

FPGA を用いたレーザー周波数の安定化

中川研究室 学部4年 岩間翔平

1. 研究背景・目的

近年原子を扱うような量子分野でレーザーを用いて様々な研究が行われている。量子分野での研究では1原子単位での制御が求められ、レーザー周波数やパワーの安定度は重要である。

レーザーの周波数はおよそ共振器長に依存して決まるため、外部の振動や共振器の熱膨張があると周波数が広がってしまっ実験の精度に影響が出てしまう。

実際の実験ではそれをアナログ回路を用いて制御しているが、本研究ではFPGAというデバイスを用いて制御することに取り組んだ。FPGAとはField-Programmable Gate Arrayの頭文字をとった略で、内部に多数の基本ロジックセルが配置されていて、それをプログラムで内部の論理回路構造を自由に何度も書き換えることができるデバイスであり、様々な機能を実現できる。

このFPGAを用いる利点として、専用の回路を設計し処理が並行して行えるため応答時間がコンピュータ上で行うよりも早く、デジタル制御のため正確で、書き換えができるため多様な設計が可能であること。また、アナログでは回路を変えると素子の取り外しが必要になるがFPGAではプログラムし直しコンパイルするだけなのでアナログ回路のように時間や手間がかからないことなどがある。

2. 原理

2.1 FPGA

FPGAとはField-Programmable Gate Arrayの略で、現場で書き換え可能な論理ゲートが格子状に配置されたハードウェアである。

FPGAには基本論理ブロックが図のように多数格子状に配置されており、それをプログラミングしてコンパイルすることで何度も配線し直す事ができ、多様な機能を持った回路を実現できる。

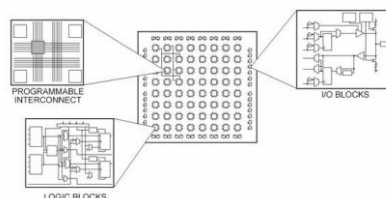


図 2.1 FPGA の内部構造

2.2 デジタル信号処理

FPGAではフィルタ処理をするがアナログ信号を計算するために、デジタル信号に変換して、再度アナログ信号に戻して出力するというAD変換を行っている。AD変換とは図3.1のように連続的なアナログ信号を、図3.2のような離散的なデジタル信号に変換するということである。

このAD変換のメリットとして、離散化して値を得ることで、アナログ信号では難しい複雑な処理が可能になること、計算処理のためパラメータの変更で容易に欲しい特性を変更できるといったことがある。

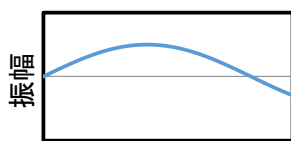


図3.1 アナログ信号

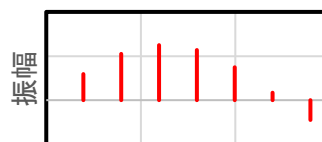


図3.2 デジタル信号

2.3 Z変換

時間軸の離散信号を周波数領域に変換する方法としてZ変換がある。Z変換の一例として双一次変換がある。式は(2.1)で表される。

$$s = \frac{2}{T_s} \cdot \frac{1 - z^{-1}}{1 + z^{-1}} \quad (2.1)$$

で T_s は離散信号を得るためのサンプリング時間である。この式の z^{-1} は現在のサンプリング時間の一つ前の値という意味で、伝達関数を双一次変換するとき分子は入力、分母は出力それぞれの値のサンプリング時間の一つ前の値をとることを表している。

3.FPGAを用いたフィルタの設計

3.1 デジタルフィルタ

デジタルフィルタには入力の値だけを用いたFIR(finite impulse response)フィルタ、入力と一つ前の出力の値を用いたIIR(infinite impulse response)フィルタがある。よく用いられる例として低周波を通し、高周波をカットするローパスフィルタや、その逆のハイパスフィルタなどがある。

ノイズのような信号は高周波信号であることが多く、ローパスフィルタを通すことでノイズをカットすることができる。またフィルタの伝達関数をそれぞれ掛け合わせることでフィルタの形状を自由に変えることができる。

たとえばローパスフィルタの関数は式(3.1)で表されボード図は図3.1になる

$$H(s) = \frac{1}{1 + s\tau} \quad (3.1)$$

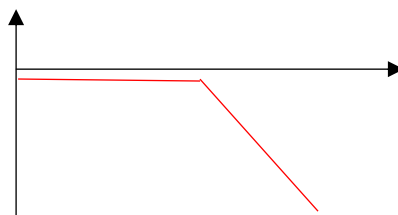


図 3.1 ローパスフィルタのボード図

3.2 IIR フィルタ

IIR フィルタは入力の値に加え、前の出力の値も参照して次の出力を決めるフィルタで、無限に前のデータまで参照して値を決める。

IIR フィルタは入力 x_n 、出力 y_n として式(2.11)のように表せる。

$$y_k = \sum_{n=1}^N a_n y_{k-n} + \sum_{m=0}^M b_m x_{k-m} \quad (2.11)$$

これを展開して、 $y_{n-1} = z^{-1}y_n$ の Z 変換の定義を用いると

$$\frac{y_n}{x_n} = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} \dots \dots}{1 - a_1 z^{-1} - a_2 z^{-2} \dots \dots} \quad (2.12)$$

式(2.12)は z 関数の式だが s 関数の伝達関数を双一次変換し、係数を比較することでそれぞれの a 係数、b 係数が決まる。

3.3 FPGA を用いたフィルタ設計

実際に FPGA 上ではどのようにプログラムしていくのか説明していく。

FPGA のプログラムは基本的に Labview を用いて行う。

図 2.5 はローパスフィルタの回路図で、この回路では入力は前後で値が変わらないとして b 係数は変わらないので 2 倍になっている。また、 2^{-16} で積を取っているのは、FPGA 内での計算が少数での計算ができないため一度それぞれの係数を 2^{16} 倍して整数で計算させてから少数に戻すという過程をとっているためである

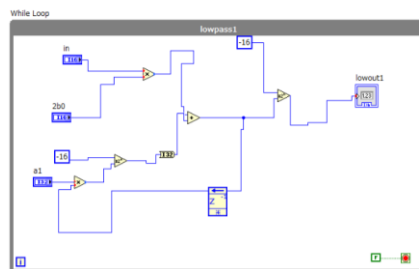
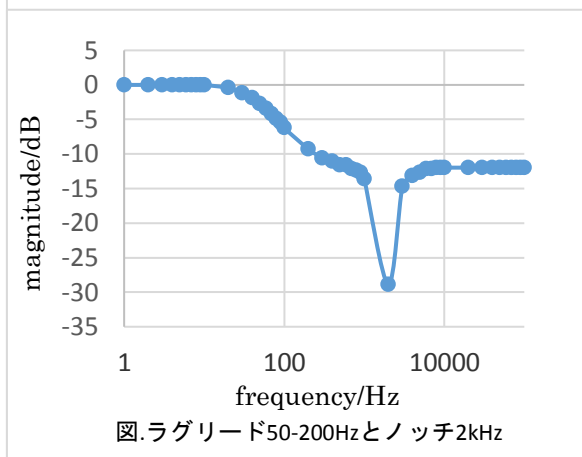
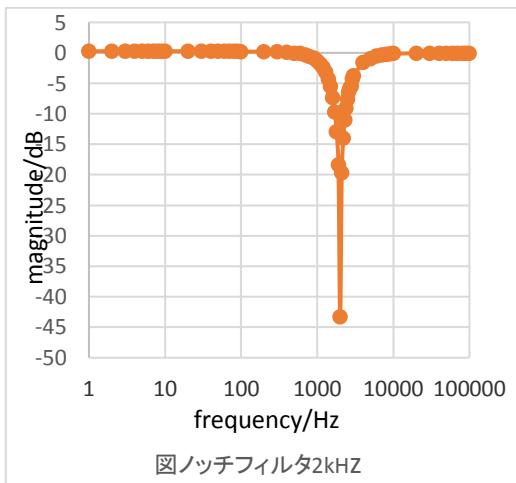
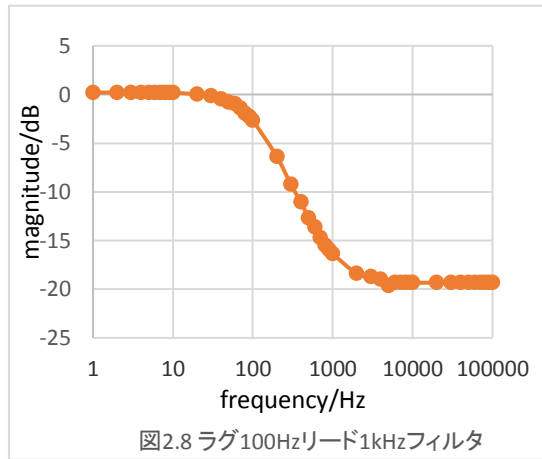
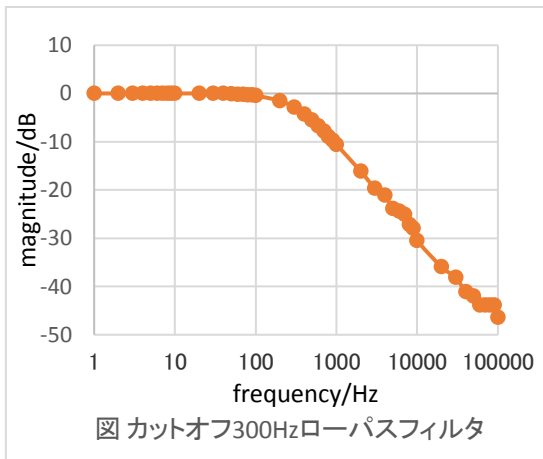


図 2.5 Labview 上でのローパスフィルタの回路図

それぞれ 5Vpp の振幅の sin 波を入力し、出力と比較し、縦軸 $20 \log_{10} v_0/v_i$ 、横軸周波数で特性周波数を変え評価した。

4 結果

測定できたローパスフィルタ、ラグリードフィルタが次のような周波数特性になった。



測定では使用した FPGA の分解能が 80kHz までしか帯域がなく、100kHz 付近は正確に測定できなかったが、フィルタの形状は確認できた。

5. 今後の課題

分解能を最大限使用するため、外付けの回路でゲインを調整出来るようにする。

また実際に周波数やパワーの安定化に用いて実験を行っていく。

参考文献

[1] 霜田光一 “レーザー物理入門” 岩波書店 (1983)

[2] 山本真稔 ”原子物理実験用デジタル制御周波数安定化レーザー” 修士論文