

## FIBER LENGTH STABILIZATION FOR THE OPTICAL TIMING AND RF DISTRIBUTION SYSTEM OF XFEL/SPRING-8

Hirokazu Maesaka<sup>1,A)</sup>, Naoyasu Hosoda<sup>A)</sup>, Takashi Ohshima<sup>A)</sup>, Kenji Tamasaku<sup>A)</sup>, Mitsuru Musha<sup>B)</sup>, Kazuhiro Imai<sup>C)</sup>,  
Motonobu Kouroggi<sup>C)</sup>, Yuji Otake<sup>A)</sup>

<sup>A)</sup> SPring-8 Joint-Project for XFEL/RIKEN,

1-1-1 Kouto, Sayo-cho, Sayo-gun, Hyogo, 679-5148

<sup>B)</sup> The University of Electro-Communications, Institute for Laser Science,

1-5-1 Chofugaoka, Chofushi, Tokyo, 182-8585

<sup>C)</sup> Optical Comb, Inc.,

TokyoTech, Yokohama Venture Plaza W103 4259-3, Nagatsuta-cho, Midori-ku, Yokohama-shi, Kanagawa, 226-8510

### Abstract

We are developing an optical system to synchronize components of the Japanese X-ray free electron laser (XFEL) facility with 100fs accuracy for a distance of 700m. Since the path length of an optical fiber varies with temperature and vibration, the fiber length needs to be actively stabilized. We have employed the fiber length stabilization system which has a Michelson interferometer for length measurement and a fiber stretcher for length control. This system was applied to the 2km-fiber in the SPring-8 storage ring and the path length variation was suppressed to be approximately 1 $\mu$ m corresponding to 5fs timing shift. Thus, the principle of the fiber length stabilization has been established.

## XFEL/SPring-8の光タイミング・高周波分配システムにおけるファイバ長安定化

### 1. はじめに

現在、兵庫県佐用町のSPring-8キャンパスにX線自由電子レーザー(XFEL)施設を建設中である。本施設は低エミッタンス熱電子銃・Cバンド電子線形加速器・真空封止アンジュレータからなり、全長約700mである。XFELを発生させるためには電子ビームのピーク電流を数kAまで高めなければならない。電子銃のビーム電流は約1Aであるため、加速器の上流部にてバンチ長を数千分の1まで圧縮することで上記ピーク電流を得る。時間スケールでは最初約1nsであるバンチ長を数100fsまで圧縮することとなる。したがって、安定にXFELを発生させるには加速器のタイミング・高周波を100fs以下の時間精度で同期させる必要がある<sup>[1]</sup>。また、利用者においてポンププローブ実験のように時間精度が必要な実験をおこなう場合にも加速器と観測装置とを100fs以下の精度で同期させる必要がある。これほどの高精度なタイミング・高周波信号を最大約1000mにおよぶ長い伝送路を経由して加速器や利用者に分配しなければならない。

以上のような要求を満たすため、XFEL施設のタイミング・高周波分配システムでは光に信号を乗せて光ファイバで分配する方法を用いる<sup>[2]</sup>。光を用いる方法は、信号減衰が少なくまたタイミングゆらぎの原因となる伝送路(ファイバ)長変動の高精度の制御も可能となる利点がある。本稿では、ファイバ長の安定化制御システムとそのテスト結果について詳しく述べる。

### 2. ファイバ長安定化

タイミング・高周波信号を100fs以下の精度で伝送するには、伝送路の遅延時間の変化をそれ以下の値にしなければならない。光ファイバの伝送速度は0.2m/nsなので、少なくとも光ファイバの長さの変化を20 $\mu$ m以下に抑える必要がある。一般に光ファイバの熱膨張係数は約100ppm/°Cであり、現在最も熱膨張係数の小さい位相安定化ファイバを使えば2ppm/°Cまで抑えられる。本加速器で用いるファイバの長さは最大約1000mであるので、位相安定化ファイバでも1°Cの温度変化で長さが2mmも変わってしまい、遅延時間にして10psもの大きな変化となる。備え付けの空調ではファイバの温度変化を1°C以下にすることはできず、たとえ冷却水などを使って温度を安定化しても0.1°C以下に制御するのは難しいため1psの精度までしか得られない。したがって、ファイバ長を安定化するための制御が必須である。

ファイバ長安定化には大型電波望遠鏡計画ALMAのために開発されたシステム<sup>[3]</sup>を参考に設計を進めている。図1に概略図を示す。高周波信号を送るファイバにファイバ長監視用のレーザー光を合わせて送信し、受信機側で跳ね返す。帰ってきた光とあらかじめ光源から分岐しておいた参照光とを干渉させてファイバ長の変化を監視する。いわゆるマイケルソン干渉計でファイバ長を測定するわけである。得られた長さ変動をファイバストレッチャーに負帰還制御することによってファイバ長を安定化させる。ファイバストレッチャーとはピエゾ素子にファイバを巻き

<sup>1</sup> E-mail: maesaka@spring8.or.jp

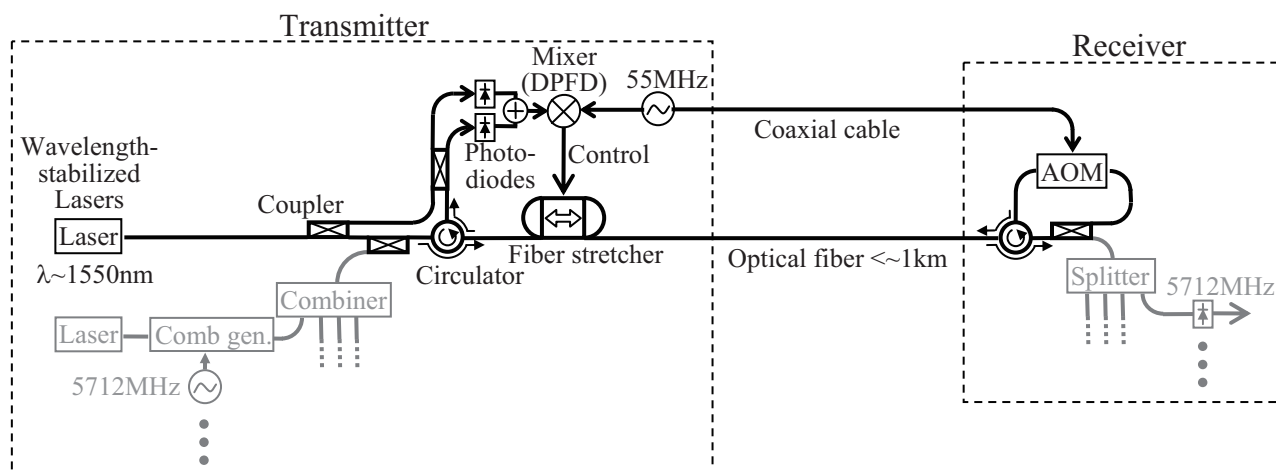


図 1: ファイバ長安定化システムの概略図

つけたもので、力学的にファイバを伸び縮みさせて長さを変える部品である。

本システムの特徴としては、まず、光の干渉を用いて長さの変化を測定するため、用いる光の波長(1550nm)以下の精度で変化をとらえられることである。また、ファイバストレッチャにおいて1 $\mu$ m精度の制御ができることがわかっている。これは時間精度にして5fsであり、要求精度より1桁以上いいものである。光の干渉ではなくマイクロ波の位相を使ってファイバ長を安定化した例として文献[4]の12fsというものがあるが、われわれの方法はこれを上回っている。

それ以外にも、跳ね返す光を55MHzのAOM(Acousto-Optic Modulator)を通して周波数をシフトさせるという工夫がなされている。周波数シフトをする理由はいくつかあり、ひとつは受信機から帰ってきた光とファイバの途中での散乱や接続部の反射による光とをはっきり分けるためである。また、周波数シフトすることにより干渉信号に55MHzのビートが現れ、その位相は光の位相そのものとなる。一般に光源のコヒーレント長がファイバ長より短いと干渉信号が雑音に埋もれてしまうが、ビート信号はコヒーレント長が短くてもはっきりと現れる。

55MHzのビート信号はDPFD(Digital Phase-Frequency Discriminator)という特殊なミキサ回路で検波される<sup>[3]</sup>。このビート信号を一般的なミキサで検波した場合、検波出力はファイバ長が光の波長分変化するごとに振動する。もしこの信号を用いてファイバ長を負帰還制御した場合、制御帯域を超える速さで光の半波長以上のファイバ長変化を与える外乱が加わると、制御が別の安定点に移ってしまう(サイクルスリップ)。光の波長はわずか1.5 $\mu$ mであるため、このような外乱が加わる可能性は非常に高い。そこで、DPFDというサイクルスリップが起らない回路を用いる。本システムのDPFDにはふたつの12ビットクロックカウンタがあり、ひとつは干渉でえられたビート信号を、もうひとつは局部発信器をそれぞれカウントする。この二つのカウンタの差は、回路が起動して以来、光の何波長分のファイバ長が

変化したかを表すので、光の波長より大きい変化をとらえることができる。このDPFDのダイナミックレンジは約6mmである。さらに、この差の値をDA変換し低域通過フィルタを通して平坦化すると光の位相変化に比例した信号も得ることができる。このファイバ長安定化システムはすでに実証実験がおこなわれており、25kmのファイバを3 $\mu$ m以内に制御できることが確かめられている<sup>[3]</sup>。

### 3. SPring-8でのファイバ長安定化実験

SPring-8蓄積リングでは4つのRFステーション間の同期をとるための位相安定化ファイバ(熱膨張係数2ppm/ $^{\circ}$ C)がすでに設置されているため、そのファイバの長さを安定化させる実験をおこなった。予備のファイバは各RFステーションの位相調整室で途切れているため、リング全体でひと続きとなるようにパッチコードでつないだ。このようにしてできた長さ約2kmのファイバに図1のシステムを適用した。ただし、今回は送信機と受信機が同じ場所にあるので、簡単のため、受信機で光をはね返さずにそのまま参照光と干渉させた。

まず、ファイバ長の変動をみるために、制御をかけずに誤差信号をとった。その結果を図2に示す。2.5時間で最大約0.8mmの変動があった。つぎに、ファイバ長安定化制御をおこなったときの誤差信号とファイバストレッチャに対する制御信号を図3に示す。ファイバ長は4時間以上安定に制御されており、誤差信号に乱れは見られない。その一方でファイバの長さが変化しているため制御信号には変動がみられる。

最後に、無制御時と制御時のファイバ長揺らぎ(誤差信号)のスペクトルを図4に示す。まず、無制御時のスペクトルでは約10Hzまでおよそ1/fに比例して下がっているが、それ以上の周波数では平坦となっている。この平坦なノイズフロアは光源の線幅で制限されていることが分かっている。10Hz以上でもファイバ長揺らぎが1/fに従って減少していると仮定すると、10Hzですでに約0.1 $\mu$ m/ $\sqrt{\text{Hz}}$ と十分低いのでそれ以上の周波数では制御する必要がないと思

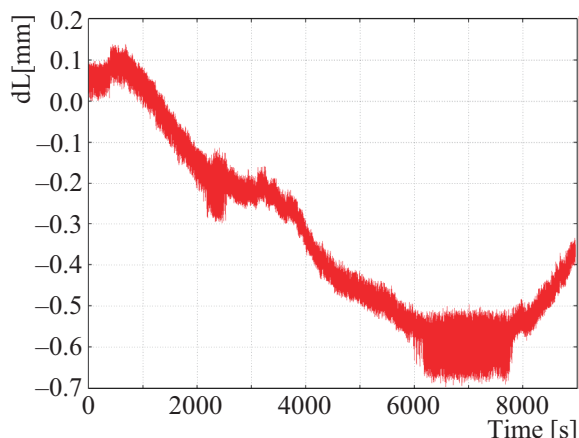


図 2: 無制御時のファイバ長変動。横軸は時間 [秒], 縦軸はファイバ長変動 [mm] である。

われる。逆に制御すると光源の雑音でファイバ長を揺さぶってしまうことになってしまう。つぎに制御時のスペクトルを見ると、100Hz以下で無制御時との差が見られるのでその領域で制御が働いていることが分かる。そして30Hz以下では揺らぎが低く抑えられており、1Hz付近では約 $2 \times 10^{-4} \mu\text{m}/\sqrt{\text{Hz}}$ と非常に低い値となっている。ただ、30~100Hzで無制御時の揺らぎを少し上回って発振気味になっている。しかしながら、白色雑音の仮定のもとで100Hz以下のスペクトルを積分すると約 $1 \mu\text{m}$ にしかならない。時間の揺らぎにして約5fsに相当し、目標値を十分達成できている。なお、帯域を100Hz以下に制限しているのはファイバストレッチャである。

#### 4. まとめと今後

XFEL/SPring-8の光タイミング・高周波分配システムでは、700mという長い距離にわたって各機器を100fs以下の精度で同期をとる必要があるため、光ファイバ長の安定化が不可欠である。そこで、光の干渉を用いてファイバ長変化を監視しファイバストレッチャで一定に保つという方式をとることとした。実際にSPring-8蓄積リングに既設の約2kmのファイバの長さを制御したところ、 $1 \mu\text{m}$ の精度で安定化することができた。これはわずか5fsの時間変動にしかならず、要求値を十分に満たしている。このように、ファイバ長安定化の原理は実証された。

残されている開発項目としては、まず、ファイバストレッチャとしてダイナミックレンジ約6mm、制御帯域が最大約5kHzのものを新しく光コム社と共同で開発中である。つぎに、図 1ではAOMが受信機側にあるため55MHzの信号をすべての受信機に配らなければならないという欠点がある。現在、AOMを送信機側に設置しても問題がないかどうか検討中である。ほかにも、光源の狭線幅化・サーボ系の最適化などを進めていき、さらに精度と信頼性を向上させる予定である。

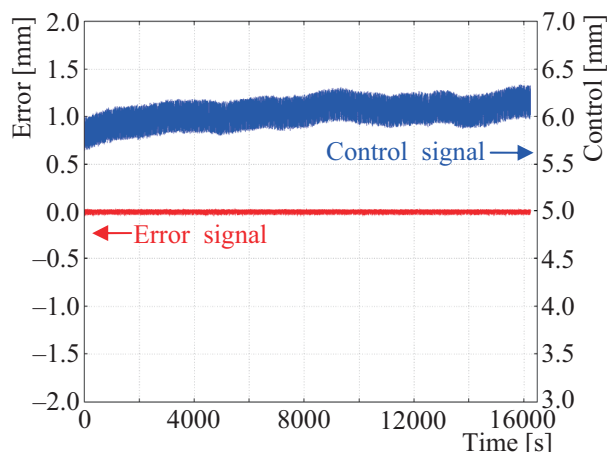


図 3: 安定化制御時の誤差信号(赤・左目盛)とファイバストレッチャに対する制御信号(青・右目盛)。横軸は時間[秒]。

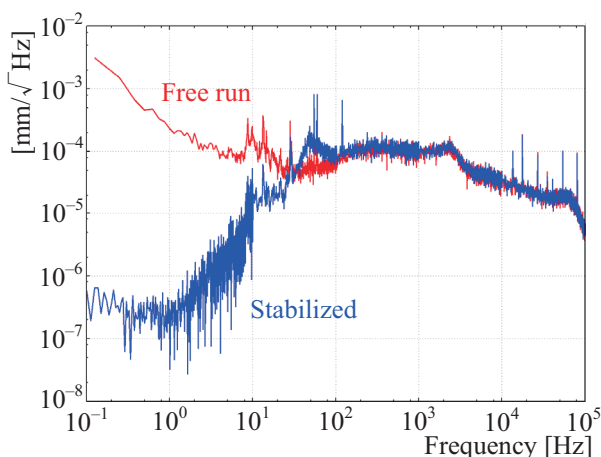


図 4: 誤差信号スペクトル。赤が無制御時、青が安定化制御時のものである。

#### 5. 謝辞

SPring-8蓄積リングでのファイバ長安定化実験では(財)高輝度光科学研究センター加速器部門のご好意でファイバを利用させていただきました。この場を借りて感謝申し上げます。

#### 参考文献

- [1] H. Tanaka *et al.*, “Bunch length variation and timing jitter caused by RF system instability”, in these proceedings..
- [2] Y. Otake *et al.*, “Development of an optical timing and rf distribution system for XFEL/SPring-8”, in these proceedings; N. Hosoda *et al.*, “Distribution of a 5.7 GHz RF by optical comb and a trigger signal by PSK method for XFEL/SPring-8”, in these proceedings.
- [3] M. Musha *et al.*, “Robust and precise length stabilization of a 25-km long optical fiber using an optical interferometric method with a digital phase-frequency discriminator”, *Appl. Phys. B* **82**, 555 (2006).
- [4] F. O. Ilday *et al.*, “Long-Distance Femtosecond-Level Optical Synchronization”, *Proc. AP-MWP* 2006.