

# DEVELOPMENT OF A STABLE RF REFERENCE DISTRIBUTION SYSTEM(II)

Takashi Naito<sup>1</sup>, 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

The phase stabilization of the RF reference signal is key issue for the stable accelerator operation and for the precise experiment as the pump-probe experiments. We developed An RF distribution system for S-band frequency using optic fiber links. The system uses a phase stabilized optical fiber (PSOF) and an active fiber length stabilization. The phase stability is 0.02 degree (20fs) for 6 hours observation. In this paper, we present the test results of the system stability and the evaluation of the existing RF reference line by using this system.

## 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(2)

### 1. はじめに

先端試験加速器(ATF) [1]ではATF2 project[2]として、ダンピングリングから取り出したLow Emittance Beam を使い37nmの垂直ビームサイズを実現することを目標として実験が進められている。ダンピングリングには1.3GeV S-bandリニアックからビームが供給されているが、安定なビーム供給が要求される。ATFではクライストロンギャラリーに空調がないために温度変動がリニアックの基準信号の変動をもたらし、位相変動によるエネルギードリフトがダンピングリングへの入射効率の変動として観測されている。このリニアックの基準信号に開発中の高精度基準信号伝送システムを導入することを検討している。このシステムは位相安定化Single Mode光ファイバーケーブル(PSOF)とアクティブフィードバックを組み合わせ、位相安定度の高精度化を目指している。[3]  
高精度基準信号伝送システムは、近來の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開発が始められた。International Linear Collider(ILC)では加速器の全長が30kmに亘り加速周波数1.3GHzを $0.1^\circ$  (0.21ps)の精度を保つ必要がある。SuperKEKBでは加速周波数509MHzを $0.1^\circ$  (0.54ps)の精度が要求される。また、ERLやFEL[4]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、高精度化を達成しようとしている。今回、S-band

周波数の伝送システムを製作し、その動作評価を行った。また、回路の動作を安定させるために恒温ボックスの安定化をはかった、その効果について報告する。

### 2. フィードバックによる伝送路長の安定化

フィードバックにより、受信端での位相が安定化される動作について説明する。送信側の位相を $\phi_0$ 、受信側の位相を $\phi_1$ 、伝送路の位相遅れを $\phi$ とし、受信端での位相は、

$$\phi_1 = \phi_0 + \phi、$$

$\Delta\phi$ だけ伝送路長が変わった時、受信端での位相は、

$$\phi_1 = \phi_0 + \phi + \Delta\phi、$$

往復で送信側に戻った時の位相は $2\Delta\phi$ 変化しているから、これを戻すには、

$$\phi_1 = \phi_0 + \phi + \Delta\phi - 1/2(2\Delta\phi) = \phi_0 + \phi$$

$-\Delta\phi$ だけファイバー長を戻してやればよいことになる。

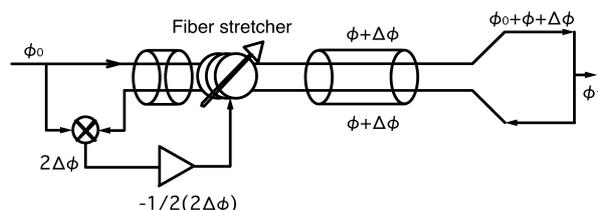


図1 ファイバー長安定化フィードバックの動作

<sup>1</sup> Mail address : takashi.naito@kek.jp

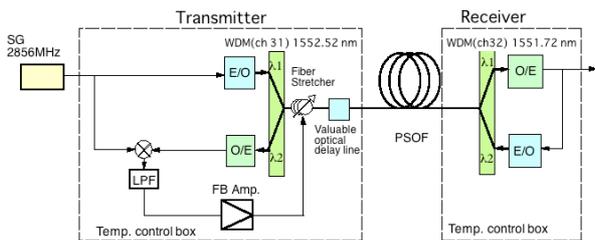


図2 基準信号伝送システムの構成図

### 3. システム構成

図2に基準信号伝送システムの構成図を示す。この回路は信号を折り返しで伝送し（wavelength-division multiplexing(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路長を調整する。この補正を加える事に依って、受信端までの伝送路長は安定化される。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する場合、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などが挙げられる。このシステムでは光に変換された基準信号は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。

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 $\pm 0.02^{\circ}\text{C}$ 以下の安定を保つようにした。

### 3. 温度制御

このシステムでは、原理的には伝送路長の変動に対してフィードバックゲイン分の1まで安定化が可能である。ファイバー長が1ps変動しても200倍のフィードバックゲインがあれば、5fsまで安定化される事になる。しかし、実際はフィードバックに使われているコンポーネントや接続ケーブルの温度変動のために位相安定度は制限される。従って、安定度を向上させるためには回路を恒温ボックスに入れ、温度変化を少なくする必要がある。当初、ペルチェ素子を使った恒温ボックスを製作したが、 $0.1^{\circ}\text{C}$ 程度の温度変動に従って、伝送位相が変動している様子が測定された。(図3)位相安定度を改善するために、ペルチェ素子を使った恒温ボックスを2段に入れ子にした特殊な

恒温ボックスを製作した。製作した恒温ボックスの写真を図4に示す。

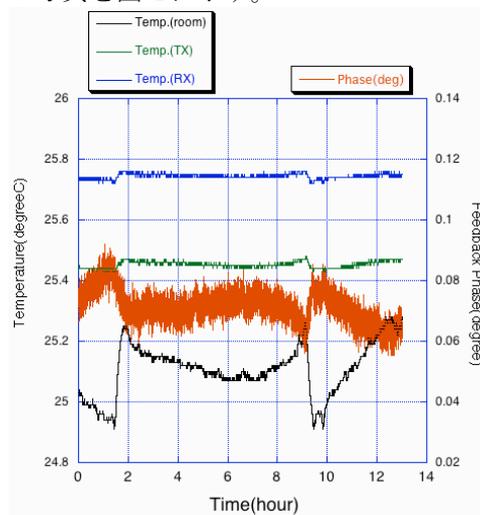


図3 位相安定度と温度特性

赤：フィードバック位相( $1^{\circ}$ は1psに相当)、黒：室温、緑：送信側恒温ボックスの温度、青：受信側恒温ボックスの温度

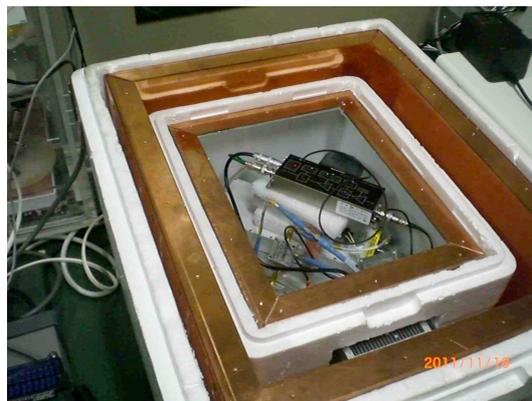


図3 2重製作した恒温ボックス

恒温ボックスを2段にすることにより周囲温度の変化を2重に安定化することが出来る。図5に2重恒温ボックスの温度特性を示す。空調の動作により室温が約 $1^{\circ}\text{C}$ 変化する環境で、恒温ボックス外側は約 $0.1^{\circ}\text{C}$ まで変化を抑えている。さらに恒温ボックス内側では $0.1^{\circ}\text{C}$ の変化に対して温度制御を行うため $0.01^{\circ}\text{C}$ 分解能の测温抵抗体による測定ではLSBが動かなくなった。周囲温度変化の状況が変わっても $\pm 0.02^{\circ}\text{C}$ 程度の安定度が保たれている。

### 4. フィードバックゲイン

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

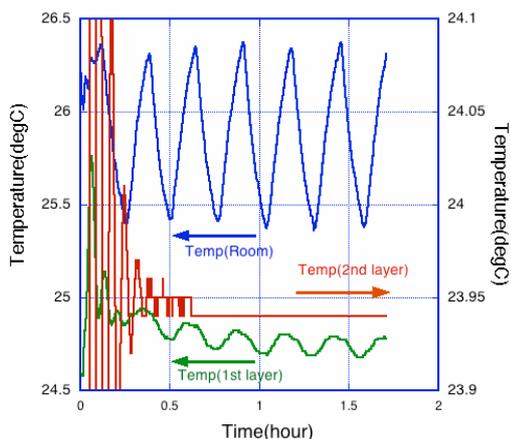


図5 2重恒温ボックスの温度特性  
 青：室温（左目盛）、緑：恒温ボックス外側（左目盛）、赤：恒温ボックス内側（右目盛）

解る。フィードバックゲイン78dBの時、図6にフィードバック時の位相変動の特性を示す。これはファイバー長が3ps変化した時に時間変動は1fs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10Hz程度にしてあるが最適化が必要である。

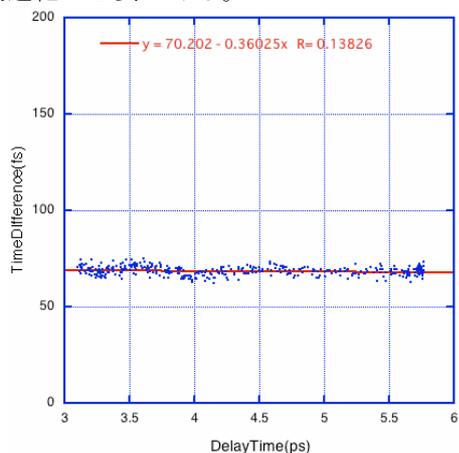


図6 フィードバック時の位相変動

#### 4. 位相安定度の測定

2重恒温ボックスを使い回路の温度安定をおこなったところ、図5に示す様な安定度が測定された。20m長の光ケーブルで送受信端を接続し、室温の変化に対して伝送路長が約600fs変動しているのに対し、フィードバックにより20fs以下まで安定化されている。伝送システムは本来、別の場所に設置され温度変動の環境も違うが、送受信端が同じ場所になれば位相測定が難しいので、この測定ではまだ、送受信の回路は一つの恒温ボックスに入れて測定した。

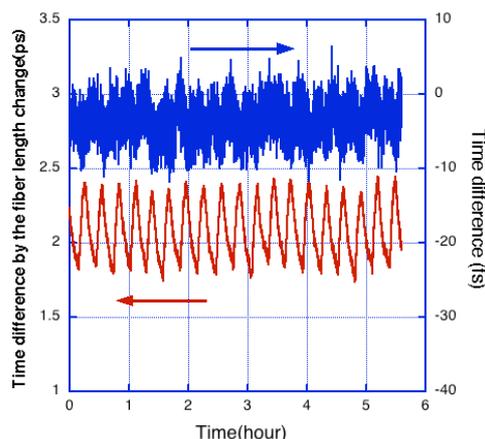


図7 位相安定度の長時間測定  
 赤：ファイバー長の変化（左目盛）、青：不フィードバック制御された伝送時間の変動（右目盛）

#### 5. まとめ

高精度基準信号の伝送システムとして2856MHz伝送システムを製作し、位相安定度の向上のため、温度安定化をはかった結果、20fs以下の安定度を計測した。今後、リニアックの基準信号として使用出来るようにし、ビーム運転に於いて位相安定度向上を評価する予定である。

#### 6. 謝辞

本研究に際し、生田施設長、山口主幹、山本ILC推進室長に感謝致します。本研究は科研費(22540321)の助成を受けたものです。

#### 参考文献

- [1] F. Hinode et. al., 'ATF Design and Study report', KEK Internal 95-4, June(1995)
- [2] ATF2 Group, "ATF2 Proposal Vol.1, CERN-AB-2005-035", (August 11, 2005)
- [3] T. Naito et al., "Development of Timing distribution system with femto-second stability", Proceedings of IPAC2011, San Sebastian, Spain, 2011, pp421-423
- [4] 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