

SYNCHRONIZATION OF FEMTOSECOND LASER PULSES AND RF SIGNAL BY USING A SAGNAC LOOP

Ryoichi Hajima^{1*}, Hui Dai²

¹ ERL Development Group, Japan Atomic Energy Agency, Tokai, Ibaraki 319-1195 Japan.

² China Institute of Atomic Energy, P.O.Box 275(7), Beijing, 102413 China.

Abstract

Synchronization of a mode-locked laser and an RF signal source by using a Sagnac loop has been demonstrated. Measurements of SSB phase noise of a voltage controlled oscillator show that SSB noise can be reduced by Sagnac loop, which locks the phase of VCO to the mode-locked laser.

サニャックループによるフェムト秒レーザと RF 信号の高精度同期

1. はじめに

エネルギー回収型リニアック (Energy-Recovery Linac; ERL) の技術に基づく光源は、フェムト秒 X 線の発生が可能であり、これを用いて超高速現象の科学が展開されると期待されている [1]。フェムト秒 X 線パルスを使った時分割実験 (ポンプ・プローブ実験) では、ERL が発生する X 線パルスと外部レーザをフェムト秒の精度で同期させる必要がある。

加速器の RF 信号とレーザパルスを同期させる方式としては、(1) RF を基準としレーザをこれに同期する、(2) レーザを基準とし RF をこれに同期する、の 2 通りの方法がありうる。(1) は、従来から広く用いられている方式であり、ピエゾを使ったレーザ共振器の同期システムは市販されている (例えば Femtolock)。この方式は研究室サイズの実験では簡便な方法であるが、放射光施設のような大規模な利用では問題が生じる。これは、RF を長距離に伝播するとき信号タイミングを正確に保つことが難しく、温度や大気圧によるドリフトが避けられないからである。

近年のレーザ技術の進展に伴い、レーザパルス列を高いタイミング精度を保ったまま、ファイバーで長距離を伝送させることが可能になってきた [2]。そこで、放射光施設においても、レーザパルス列を基準信号として施設全体に分配し、このレーザパルス列に同期した RF 信号を生成する、つまり、上記 (2) の方式の有効性が提案されている。

レーザを用いたタイミング基準信号の発生と伝送に

おいて、レーザに同期した RF 信号を生成する方法としてサニャックループを用いる方式が提案されている [3]。われわれは、サニャックループを用いて、チタンサファイアレーザと同期した RF 信号を生成する実験を行ったので、この結果について報告する。

2. タイミング同期の原理

モードロックレーザ発信器は、共振器長で決まる周期でレーザパルス列を発生する。このレーザパルス列をフォトダイオードで検出し、その信号を適切なバンドパスフィルターに通せば、レーザに同期した RF 信号を得ることができる。ただし、この方法では、レーザパルスの強度揺らぎが RF 位相揺らぎとなるので、タイミング精度の限界がある。強度揺らぎを補償するには、図 1 のようなマッハツェンダー型の光路を用いればよい。これは、レーザパルスを 2 つに分割し VCO 信号が駆動する強度変調とバランスミキサを使って位相ロックをかける原理である。この方式はパルスの強度揺らぎは補償できるが、光学系の揺らぎ (室温変化による鏡位置のドリフト、環境による機械的振動など) を取り去ることはできない。

レーザ強度の揺らぎ、光学系の揺らぎの両者が補償できるよう、提案されたのが、図 2 のサニャックループを使う方式である。これを用いれば、レーザ繰り返しの整数倍の周波数の RF と同期可能である。図 2 のように光学系を組み、逆向きに回る光パルスを 2 つのフォトダイオードで受け、差信号をローパスフィルターに通した後、この信号で VCO を変調する。さらに、VCO の

* E-mail: hajima.ryoichi@jaca.go.jp

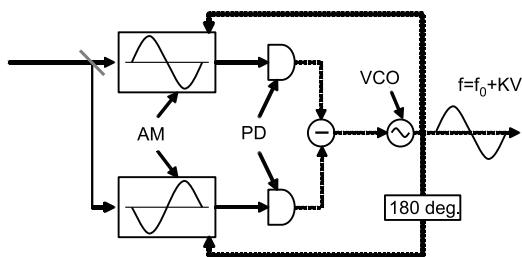


図 1: マッハツェンダー型の同期方式

出力をサニャックループ中に挿入した位相変調器に入れる。サニャックループの周長を同期したい RF 周期の 2 倍に設定しておけば、逆向きに回る光パルスは位相変調位置で RF の逆位相になる (図 2 参照)。したがって、図 1 と同様に位相ロックループを形成することができる。しかも、2つの光パルスは同一光路を通るので、光学系の揺らぎ、振動は補償されると期待できる。サニャックループ中に挿入した半波長板は、偏向ビームスプリッタで分割した光を周回後に取り出すためである。

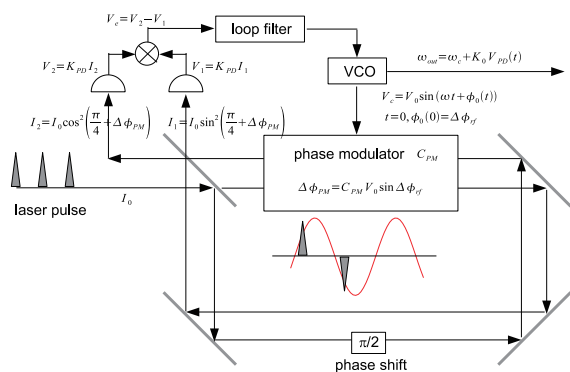


図 2: サニャックループを使ったタイミング同期システム

3. 実験セットアップ

レーザは フェムト秒モードロックチタンサファイアレーザ (Spectraphysics 社、TUSNAMI) を使った。レーザの繰り返しは 83.3 MHz である。レーザ繰り返しの 16 倍の周波数である 1.328 GHz の RF と同期を行うよう、サニャックループの周長を 45.15 cm とした。レーザパルスはバンドパスフィルタ (中心波長 780nm、FWHM20nm) を通した後サニャックループに入射し、周回したレーザパルスをフォトダイオードで検出した。差分回路とローパスフィルタは自作した。VCO は Mini-Circuit 社製 POS-1400A を使用した。サニャックループに挿入する位相変調器は NewFocus 社製 4421M である。VCO の

出力を直接位相変調器に入れても十分な変調が得られないため、RF アンプ (THAMWAY 社 T145-53CCA) で増幅した後に位相変調器に入力した。フォトダイオードから VCO までの回路を図 3 に示す。

レーザパルスと同期した RF の安定度を評価するため、SSB 位相ノイズを測定した。測定はリアルタイムスペクトラムアナライザ (Tektronix 社製 RSA230) を用いた。

4. 実験結果

測定した SSB 位相ノイズの周波数スペクトルを図 4 に示す。3 本のスペクトルは、(1) 位相ロックをかけない VCO (free running)、(2) モードロックレーザに対して位相ロックをかけた VCO、(3) モードロックレーザ、である。10kHz から 10MHz の範囲では、位相ロックが有効に機能しており、VCO の位相ノイズがモードロックレーザの位相ノイズレベルまで低減している。しかしながら、10kHz 以下の周波数では位相ノイズが大きくなっている。

サニャックループを用いることで、光学系の機械的振動の影響を原理的に排除できてはいるはずだが、何らかの擾乱が残っているために 10kHz 以下の低周波領域で SSB 位相ノイズが大きくなっていると考えられる。VCO 電源 (制御電圧ではなく、VCO の動作に必要な電圧を供給する電源) の電圧安定度が十分でないことが、擾乱の可能性としてあげられる。実験のセットアップでは、VCO 制御電圧の基準値は 14.55V、電源電圧は 8V に設定した。この時、2 種の電圧に対する VCO 出力周波数の変化をプロットしたものを図 5 に示す。電源電圧が 0.1% 変動すると VCO 周波数は 50kHz の変動となることがわかる。

5. まとめ

フェムト秒 X 線の発生が可能な次世代放射光源では、実験施設全体にファイバーレーザで高精度のタイミング信号を分配する方式が提案されており、レーザと RF の同期技術はますます重要になってくる。そこで、本研究では、モードロックレーザを基準信号として、高精度の RF 信号を発生させる方法としてサニャックループを用いる方式を試みた。10kHz-10MHz の周波数領域では、RF の位相雑音はレーザパルスと同レベルまで小さくできたが、10kHz 以下の低周波領域では位相雑音が大きかった。今後、VCO の電源電圧安定度の改善など、条件を整えて位相ノイズの低減を行いたい。

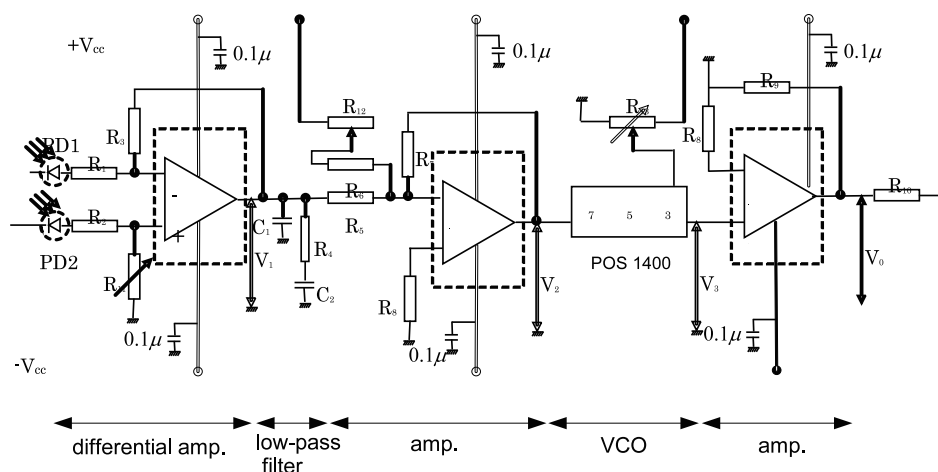


図 3: 測定回路: 差分回路、ローパスフィルタ、VCO まで。

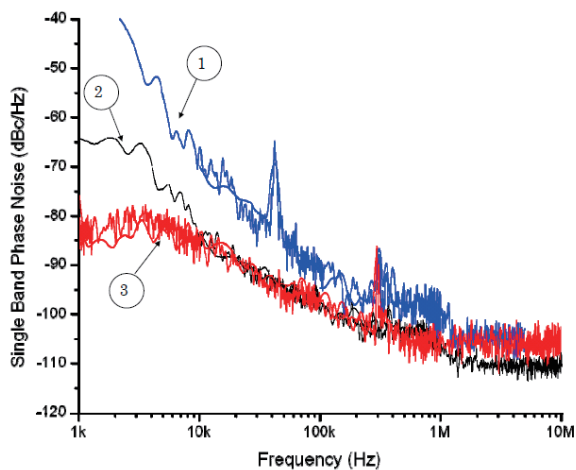


図 4: SSB 位相雑音の測定結果。(1) 位相ロックをかけた VCO (free running)、(2) モードロックレーザに対して位相ロックをかけた VCO、(3) モードロックレーザである。

本研究の一部は、文部科学省原子力研究交流制度の支援を受けて実施した。

参考文献

- [1] 羽島, 放射光 14, 323-330 (2001).
- [2] S.M. Foreman, K.W. Holman, D.D. Hudson, D.J. Jones, J. Ye, Rev. Sci. Instrum. 78, 021101 (2007).
- [3] J. Kim, F.X. Kärtner, M.H. Perrott, Opt. Lett. 29, 2076-2078 (2004).

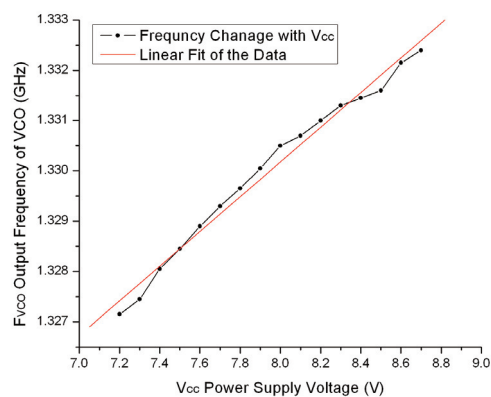
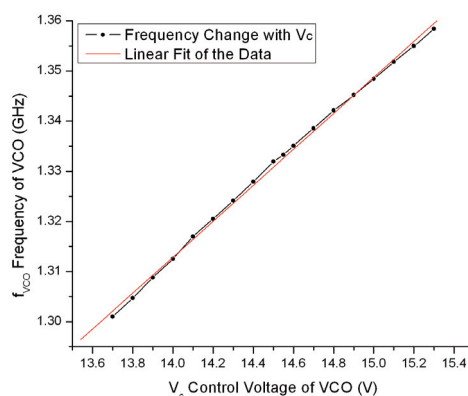


図 5: VCO 制御電圧と電源電圧と発生周波数の関係