

LOW PHASE NOISE MASTER OSCILLATOR WITH OPTOELECTRONIC OSCILLATOR TECHNOLOGY

Kazutaka Harumatsu ^{#,A)}, Masashi Mizuma ^{B)}, Takashi Obina ^{C)}, Toshihiro Matsumoto ^{C)}, Shunsuke Nozawa ^{C)}

^{A)} Mitsubishi Electric TOKKI System Corp., 8-1-1 Tsukaguchi-honmachi, Amagasaki, Hyogo, 661-0001

^{B)} Mitsubishi Electric Corp., 5-1-1 Ofuna, Kamakura, Kanagawa, 247-8501

^{C)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK), 1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

Abstract

ERL is a Next Generation Light Source along with cERL which is a test machine for ERL. The standard signal source with very few phase fluctuations is necessary to attain beam stability and time resolution of ERL and cERL. In order to meet this requirement, we produced a low phase noise MO (Master Oscillator) adopting OEO (Optoelectronic Oscillator) which combined an optical fiber loop with OCXO (Oven Controlled Crystal Oscillator), and examined whether this will be applicative to ERL and cERL. Furthermore, we discussed the future vision of MO at the end.

OEO を採用した低位相雑音基準信号発生器

1. はじめに

次世代放射光源であるエネルギー回収型リニアック (ERL : Energy Recovery Linac) 及びその実証機として開発中のコンパクト ERL (cERL) には、高純度かつ高安定な RF 基準信号の生成と、電子銃・加速器・利用者装置等、リング全周にわたって低ジッタの基準信号を分配することが必要^[1]である。

これらの要請に対し、高安定度温度制御型水晶発振器 (OCXO : Oven Controlled Crystal Oscillator) と光ファイバによるループ回路を組み合わせた光マイクロ波発振器 (OEO : Optoelectronic Oscillator) を採用した低位相雑音基準信号発生器 (MO : Master Oscillator) を試作し、適用可能性を確認した。

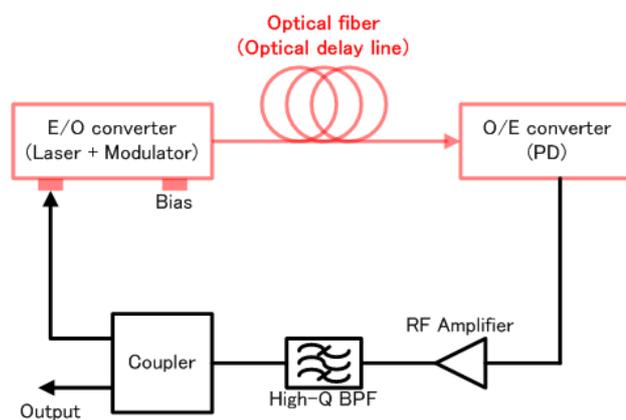


図 1 : OEO の基本構成図

2. OEO の動作原理

OEO の基本構成^[2]を図 1 に示す。

レーザ出力光に RF 変調を与え、光ファイバ (光遅延線路) を通過させた後、O/E 変換器により RF 信号に戻す。RF-AMP (Amplifier) を介した後、BPF (Band Pass Filter) により所望の周波数成分のみを通過させ、光変調器へ入力し、ループを形成することで発振を生じさせる。ここで、このループ回路は共振器にあたり、低損失の光ファイバを長くして Q 値を高くすることができるが、ファイバ長に反比例した周波数間隔でスプリアスが発生する。図 1 の BPF は、そのスプリアスを抑制するための狭帯域 BPF である。ループ内に分配器があり、RF 信号の一部を OEO の出力として取り出す。

OEO の長所は長ファイバ化による高離調域の低位相雑音化である。短所は狭帯域 BPF・ファイバの温度変化・振動に対する特性影響であり、使用環境を安定化する必要がある。

3. 今回試作の目標性能

cERL の CDR^[3]に記載されている RF 基準信号に求められる要求性能等を踏まえ、まず今回の試作における目標性能を設定した。

表 1 : 主要目標性能

項目	目標性能
出力信号周波数	1.3 GHz ± 0.1 ppm
出力信号電力	+8.5 dBm Typ.
電力安定度	0.5 % 以内
光信号出力	-1 dBm Typ.
ジッタ	100 fs RMS 以下 (1Hz~10MHz 離調での位相雑音から算出)
位相雑音	-80 dBc/Hz @10Hz 離調
AM 雑音	-110 dBc/Hz @10Hz 離調

4. 構成

三菱電機で開発した L バンド光マイクロ波発振器^[4]をベースに、加速器用 MO としてのベンチトップ評価を実施した^[5]。その低ジッタ特性を確認し、今回加速器用の低位相雑音 MO ユニットを試作した。図 2 に試作した低位相雑音基準信号発生器の外観写真、図 3 に構成図を示す。

直接変調用 LD (Laser Diode) からの出力光を数 100m の長距離光ファイバを通過させた後、PD (Photo Diode) により電気信号に変換させる。なお、光ファイバと PD の間に光カプラを設け、変調されたレーザ光を直接光マスタ出力として取り出せる構成としている。PD からの電気信号は移相器を介して BPF による帯域制限、RF-AMP による信号増幅後、RF カプラにて 2 つに分岐する。一方を位相ロックループ回路 (PLL 回路) に入力し、分周器で N 分周した信号と OCXO の基準信号との位相を比較し周波数を一致させるよう同期させ、発振周波数を安定化させる。

またカプラのもう一方は更に RF カプラで分岐させ、一方を RF 信号出力として取り出し、もう一方を LD へ入力させ、ループ構成を組むことで発振を生じさせる。なお、上記 BPF は比帯域 0.03%以下として、ファイバ長に反比例する周波数間隔で生じるスプリアスを抑圧させている。



図 2 : 試作 MO 外観写真

5. 評価

試作 MO の構成上、振動・温度変化が特性に影響を及ぼすことから、振動・温度変化の非常に少ない環境である、KEK 内 STF 棟地下のトンネル内にて評価を実施した。測定には Agilent Technologies 製シグナルソースアナライザ E5052B を使用して位相雑音を測定し、離調周波数範囲 1Hz~10MHz での RMS ジッタを算出した。

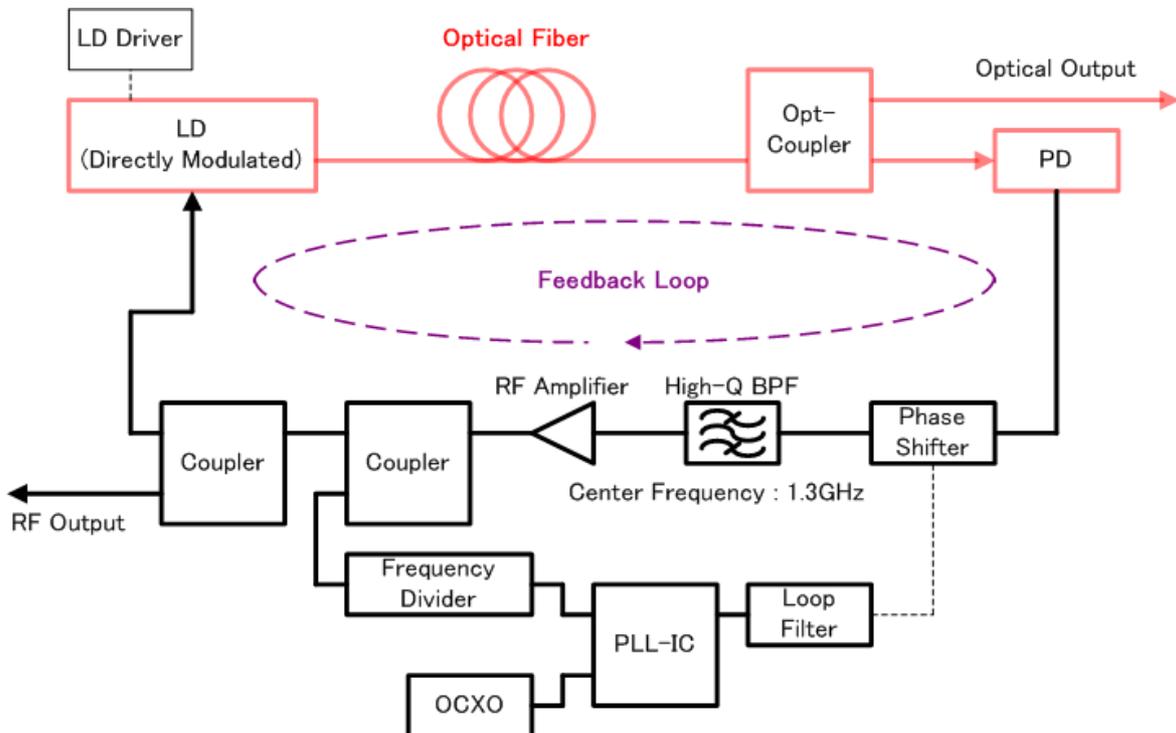


図 3 : 低位相雑音基準信号発生器の構成図

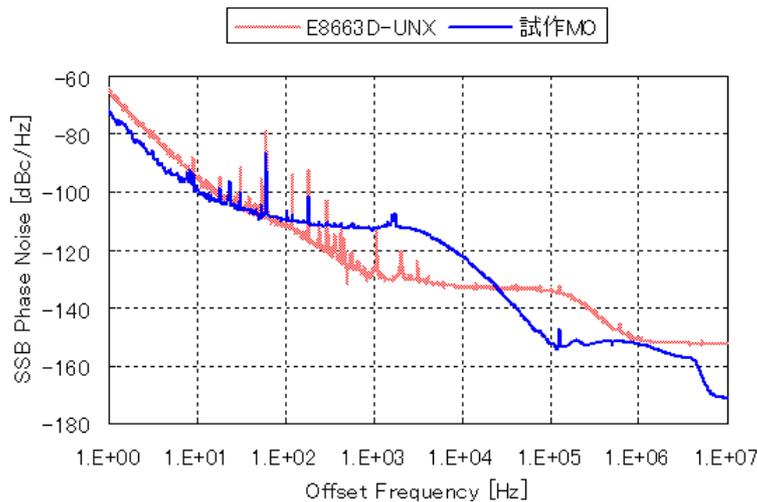


図 4 : 位相の短期安定度 (位相雑音測定結果) 比較

主要性能評価結果は表 2 の通り、各項目において目標性能を満足する結果が得られた。

位相の短期安定度は位相雑音、RMS ジッタにて確認した。比較対象として、市販の代表的な低位相雑音信号発生器である Agilent Technologies 製信号発生器 E8663D-UNX の位相雑音測定結果を併記した。結果、試作 MO のジッタは目標性能である 100fs 以下を満足し、かつ E8663D-UNX の 72.9fs を凌ぐ、48.5fs と良好な特性を確認できた (図 4)。

長期安定度は、位相雑音測定を 48Hr 連続運転し、その変化にて確認した。位相雑音の測定では、測定対象だけでなく測定器・ケーブル等が温度変動、振動の影響を受け、低離調域 (特に 1Hz~10Hz 離調) の測定精度が悪化する。一般試験環境では、室温はエアコン制御による影響 (偏差 3°C 程度)、振動は床下配管や周辺設備の振動を受けるが、トンネル内は非常に少ない室温変化 (偏差 0.4°C) かつ非常に振動の少ない環境であったため、試作 MO の連続動作での高安定性を確認できた (図 5)。

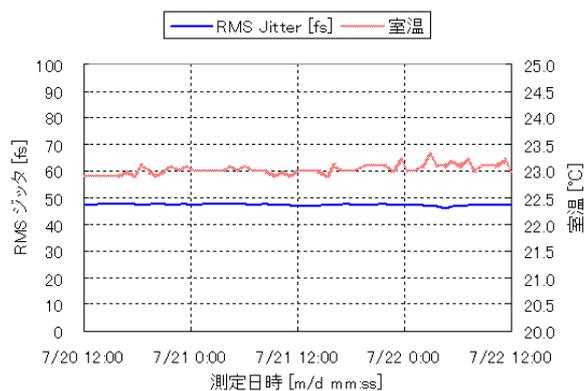


図 5 : 長期安定度 (RMS ジッタ、室温変動)

表 2 : 主要性能評価結果

項目	評価結果
出力信号周波数	1.299999996 GHz (1.3 GHz ± 0.003 ppm)
出力信号電力	+7.1 dBm
電力安定度	0.09 % (48Hr 連続動作)
光信号出力	0.0 dBm
ジッタ	48.5 fs RMS (1Hz~10MHz 離調)
位相雑音	-90.5 dBc/Hz @10Hz 離調
AM 雑音	-114.9 dBc/Hz @10Hz 離調

6. 考察

試作 MO のジッタは 48.5fs であり、市販の低位相雑音信号発生器と比較して良好なジッタ特性を確認できたが、100Hz~30kHz あたりの位相雑音は、市販の信号発生器の方が良好な特性が得られている。ここはカットオフ周波数付近であり、PLL 回路~電圧制御移相器部分の GND 設計、回路の改良で更なる低位相雑音化が期待できる。

7. MO の今後

基準信号源に求められる性能として、今回の試作機ではコンパクト ERL (cERL) に求められるジッタ性能は満足できた。しかし将来建設される数 GeV クラスの ERL 実機 (ERL) では cERL より更なる低ジッタ化が求められる^[1]ため、現状の構成で作成の精度を上げたとしても要求を満たせる見込みは低い。ERL に向けては抜本的な構成見直しが必要である。

数 GeV クラスの ERL では周長 1~2km 程度の規模が想定されている。文献^[1]に挙げるように、電子銃のビーム品質を保持したままで加速・X 線生成・エネルギー回収のプロセスを実現するためには、リング全周にわたって低ジッタの基準信号を分配することが必須である。特に加速空洞のローレベル信号制御装置 (LLRF) やビーム調整用のバンチ到着時刻をフェムト秒の精度で測定する Bunch Arrival Monitor (BAM) は高精度のタイミング信号を必要とする。また放射光ユーザのビームラインもリングの周囲に分散して配置されるため、各実験ステーションに対しても高精度の基準 RF 信号を分配することが重要である。

同様のタイミング分配信号は短パルス X 線を生成する FEL 施設でも重要であり、現在までに様々な方式が提唱されている^{[6], [7]}。具体的な実現方法としては CW レーザや短パルスレーザを使用する方法などいくつかの方式があるものの、原理的には安定した基準信号源と経路長をフィードバックすることで安定化を実現している (図 6)。

これに対して今回試作した MO は内部では長距離光ファイバを共振器の一部として使用しているため、これをそのまま伝送系のリング型光ファイバとして用いれば、RF 基準信号の発生装置と安定化した光マスタ信号分配を 1 台の装置で実現できる可能性がある (図 7)。

従来の分配方式ではそれぞれの経路ごとに個々に安定化する必要があるため、システム全体としては複雑になってしまうことや、経路ごとのタイミング調整が必要になるというデメリットがあった。それに対し、OEO 方式では全体のシステムをシンプルかつ安価に実現できるというメリットがある。

一方で OEO 方式のデメリットとしては、経路の 1ヶ所で何らかのトラブルが生じた際に全体が停止してしまうことや、温度変化に対する安定度の問題が挙げられる。前者についてはシステムの 2 重化で対応可能と考えているが、実用化へ向けてより詳細な検討が必要である。

今後は、基準信号の更なる低位相雑音化に向けた検討に加え、伝送系も含めた光マスタ信号分配システムとして、cERL、ERL への適用可能性を検討していく。

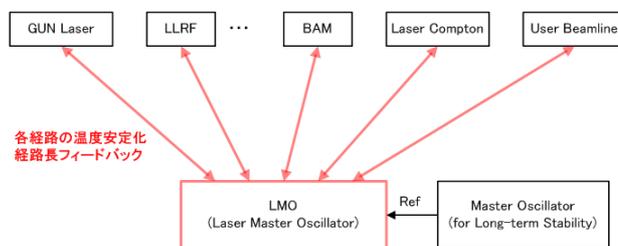


図 6 : タイミング制御構成図 (a)

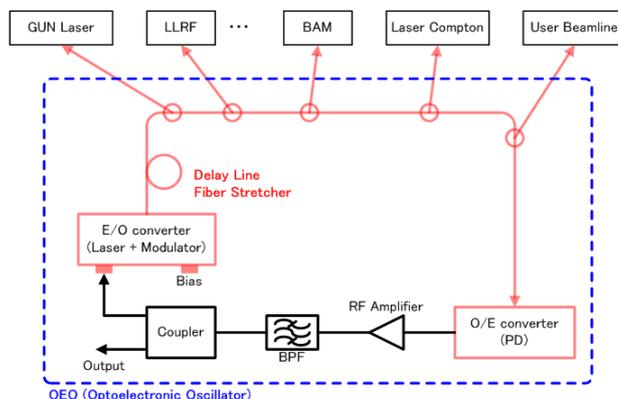


図 7 : タイミング制御構成図 (b)

参考文献

- [1] T. Miyajima, N. Nakamura, "Tolerances for Errors in ERL Linacs", ERL09 WG216 (2009).
- [2] X.S.Yao, L.Maleki, "Optoelectronic microwave oscillator", J. Opt. Soc. Am. B. Vol. 13 (1996).
- [3] R.Hajima, et al., "コンパクト ERL の設計研究", KEK Report 2007-7.
- [4] M.Mizuma, et al., "低スプリアス・周波数高安定光マイクロ波発振器", 信学技報 (2009).
- [5] M.Mizuma, et al., "狭帯域バンドパスフィルタを用いた低ジッタ位相同期光マイクロ波発振器", 2011 年信学会総合大会, C-14-7.
- [6] J. Kim et al., Proc. FEL2004 (339).
- [7] Kartner, FLS2010.