

DEVELOPMENT OF A STABLE RF REFERENCE DISTRIBUTION SYSTEM FOR FUTURE ACCLERATORS

Takashi Naito¹, Junji Urakawa, Kiyokazu Ebihara, Nobuhiro Terunuma, Syunsuke Nozawa(KEK),
 Masaki Amemiya, Michito Imae, Yasuhisa Fujii, Tomonari Suzuyama(AIST)
 High Energy Accelerator Research Organization(KEK), 1-1 Oho, Tsukuba, 305-0801
 Advanced Industrial Science and Technology Institute(AIST), 1-1-1 Umezono, Tsukuba, 305-8536

Abstract

A stable RF reference distribution system with femto-second stability has been developed for the RF synchronization of accelerator and the laser synchronization of the pump-probe experiments. The system uses a phase stabilized optical fiber(PSOF) and an active fiber length stabilization. The PSOF has 5ps/km/degC of the temperature coefficient, which is a very stable compared to the ordinary optical fiber. The active fiber length stabilization uses the fiber stretcher, which can change the fiber length by the piezo actuator. The preliminary test showed the time stability of 25fs(RMS) for 900m length of the PSOF during 10 hours when 2856MHz RF frequency is used.

光ファイバーを用いた高精度基準信号伝送システムの開発

1. はじめに

近來、加速器技術の高精度化からビーム加速やビーム信号との同期のために高精度の基準信号が要求されるようになってきた。International Linear Collider(ILC)では加速器の全長が30kmに亘り加速周波数1.3GHzに 0.1° (0.21ps)の精度を保つ必要がある。SuperKEKBでは加速周波数509MHzを 0.1° (0.54ps)の精度が要求される。また、ERL実験ではビームとレーザーの相対精度50fsが要求される。既存の同軸ケーブルを用いた位相制御や光ファイバーのみでこれらの要求を満たすことは難しい。我々は相安定化Single Mode光ファイバーケーブル(PSOF)とフィードバックを組み合わせ、高精度化を試みた。システムの動作と実用器の製作状況について報告する。

基準信号の伝送は、既存の加速器では同軸ケーブルに位相補正回路を付加して2点間の位相の安定を齎ってきた。[1] [2] これらの方式では伝送距離が長くなると減衰の問題があり、また、位相補正に2つのフェーズシフターを使うため個体差があり完全な補正が難しく高精度化には問題があった。KEKBでは制御計測用の基準信号の伝送にはPSOFを用いた。しかし、PSOFだけでは温度係数がゼロでないため、これだけでは最近の要求に応えることが難しかった。

一方、周波数標準の信号供給システムでは光ファイバーを使い長距離の信号伝送を行っているがフィードバックによって時間変動を低減させる試

みが多数なされている。また、天文学に於いても電波望遠鏡の位相基準の伝送に同様の技術が使われている。[3] [4]

最近、FELやERLの分野では基準信号高精度化は精力的に進められている。[5] [6]

我々は、PSOFとフィードバックを組み合わせることにより小さな位相変動幅をさらに少なくする方針で開発を進めることとした。基本動作の試験は10GHzの基準信号を往復500mの距離をPSOFで伝送し約40fsの安定度を得た。この時の装置は、精度を優先する目的から全ての制御回路を同一の場所に設置し温度管理を行ったため、実際の信号伝送には使用されなかった。今回、KEKBリニアックの加速周波数の安定化を目的に、2856MHzの基準信号の伝送システムを製作した。400m以上の距離を伝送し 0.1° (0.1ps)の安定度を実現することを目的にその性能試験を行った。

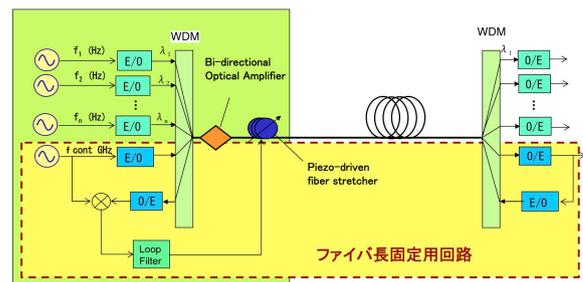


図 1: 基準信号伝送システムの構成図

¹ Mail address : takashi.naito@kek.jp

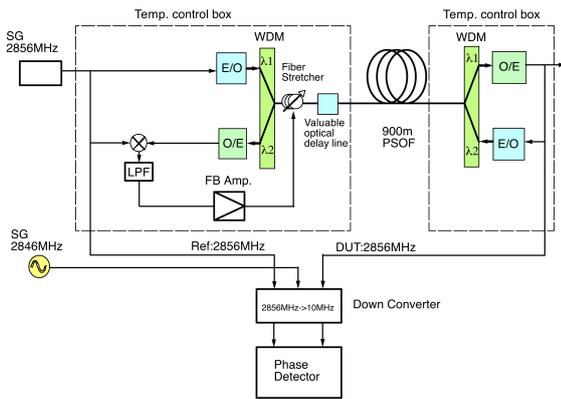


図2：製作した伝送システムの構成図

2. システム構成

図1に構成図を示す。このシステムでは光に変換された基準信号は wavelength-division multiplexing(WDM)によって、合成されるため、同時に複数の基準信号の伝送が可能である。ファイバー長固定回路によって2点間の位相変動を抑える働きをしている。この回路は信号を折り返して伝送し(WDMが往復信号の分離を行っている)、戻ってきた信号の位相と送り側の位相を比較しその偏差を増幅し、ファイバーストレッチャーに戻し伝送長を調整する。この方式の利点はシステム構成が簡単なこと、電気信号で位相調整として往復の位相変動を補正するため複数のフェーズシフターが必要になるが、偏差をファイバー長に戻すことに依って位相調整する箇所が1カ所だけになり個体差によるエラーが発生しないため原理的に精度が得易いこと等々が挙げられる。

図2に製作した伝送システムの構成図を示す。E/O, O/Eを含む回路のあるところは恒温ボックスに入れ温度の安定化をはかっている。フィードバックループ内でも一方方向の信号のみが通過するデバイスの温度変化は安定度に直接影響する、特に位相検出器の温度変化による変動を少なくする必要がある。恒温ボックスはペルチェ素子により0.1℃以下の安定を保つようにした。

PSOFは温度による熱膨張係数がプラスとマイナスの材質で作られ温度変化に対して5ps/km/degC以下の温度係数を持つ様に作られている。PSOFの各温度に於ける温度係数の測定を図3に示す。PSOFは全温度範囲に渡って温度係数がゼロに近い訳ではない。通常空調のある場所で2℃程度変化すると400mでは4ps程度変化すると見積られる。従って、フィードバックの制御範囲としては20ps程度あれば十分である。ファイバー長調整のためのファイバーストレッチャー(FST-001-B, General Photonics Co.)は、1台で約10psの調整範囲があるので2台をカスケードに接続することに依って約20psの調整範囲を持つ構成とした。往復の信号分離用のWDMには1552.52nm, 1551.72nmを使いそれぞれ

50dB以上の信号分離能力がある。

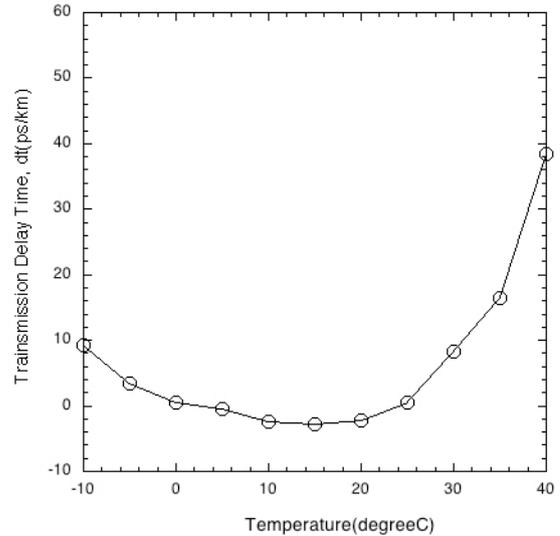


図3：PSOFの温度特性

3. 位相安定度の測定

図4に製作した伝送システムを示す。送受信の各でデバイスはそれぞれ恒温ボックスに納められている。この恒温ボックスは断熱のために外側を断熱材で覆い背後に温度調節のためのペルチェが装着されている。



図4：製作した伝送システム

位相測定のため送受信機は至近距離に置き、1m長のSucoflex cableを用いて位相測定装置に接続されている。この測定の室温に於ける位相安定度は約10fs程度である。

3.1 フィードバックゲインの測定

Valuable Optical Delay Line(VODL)は電気信号のフェーズストレッチャーに相当するもので、手動で光路長を変化させることが出来る。VODLを変化させた時のフィードバック位相がどれだけ変化するかで光路長の変化をどれだけ補正出来たかが解る。図5にフィードバック時の時間変動の特性

を示す。直線の傾きから光路長の変化は1/162に縮小されている。これはファイバー長が4ps変化した時に時間変動は25fs以下になることを示している。安定度を良くするためにはフィードバックゲインを上げる必要があるが、フィードバックアンプのゲインを上げるとノイズが増加しフィードバックが不安定になる。現在はフィルターの帯域を100Hz程度にしてあるが最適化が必要である。

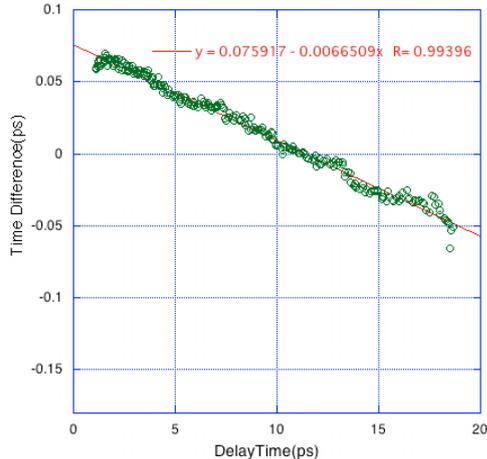


図5：フィードバック時の時間変動

3.2 長時間の位相変動特性の測定

長時間に於ける時間変動を図6に示す。Delay Timeはファイバーストレッチャーの制御電圧から算出した光路長の変化で約3ps変化した時に時間変動は25fs程度である。

同時に測定した周囲温度、それぞれの恒温ボックスの温度との比較を図7に示す。ファイバー長の変化は周囲温度の変化から来ているが、恒温ボックスの温度も僅かに変動させている。今後、さらに安定度を増加するためには恒温ボックスの温度変化をさらに少なくする工夫が必要になると思われる。

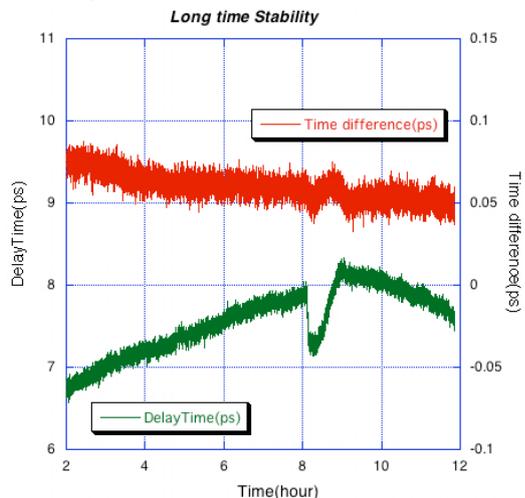


図6 長時間の時間変動

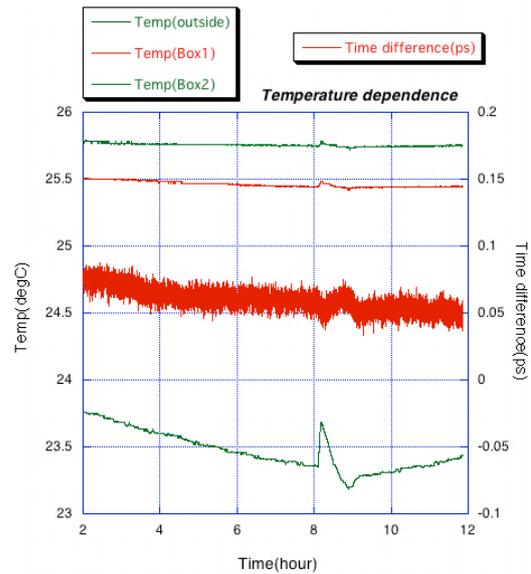


図7：温度変動と時間変動の関係

5. まとめ

高精度の基準信号の伝送システムとして、2856MHzの基準信号を900mのPSOFで伝送し100fs以下の安定度を実現した。今後パラメータの最適化を行い、KEKBリニアックの基準信号との比較を行う予定である。

6. 謝辞

本研究に際し、生出施設長、山口主幹、横谷ILC推進室長に感謝致します。また、PSOFを貸していただいた小林鉄也氏に感謝いたします。

参考文献

- [1] H. Hayano et al., "THE RF REFERENCE LINE FOR TRISTAN", Proceedings of the Particle Accelerator Conference, Washington D.C., Mar, 1987.
- [2] K. Ebihara et al., "RF Reference Line for KEKB", 12th Symp. on Accel. Sci. and Tech., Riken, Saitama, Oct. 1999
- [3] M. Amemiya et al., "Time and Frequency Transfer and Dissemination Methods Using Optical Fiber Network", IEEJ Trans. FM. Vol.126, No.6, 2006
- [4] S. Foreman et al., "Remote transfer of ultrastable frequency references via fiber networks", Review of Science Instruments 78, 021101(2007)
- [5] F. Loehl et al., "SUB-10 FEMTOSECOND STABILIZATION OF A FIBER-LINK USING A BALANCED OPTICAL CROSS-CORRELATOR", Proceedings of PAC07, Albuquerque, USA, 2007, pp384-386
- [6] H. Maesaka et al., "DEVELOPMENT OF THE OPTICAL TIMING AND RF DISTRIBUTION SYSTEM FOR XFEL/SPRING-8", Proceedings of FEL08, Gyeongju, Korea, 2008, pp352-354