

Development of a laser driven RF signal generator with amplitude stabilization

Hideki Dewa¹, Akihiko Mizuno, Tsutomu Taniuchi, Hiromitsu Tomizawa, and Hirofumi Hanaki
 Japan Synchrotron Radiation Research Institute (JASRI/Spring-8)
 1-1-1 Kouto Sayo-cho Sayo-gun Hyogo 611-5198 Japan

Abstract

It is important to get precise synchronization between rf signal and laser pulses for stable operation of photo cathode rf-guns. For this purpose, we developed an amplitude-stabilized rf signal generator driven by laser pulses, dealing with long-term output power drift as well as pulse by pulse power fluctuations of the laser oscillator. It was realized by introducing a limiter amplifier and a comb generator in the circuit. The output rf power of the generator was almost constant within 10 dB input power range. The rf phase noise and the timing jitter between the rf signal and the laser pulse were measured. The phase noise difference between unstabilized and stabilized generators is not significant, which correspond to RMS jitter about 250fs in the frequency range of 10Hz-100MHz. Measurements using a sampling oscilloscope showed that the timing jitter of the stabilized generator was smaller than that of unstabilized one. In this proceedings, the overview of the stabilized rf generator and results of the phase noise and jitter are presented.

振幅を安定化したレーザーパルス同期RF発振器の開発

1. はじめに

フォトカソードRF電子銃において、低エミッタンスビームを安定に発生させるためには、カソードに照射するレーザーをRFに同期させ、RF空洞の最適位相に出射することが重要である。

レーザーパルスとRFの同期については、一般にレーザーをRFに同期させる方法と、逆にRFをレーザーに同期させる方法とがある。前者の方法においては、外部基準RF信号に対してレーザーの位相が安定になるように、レーザーパルス発振器のキャビティ長を位相ロックすることにより実現できる。また後者の方法にはRF発振器をレーザーパルスに位相ロックさせる方法やレーザーパルス信号を用いてRFの高調波を取り出す方法などがある^[1]。

我々はこれまで上の2つの方法を組み合わせてレーザーとRFの高精度同期を実現している。まずレーザー発振器を低位相雑音の外部発振器のRFに同期させ、RF周波数2856MHzの32分周である89.25MHzで発振させる。これだけでも300fsから400fsの精度で同期が可能であるが、さらにジッターを減少させるために、次に出力された89.25MHzのレーザーパルスをフォトディテクターで検出し、早い立ち上がりのパルス信号から2856MHzの高調波を取り出して、RF空洞用の低レベルRF信号としている。

レーザーのパルス信号からRF信号を取り出すには空洞タイプのバンドパスフィルター(BPF)を用いている。BPFでRF信号を取り出す1つの問題点として、RF信号の振幅がレーザーパルスの振幅に比例するためレーザーパルスの振幅変動がそのままRFの振幅変動に現れるということがある。

今回振幅安定化のためにリミッターアンプを導入したRF信号発振器を開発した。長期的なレーザー振

幅の変動によるRF振幅の変動を抑制し、レーザー強度がたとえ半分になったとしても一定のRF出力が得られることを目指した。また同時にパルス毎の振幅変動を低減することができるため、同期性能の向上が期待できる。

2. レーザー同期RF発振器の概要

SPRING-8フォトカソードRF電子銃のカソード照射用の短パルスレーザーは89.25MHzのTi:Sapphireレーザー発振器、10Hzの再生増幅器およびマルチパス増幅器、および3次高調波発生器から構成される。ここで89.25MHzのTi:Sapphireレーザー発振器の共振周波数はRF空洞の共振周波数2856MHzの32分周としている。このレーザーパルスとRF信号の同期をとるために、Ti:Sapphireレーザー発振器には外部基準RF信号とレーザーパルスとが位相ロックできるようにフィードバック装置(Femtolaser社; FEMTOLOCK)が備わっている。

FEMTOLOCKの基準入力信号として低位相ノイズのAgilent Technology E8663Bアナログシグナルジェネレータからの2856MHzRF信号を使用している。

(図1) FEMTOLOCK内部では2856MHzを1/8に分周した信号と、レーザーオシレーターからのレーザー光をフォトディテクターで受けて得られた信号を4通倍した信号との間の位相差をミキサを用いて検出し、位相が一定になるようにレーザーキャビティのミラーを動かしてPLLフィードバックをかけている。フィードバックのゲインおよび帯域はFEMTOLOCKのダイヤルにより調整できる。位相比較の出力はFEMTOLOCKのジッター表示ディスプレイに出力されており、我々の装置では通常0.06-0.08psの表示が得られている。

¹ E-mail: dewa@spring8.or.jp

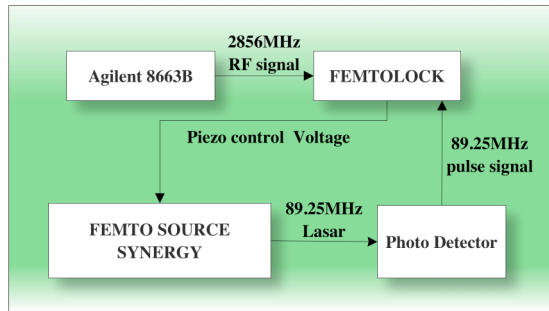


図1 FEMTOLOCKフィードバックブロック図

一方FEMTOLOCKによるフィードバックでは、ミラーを動かす piezo 素子の動作周波数以上ではフィードバックが効かない。動作周波数の上限は高々100kHzであり、上限をこえた周波数領域では同期を取ることができない。このためこれまでSPRING-8ではより低ジッターの同期を得るために、図2のような回路でレーザーパルスから2856MHzのRF信号を生成していた。

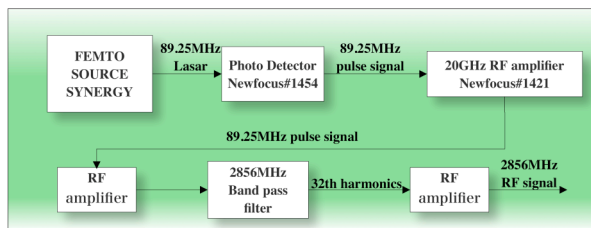


図2 レーザー同期RF発振器（従来機）

この回路では89.25MHzのパルス信号中の32倍高調波成分(2856MHz)を共振空洞タイプのバンドパスフィルターを用いて取り出している。

この回路を使用することで、レーザーパルスの変動に合わせて、出力するRF信号もレーザーと同じように揺れるので、レーザーのタイミングとRFの位相をより正確に合わせることができる。PLLフィードバックを用いただけで同期を取っている回路と比較すると、上記レーザー同期発振器を加えることにより、レーザーとRFのジッターを減少させることが可能である。

図2のレーザー同期発振器の問題点は出力するRFのレベルがレーザーの振幅に比例する点である。まずレーザー出力は長期的には変動はさげられないため、レーザーの振幅が変動しても一定のパワーのRF信号を出力することが望ましい。またパルス毎にレーザーパルスのパワー変動があり、短時間ジッターの原因となる。これらの問題を解決するためにRF同期発振器の振幅を安定化するような改良をおこなった。

改良の主な点は、1) リミッターアンプを使用して、RF信号の出力の安定化をおこなったこと、2) 32通倍信号を得るためにレーザーパルス信号を増幅してそのままBPFを通すのではなく、一度89.25MHzの水晶フィルターを通し、89.25MHzの正弦

波を得た上で、コムジェネレータにより高調波を含む立ち上がりの早いパルスを生成し、BPFを通して2856MHzRFを生成する、の2つの点である。

振幅安定化レーザー同期RF発振器のブロック図を図3に示す。リミッターアンプとしてGigOptix社のiT3011Eを用いた。また高調波を発生させるコムジェネレーターにはステップリカバリーダイオードを用いたHEROTEK社のGC100を使用した。

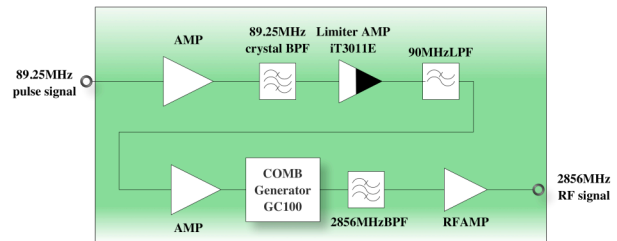


図3 振幅安定化レーザー同期RF発振器ブロック図

なお試作段階でリミッターアンプを水晶フィルターの手前においていたが、入力信号のパルス幅が狭くパワーが足りないため、RF信号のジッターが大きかった。これを改善するために初段アンプのゲインを高めリミッターアンプの手前に89.25MHz水晶フィルターを置く配置に変更し良好な結果が得られた。

3. レーザー同期RF発振器の性能評価

3.1 出力安定度

まず振幅安定化レーザー同期RF発振器の入出力特性を調べるために、アッテネータにより入力パワーを変化させたときのRF出力パワーを測定し、出力安定化の有効性を調べた。結果を図4に示す。この図からわかるようにおよそ入力が-10dBまで低下してもほぼ一定のRF出力（出力変動±1.5%以下）が得られることがわかる。通常レーザー発振器の長期的な出力変動は大きくても20%程度であるので、この特性であれば長期的なレーザー出力のドリフトに対応できることがわかる。

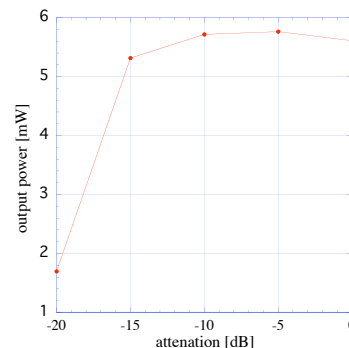


図4 振幅安定化レーザー同期RF発振器の入出力出力特性

次にアッテネータをつけない状態で短時間（1分以下）のRF振幅の安定度を測定した。振幅を安定し

ていないレーザー同期発振器の出力安定度は0.27%(RMS)であった。一方振幅安定化レーザー同期発振器では安定度が0.20%(RMS)まで向上した。

以上の結果から長期的なレーザーの出力変動だけでなくパルス毎のレーザーパルス振幅の変動に対しても振幅安定化レーザー同期発振器による出力安定化が有効であることが確認できた。

3.2 位相ノイズ

振幅安定化レーザー同期発振器は回路が複雑になるため、位相ノイズが大きくなることが懸念された。とくに今回の回路では、一度89.25MHzの正弦波にしてからコムジェネレータで高調波を発生させ、2856MHzをBPFで取り出すようにしているが、この影響を心配した。

従来機および振幅安定化レーザー同期発振器のRFの位相ノイズをアジレント社E5052Bシグナルアナライザーで測定した。結果を図5に示す。

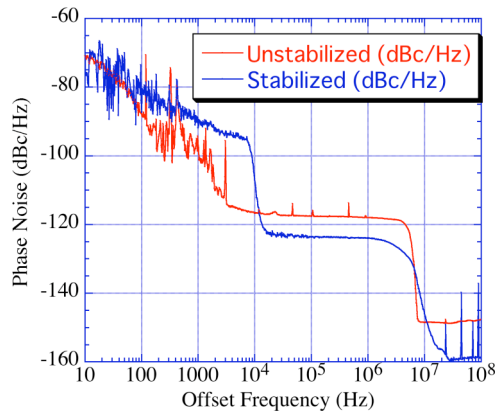


図5 従来機及び振幅安定化レーザー同期発振器の2856MHz RF信号の位相ノイズ

従来機に比べ振幅安定化レーザー同期発振器の位相ノイズは10kHz以下で大きく、これは回路上の問題点が残っていることを示している。ただし89.25MHzのクリスタルフィルターを導入した効果により、10kHz以上の位相ノイズは低く抑えられている。また共に10MHz付近で位相ノイズが急に落ちているのは2856MHzのBPFの効果である。これらの位相ノイズ測定からRF信号のRMSジッター(10Hzから100MHzの帯域幅で評価)を求めると、従来機で255fs、振幅安定化型で249fsであり、ほぼ同程度の性能である。

3.3 レーザーとRFの同期ジッター

次にレーザーとRFの同期性能について述べる。レーザーとRFの同期について200fs以下の精度でジッターを測定する方法はまだ確立していない。今回はサンプリングオシロスコープを用いた方法で測定をおこなった。測定で得られたジッター値については、オシロスコープのクロックジッター250fs以下では十分な精度はないと思われるが、測定値の比較から同期精度の優劣を比較することは可能であろう。

レクロイ社のサンプリングオシロスコープSDA-

100Gを用いて短時間(1秒以下)の測定を1000回以上繰り返してRMSジッターを評価した。なおこのサンプリングオシロスコープのクロックジッターのスペック値は250fsである。

クロック信号(プリスケラ入力)に2856MHzのRF信号を入力し、レーザーパルス信号をch1で受け、ch1の時間ジッターをレーザーパルス信号の振幅変動とスルー・レートの比を用いて評価した。オリジナルのジッターが約270fsであるのに対し、振幅安定化レーザー同期発振器のジッターは図6のように161fsが得られ、よりジッターが小さいことが確認できた。

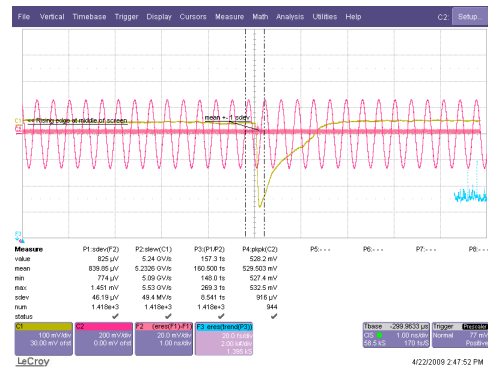


図6 サンプリングオシロスコープを用いた振幅安定化レーザー同期発振器のジッター測定

また振幅安定化レーザー同期発振器のレーザーパルス信号入力部にアッテネータを入れて、ジッターを測定した。アッテネータが5dB、10dB、15dB、20dBのときのジッターはそれぞれ167fs、170fs、191fs、493fsであり、レーザーパルス信号のパワーが10dB低下してもジッター性能はほとんど変わらない。

4. まとめ

振幅安定化レーザー同期発振器を開発し、安定化していなかった従来器よりも優れた同期性能が得られた。レーザー発振器の出力パワーが10dB低下しても発振器が出力するRFパワーは一定であり、またレーザーとの同期精度は低下しないことが示された。今後10kHz以下の位相ノイズ増大について改良を進めていくとともに、RF電子銃のビーム加速試験によるビームを用いた安定度および同期ジッターの試験を進めていく予定である。

今回の振幅安定化レーザー同期発振器の開発にあたり、(株)キャンドックスシステムズの榎下 英児氏、石川 豊幸氏、秋山 瞬氏の御協力に感謝の意を表します。

参考文献

[1] H. Dewa et al. "Beam quality and stability improvements for a single cell photocathode RF gun" *Proceedings of the ICFA workshop The Physics and Application of High Brightness Electron Beams, Chia Laguna, Sardinia(2002)*. 28-44