

Red pitaya と LINIEN を用いた半導体レーザーの周波数ロック(ver.2)

2024 年 12 月 23 日

井上慎

1. ハードとソフトの概要

1.1 Red pitaya(ハード)



Red pitaya は高速な AD 変換を搭載した FPGA ベースのシングルボードコンピューターである。高周波信号の信号処理に優れ、安価で省スペース ("クレジットカードサイズ") なため、実験室における高周波信号処理に非常に適している。実際、MIT では Red pitaya を用いて FPGA ベースの NMR を作る授業が行われていることはよく知られている。

主力製品は STEM-lab 125-14 である。Digikey などケースを含めても 10 万円以下で購入できる。FPGA は非常にポピュラーな Xilinx Zynq 7010 を用いている。AD 変換は入出力ともに 125MS/s あり DC から 50MHz 程度まで処理できる。分解能は 14bit、入力 2 ポート、出力 2 ポート、ともに SMA 端子がついている。そのほかの仕様は HP(<https://redpitaya.com>)を参照されたい。WiFi 接続も可能だが、LAN ポートで Ethernet 接続することが多い。オシロスコープやファンクションジェネレーターといった基本的な使い方をするためのソフトは上記の HP から提供されており、プログラミングの必要はない。

1.2 Linien(ソフト)

Red pitaya STEMLab125-14 を用いて狭線幅レーザーを安定的にロックするために開発されたオープンソースのプログラムである。ソフトは github に公開(<https://github.com/linien-org/linien>)されており、現在のところフンボルト大学の研究者らによってメンテナンスされている。Red pitaya はサーバーとして機能し、PC がクライアントとして Ethernet 経由でアクセスする形をとる。レーザーの変調に用いる高周波(~50MHz)自体を Red pitaya から出力し、得られた PhotoDiode 信号の復調を Red pitaya 内部の FPGA で行



う。システムデザインの詳細は次の論文で公開されている。

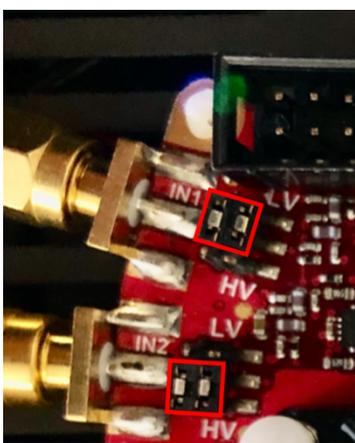
"Linien: A versatile, user-friendly, open-source FPGA-based tool for frequency stabilization and spectroscopy parameter optimization" by B. Wiegand, B. Leykauf, R. Jördens, M. Krutzik Rev. Sci. Instrum. 93, 063001 (2022) (<https://doi.org/10.1063/5.0090384>)

ただし、本論文で紹介されている"Automatic relocking"の機能は現在サポートされていない。これは「自動で relock できない」というよりは「基本的に lock が外れないので不要」といった解釈と思われる。"Lock detection"も現在サポートされていない。確かに lock が外れても "Locked!" の表示が出たままになる。Lock が外れたかどうかは別のオシロ、もしくは control 信号の履歴で判断する。

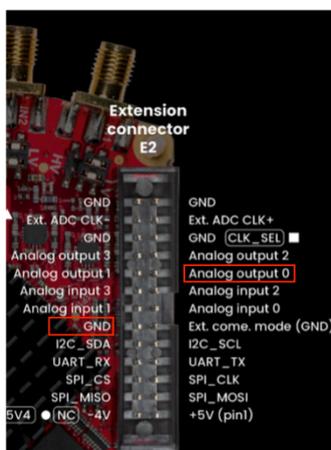
2. Red Pitaya の準備

2.1 物理的準備

- ・In1 の jumper を LV($\pm 1V$)、In2 の jumper を HV($\pm 20V$)に設定する。(In1 で PhotoDiode からの高周波を受け、In2 で DC の吸収信号を受けると想定している)
- ・Red pitaya の金属ケースを別に買った場合は、[Red pitaya の HP](#) を参照して heatsink を取り外し、サーマルパッドを取り付ける。
- ・Red pitaya 本体に並んでいる Extension connector(E2)の Analog output 0 と GND を BNC に取り出す



Jumper の準備



Analog output0 の場所



BNC に取り出したところ

2.2 SD カードの準備

- ・Red pitaya の HP の"[2.3. Prepare SD card](#)"を参照し、SD カード(16GB~32GB)の最新版をダウンロードする。2024 年 12 月時点で最新版は"Latest Stable(2.04-35)". ダウンロードに 1 時間ぐらいかかるので、可能なら実験室で最近ダウンロードした人からもらう。ダウンロードした zip を展開するとイメージファ



イルになる。

・ Red pitaya の HP の["2.3.2 Download and install the SD card image"](#)を参照し、Windows PC を用いる場合、balenaEthcer などでイメージファイルを SD カードに焼く。

・ SD カードの金色の端子がある方を上にして Red pitaya 本体に差し込む。

2.3 Red pitaya のネットワークへの登録とアクセス（大阪公立大学の場合のみ）

・ ホスト管理システムにログインする。

・ 「端末」 → 「端末管理」 で本体に書いてある mac address を登録する。ホスト名は「RedPitaya-*****」など、OS「その他」、機器種別「組み込み機器」、機器管理者は「検索」で OMUID を入力し「追加」を押す、など。

・ 次に「NW 接続端末利用申請」の「検索」で今登録した RedPitaya を選択、研究室のネットワークを選択、MAC address 認証、プライベート（DHCP 固定）を選び、「自動」を押して IP アドレスを発行する。

・ 取得した IP アドレスを本体ケースにラベルする。

・ Ethernet cable で Red pitaya を大学ネットワークに繋ぐ。Red pitaya の電源を入れる。

・ 研究室の PC からブラウザで Red pitaya の IP アドレスに接続する。Red pitaya の画面が出てきたら成功

・ うまくつながらない場合は LED の点滅パターンである程度診断が可能。緑と赤の点滅ならば問題はない。

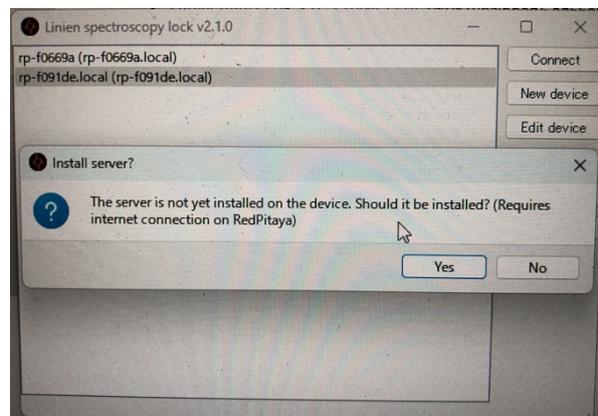


3. Linien の準備

3.1 Windows PC へのインストール

[github の Linien のページ](#)の"Getting started: Install Linien"の"standalone binaries"の"release page"に行き、Windows 版をインストールする。2024 年 12 月現在で"linien-2.1.0.exe"。（管理者権限が必要な場合もある。）

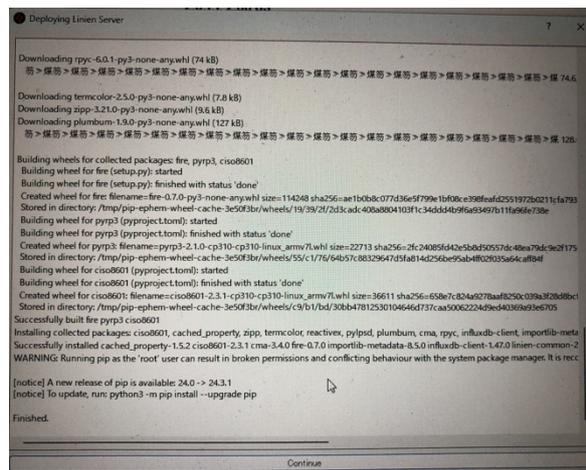
3.2 ネットワークを介して Red pitaya にサーバーをインストール



Red pitaya がネットワークに繋がった状態で Windows PC から Linien を立ち上げる。"New Device"で接続先の Red pitaya に任意の名前をつけ、IP アドレスを入力する。次に「Connect」をクリック。初めて Linien を走らせる Red pitaya の場合には"The server is not yet installed on the device. Should it be installed?"と出るので「Yes」をクリック。変な漢字が並ぶが怯まずに待つ。最後"Finished."と表示されたら「Continue」をクリック。

4. 飽和吸収信号の準備

4.1 参考までに今回用いたセシウム分光の setup を説明しておこう。EOM で pump に位相変調を入れることで PDH 信号を取れるようにしてある。



PhotodiodeはThorlabsのPDA8A2を用い、Mini-CircuitsのBias-Tee(ZFBT-4R2GW+)でRF信号とDCを作っている。DC信号の大きさは50オームの後でoffsetが1.5V、吸収信号が500mV程度であった。



4.2 従来の方で信号の確認

ファンクションジェネレーターとオシロスコープで飽和吸収とPDH信号が取れることを確認し

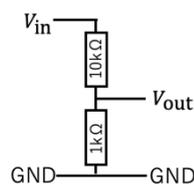
ておく。参考の setup では EOM に 15MHz を 23dBm=10Vpp くらい入れ、得られた PhotoDiode 信号を mixer で混ぜ、ローパスで高周波をカットして 20mV くらいの PDH 信号が得られることを確認していた。

4.3 ピエゾの scan に必要な電圧の確認

Red pitaya の SMA の出力は±1V、Analog out は 0~1.8V である。この範囲の電圧で吸収線に到達できるよう、あらかじめ条件を整える。

4.3 Current Modulation の準備

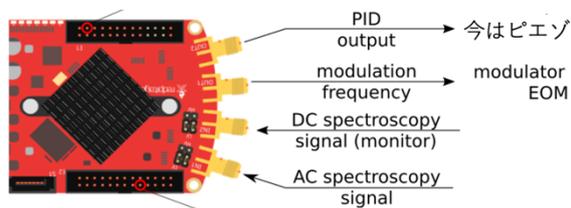
Thorlabs の Current Modulation の入力はロックには感度が高すぎる。1k オームと 10k オームぐらいで入力を 1/10 ぐらいに鈍感にする電圧 divider を入れておく。



5. ピエゾのみで周波数スキャンを行う

5.1 Red pitaya に繋ぎかえる

- ・ In1(LV) : PhotoDiode の高周波信号を入力する
- ・ In2(HV) : PhotoDiode の DC (飽和吸収信号) 信号を入力する。別のオシロスコープでもモニターした方が良い。
- ・ Out1 : EOM へ繋ぐ
- ・ Out2 : まずはピエゾに繋ぐ

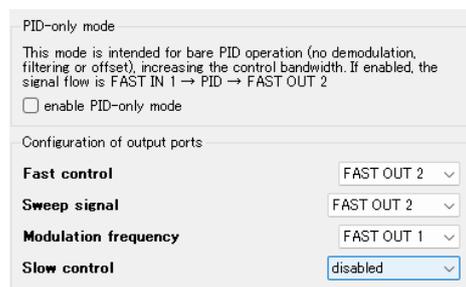


5.2 Linien を走らせる

General Tab

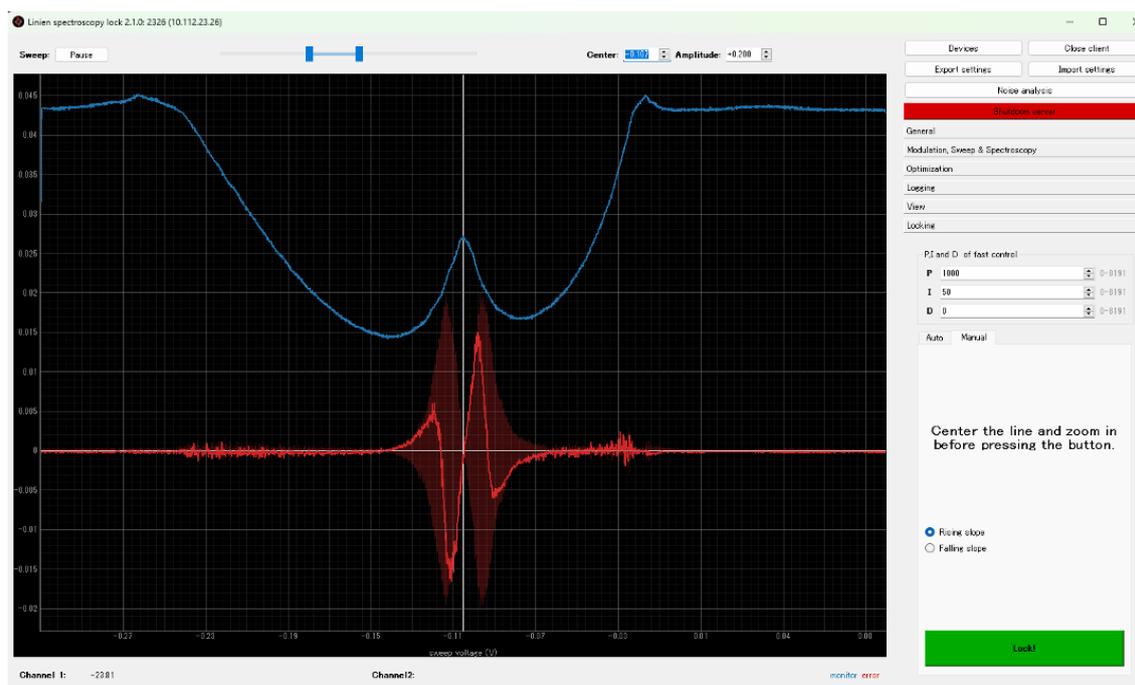
10mV のオーダーで Offset がズレる問題が残っているため、「PID-only mode」は使わない

- Fast control = Fast Out 2
- Sweep Signal = Fast Out 2
- Modulation Frequency = Fast Out 1
- Slow Control = disable



Modulation, sweep & Spectroscopy Tab

- Modulation Frequency = 15MHz
- Modulation Amplitude = 2Vpp (=Max)
- Sweep speed = 30 Hz とか
- Ch1 のみ、1f、100deg(信号見ながら調整)、offset=0V、Filtering = Automatic
角度をうまく調整して次のような信号を出す！



6. ロック

6.1 PID の設定

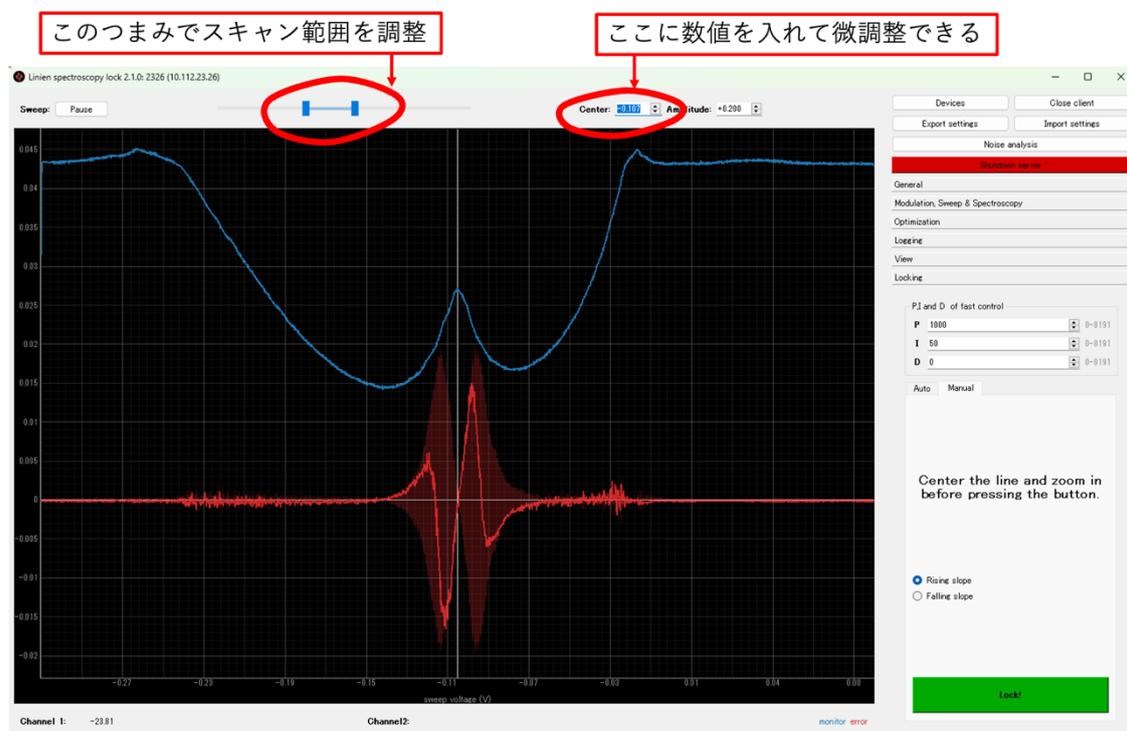
• Locking Tab で P=200、I=50 など適宜値を入れる。ロックの仕方は Auto と Manual がある。どちらが robust かはケースバイケースである。なお、ロックの成否はテクトロなどの別のオシロで PhotoDiode の DC 信号をモニターして判断する。すでに言及したように、Linien の "Locked" の表示は当てにならない。

6.2 "Auto"でのロック

緑の"Select target line"をクリックすると scan が止まるので、zero-crossing のあたりをマウスでドラッグする。ソフトが slope などを自動で検知してロックが始まる。フィードバックの符号の指定は必要ない。

6.3 "Manual"でのロック

・画面上部のつまみと"Center"の数値でロックしたい線を画面中央の白いラインに持ってくる。"Manual" Tab の Rising slope(右あがり)か Falling slope(右さがり)かで符号を指定して"Lock!"をクリックする。

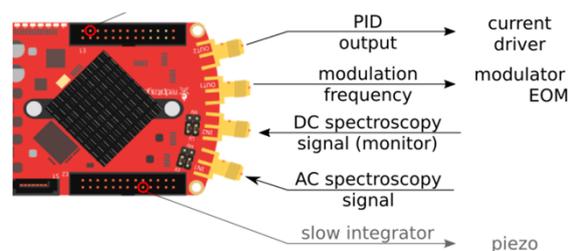


ピエゾだけでロックの確認ができればシンプルで大変良い。ロックが頑丈でなくても次の Current lock で改善する場合も多い。

7. Current Lock の実行

7.1 Red pitaya の繋ぎかえ

- ・ In1(LV) : PhotoDiode の高周波のまま
- ・ In2(HV) : PhotoDiode の DC のまま
- ・ Out1 : EOM のまま
- ・ Out2 : **Current Modulation** に繋ぐ

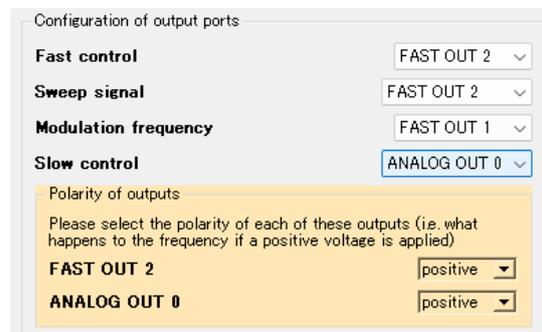


- Analog Out : ピエゾに繋ぐ

7.2 Linien の設定

General Tab

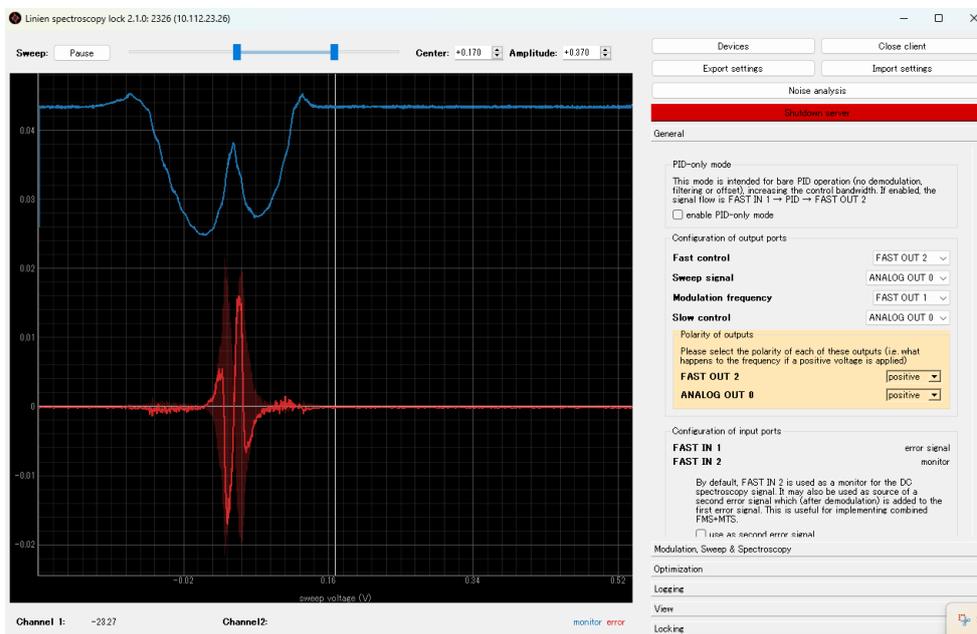
- Fast control = Fast Out 2 のまま
- Sweep Signal = Analog out 0 (ピエゾ)
or Fast Out 2 (current)
- Modulation Frequency = Fast Out 1
- Slow Control = Analog out 0 に変更



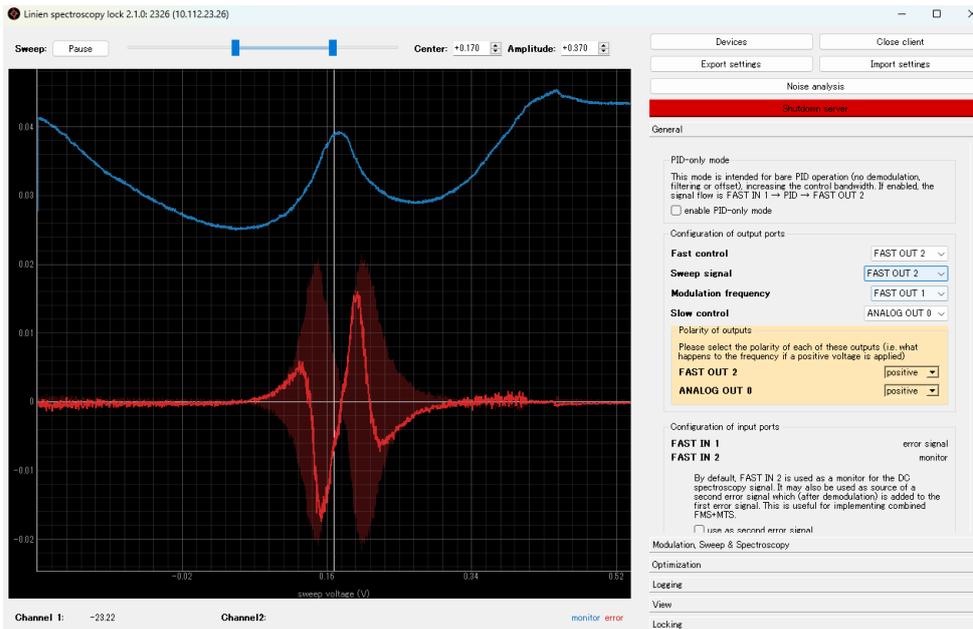
7.3 Polarity の設定

Fast control と slow control をオンにすると、Analog out 0 と Fast Out2 の符号の関係を聞かれる。ピエゾでのスキャンと電流でのスキャンを比較し、polarity の関係を決定する。例えば、次の場合はピエゾスキャンと電流スキャンが同じ向きにスキャンしているので両方「positive」に設定した。

↓ピエゾでのスキャンの結果↓



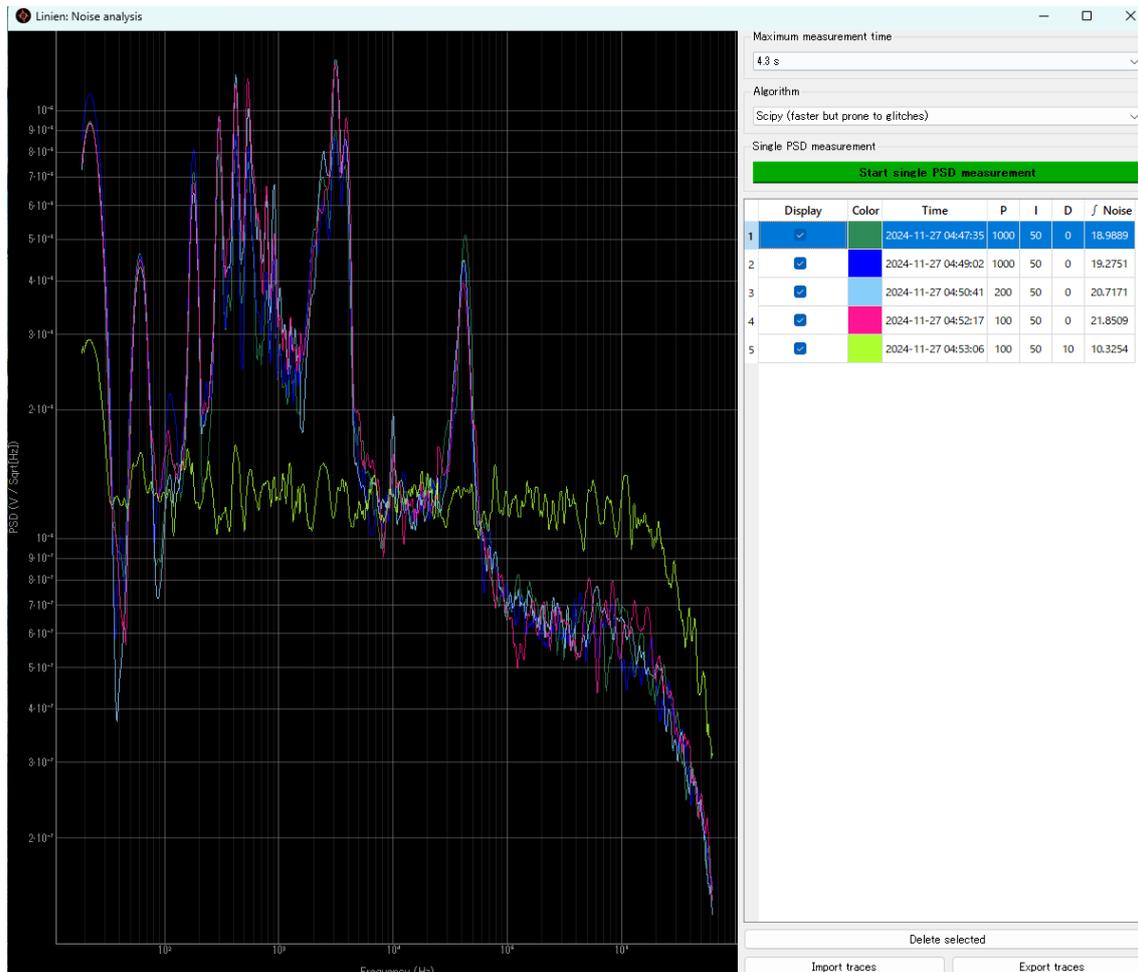
↓電流でのスキャンの結果↓



この状態で改めて6.に書いた「ロック」を行う。電流ロックがかかれば非常に頑丈なロックが期待できる。

7. PID の最適化

ロックした状態で"Noise Analysis"をクリックし、データ積算時間(Maximum measurement time)を指定して"Start single PSD measurement"をクリックすると次ページのように10Hzから10MHz近くまでエラーシグナルのスペクトルを取ってくれる。横に出ている数値が線幅に比例すると思われる。線幅が小さくなるようにPIDの値を調整する。



100Hz 1kHz 10kHz 100kHz 1MHz

8. 立ち下げ関係

- ・ロックを続けたい場合は"Close client"を選択する。他の PC から再接続可能。制御信号のログも Red pitaya 本体に記録されているので参照できる。Red pitaya は Linien に占有されていて、他のプログラムは走らない。Red pitaya の HP にも繋がられない。
- ・ロックを立ち下げたい場合は"Shutdown server"をクリックする。Red pitaya の HP に繋がるようになる。

9. 定常的な運転に向けて

9.1 Windows 更新後の再起動を停止する

Windows 11 の場合、 Pro version が必要。法人カードで¥13,000 払って upgrade する。

Step 1 : 「ファイル名を指定して実行」で「gpedit.msc」を入力、「ローカルグループポリシーエディター」のウィンドウを開く。

Step 2 : 「コンピューターの構成」→「管理用テンプレート」→「Windows コンポーネント」→「Windows Update」に移動。

Step 3 : 「従来のポリシー」の中にある「スケジュールされた自動更新のインストールで、ログオンしているユーザーがいる場合には自動的に再起動しない」を右クリックして「編集」をクリックし、「有効」を選択する。

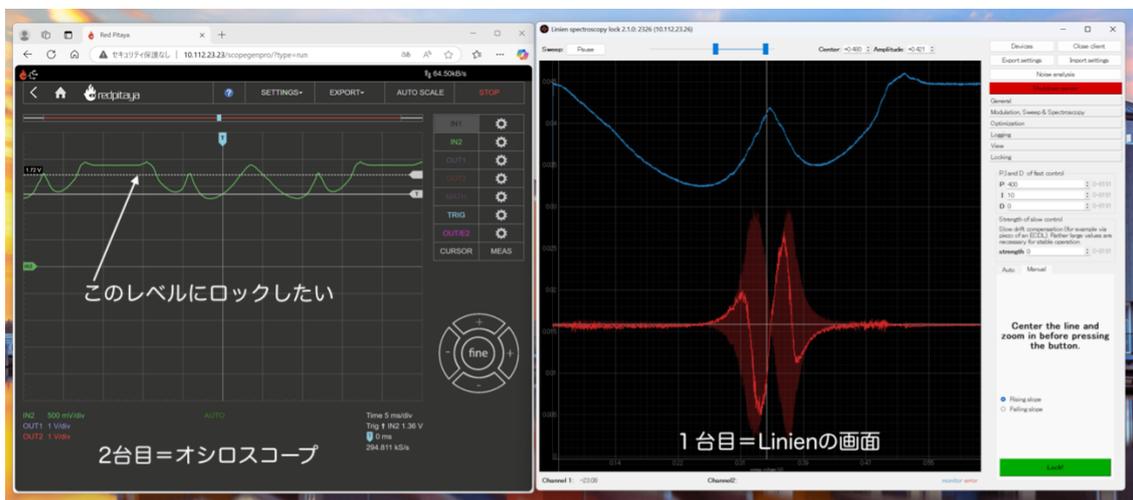
Step 4 : 「OK」をクリックして変更を保存し、PC を再起動する

10. Red pitaya 2 台体制

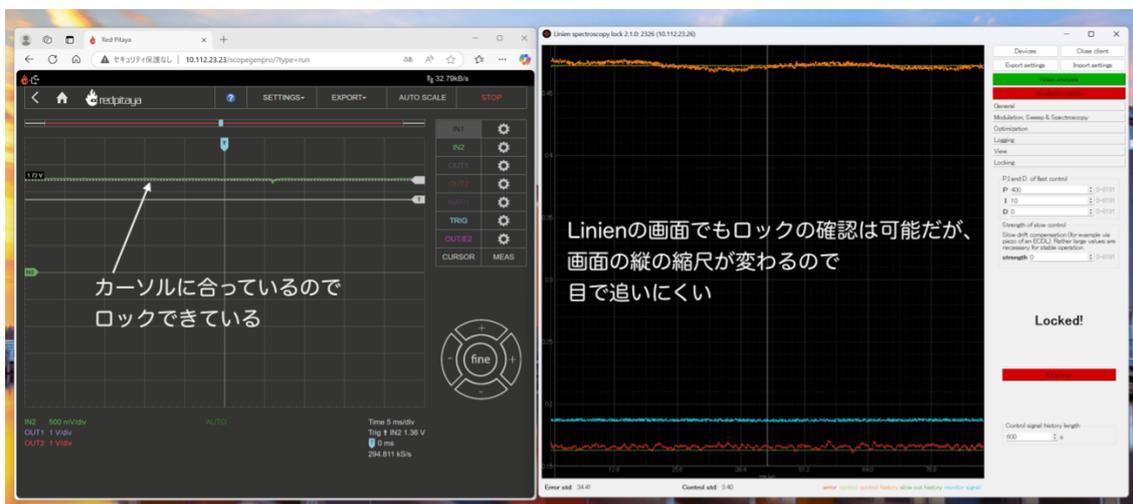
10.1 Red pitaya 1 台目で Linien を走らせ、2 台目を純粋にオシロスコープとして使うのも大変心地よい。2 台目の Red pitaya に DC 信号を入れて飽和吸収の Dip の位置にカーソルを置いておくと、ロックの成否が遠隔の PC から一目瞭然である。



↓ロック前↓



↓ロック後↓



(以上)