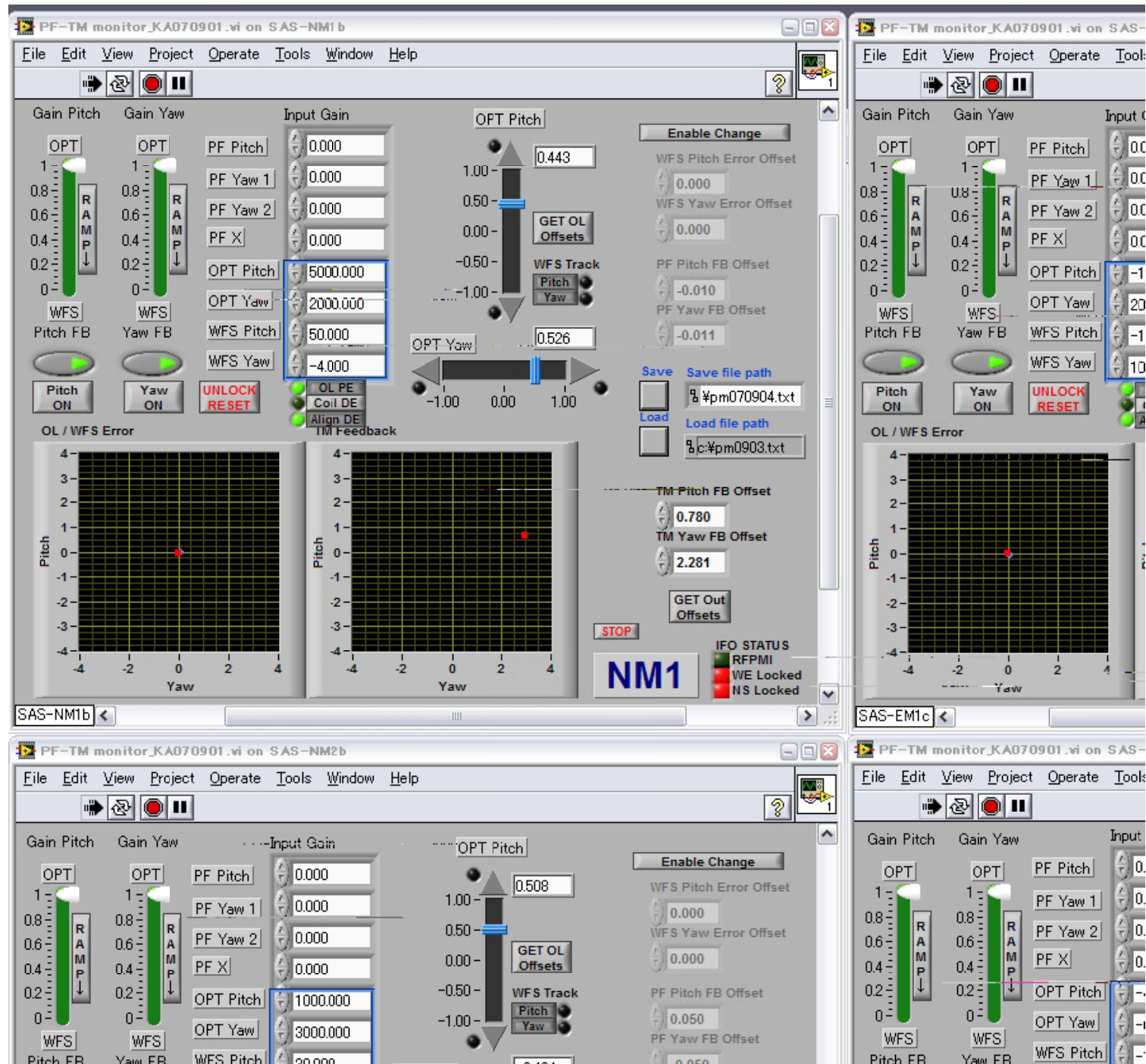
- **Some simple operations to the error signal**
 - Trigger at the resonance
 - Eliminates glitches by sidebands/ higher order modes
 - Normalization of the error signal by cavity transmitted light
 - Expands linear range (about x3)
 - Adaptive change of the digital filter coefficient
 - Low frequency gain boost at the lock
- => In combination with SAS, lock of RFPMI was realized even with 3 times weaker actuator**

Pre-emphasis / De-emphasis



Interferometer Automization by LabView

Digital Servo
/ Supervising



Interferometer Automatization by LabView

Dynamic changing of servo parameters

The screenshot displays a LabVIEW front panel titled "TM filters.vi". The interface is organized into two main sections: "Filter Bank Pitch" and "Filter Bank Yaw".

Filter Bank Pitch Section:

- Left Panel:** Contains a "Save File" button, a "Load File" button, and a "Butterworth Pitch" section. The "Butterworth Pitch" section includes input fields for "Low Fc" (value: 25), "High Fc" (value: 25), "filter type" (dropdown: Lowpa), "order" (value: 4), and an "On/Off" toggle.
- Grid:** A 10x4 grid of filter sets (filter set 1 to filter set 10). Each set has four parameters: Fc p, Q p, Fc z, and Q z. Below each parameter is a numeric input field with a green arrow icon. Below each set is a "Gain" input field and an "On/Off" toggle.

filter set 1	filter set 2	filter set 3	filter set 4	filter set 5	filter set 6	filter set 7	filter set 8	filter set 9	filter set 10
Fc p: 0.979	Fc p: 0.4565	Fc p: 2.466	Fc p: 0.26	Fc p: 1	Fc p: 19.4	Fc p: 28.2	Fc p: 37.7	Fc p: 25	Fc p: 0.01
Q p: 5	Q p: 30	Q p: 7.79	Q p: 10	Q p: 1	Q p: 0.7	Q p: 1.5	Q p: 5	Q p: 1	Q p: 1
Fc z: 1.1	Fc z: 2.915	Fc z: 2.343	Fc z: 0.35	Fc z: 1	Fc z: 50	Fc z: 100	Fc z: 200	Fc z: 0.3	Fc z: 0.2
Q z: 2	Q z: 38.37	Q z: 9.986	Q z: 10	Q z: 1	Q z: 100	Q z: 100	Q z: 100	Q z: 1	Q z: 1
Gain: 1	Gain: 1	Gain: 1	Gain: 1	Gain: 1	Gain: 1	Gain: 1	Gain: 1	Gain: 1	Gain: 1
2nd	2nd	2nd	2nd	2nd	2nd	2nd	2nd	2nd	2nd
On/Off	On/Off	On/Off	On/Off	On/Off	On/Off	On/Off	On/Off	On/Off	On/Off

Filter Bank Yaw Section:

- Left Panel:** Contains a yellow "Submit" button and a red "Close" button.
- Grid:** A 10x2 grid of filter sets (filter set 1 to filter set 10). Each set has two parameters: Fc p and Q p. Below each parameter is a numeric input field with a green arrow icon.

filter set 1	filter set 2	filter set 3	filter set 4	filter set 5	filter set 6	filter set 7	filter set 8	filter set 9	filter set 10
Fc p: 0.979	Fc p: 0.4565	Fc p: 0.26	Fc p: 0.08313	Fc p: 0.04044	Fc p: 19.4	Fc p: 28.2	Fc p: 37.7	Fc p: 25	Fc p: 0.01
Q p: 5	Q p: 30	Q p: 7.79	Q p: 10	Q p: 1	Q p: 0.7	Q p: 1.5	Q p: 5	Q p: 1	Q p: 1