

SACLA 光ファイバ光路長制御システムの設計と性能

DESIGN AND PERFORMANCE OF OPTICAL FIBER LENGTH STABILIZATION SYSTEM FOR SACLA

前坂比呂和^{#, A)}, 大島隆^{A)}, 松原伸一^{B)}, 大竹雄次^{A)}

Hirokazu Maesaka^{#, A)}, Takashi Ohshima^{A)}, Shin'ichi Matsubara^{B)}, Yuji Otake^{A)}

^{A)} RIKEN SPring-8 Center, XFEL Division

^{B)} Japan Synchrotron Radiation Research Institute (JASRI), XFEL Utilization Division

Abstract

In order to synchronize precisely among accelerator components in the x-ray free-electron laser (XFEL) facility, SACLA, an optical fiber length stabilization system for a reference rf signal transmitter was developed and installed. A tolerance of timing drift is set to 50 fs for the stable generation of XFEL. In order to achieve this timing stability, we employed an optical interferometer for the measurement of optical path-length variation and we utilized a piezo-electric fiber stretcher for the compensation of the length variation. A frequency-stabilized laser with a wavelength of 1.5 μm and an optical mm-wave signal of 91.4 GHz are transmitted to receivers together with an rf signal and the laser lights are reflected back to the interferometers. The detected length variations are fed back to the fiber stretchers for the length regulations. By using this system, the timing drift of a reference rf signal transferred through a several-100m-long optical fiber was confirmed to be suppressed within 50 fs. Consequently, the optical fiber length stabilization system has sufficient accuracy for SACLA.

1. はじめに

SACLA のような X 線自由電子レーザー(XFEL)施設では、電子ビームのバンチ長を数 10 fs まで圧縮する必要があるため、各加速器構成機器が精密に同期されていないと行かない。また、ポンププローブ実験などの XFEL ユーザにおいても、XFEL と外部レーザーとが十分に同期している必要がある。SACLA では、装置全長 700 m にわたって必要となる同期精度が短期ジッタで 50 fs rms、長期ドリフトで 50 fs pk-pk と見積もられている^[1]。この同期精度を達成するため、1550 nm 帯を用いた光タイミング高周波伝送システムを開発し^[2]、安定なタイミング信号を配信することとしてきた。

この光タイミング高周波伝送システムでは、タイミングドリフトを低減するため、以下のような対策がとられている。

- 温度係数 5 ps/km/K 以下の位相安定化光ファイバを用いて温度によるファイバ長変動を抑制。
- 温度安定度 0.4 K pk-pk の恒温ダクトに位相安定化光ファイバを通すことで環境温度変動の影響を低減。
- 温度安定度 0.4 K pk-pk の水冷恒温 19 インチラックにタイミング関係の電子機器を設置することで、電子回路の温度ドリフトを抑制。

しかし、このような対策をとったとしても、最長で 1 km に及ぶ光ファイバの光路長の日変動は 1 ps 以上になりうる。実際、SACLA では 100 m 程度の光ファイバで伝送した先で 100 fs 以上のタイミングドリフトが観測されており^[3]、光ファイバ光路長の変動もその一因と考えられる。そこで、われわれは

[#]maesaka@spring8.or.jp

光ファイバ光路長制御システムを開発・製作し、SACLA に導入した。

本稿では、この光ファイバ光路長制御システムの設計、および、その性能について述べる。性能については、単体性能に加えて、SACLA の運転に適用した際のものも合わせて報告する。

2. システムの概略

SACLA の光タイミング高周波伝送システム（以下、光伝送システム）、および、光ファイバ光路長制御システム（以下、光路長制御システム）の概略図を Figure 1 に示す。光伝送システム 1 系統につき光ファイバが 2 本敷設されており、1 本が光伝送システム用、もう 1 本が光路長制御システム用である。各システムの光ファイバを独立にした理由として、光路長制御システムが光伝送システムに与える影響を最小限に留めることができ、光路長制御システムでの障害が加速器の運転に致命的とならないことや、光路長制御システムの設計の自由度を広げることができるなどが挙げられる。

光路長制御システムでは、周波数安定化レーザー (Frequency-Stabilized Laser) とミリ波で変調された光信号 (Optical mm-wave Signal) の 2 つの信号が長さの基準として用いられる。これらの光は受信機側のミラーで反射され、送信機側の干渉計に返される。この干渉計で光路長変動を監視し、圧電式ファイバストレッチャで物理的にファイバ長を伸び縮みさせて光路長変動を補正する。以上の測長用の光信号に加えて、光路長制御用の光ファイバには 5712 MHz で変調された光信号も合わせて伝送する。この信号は、別途光伝送システムで配信される 5712 MHz 信号と受信機側で位相比較することにより、光伝送シ

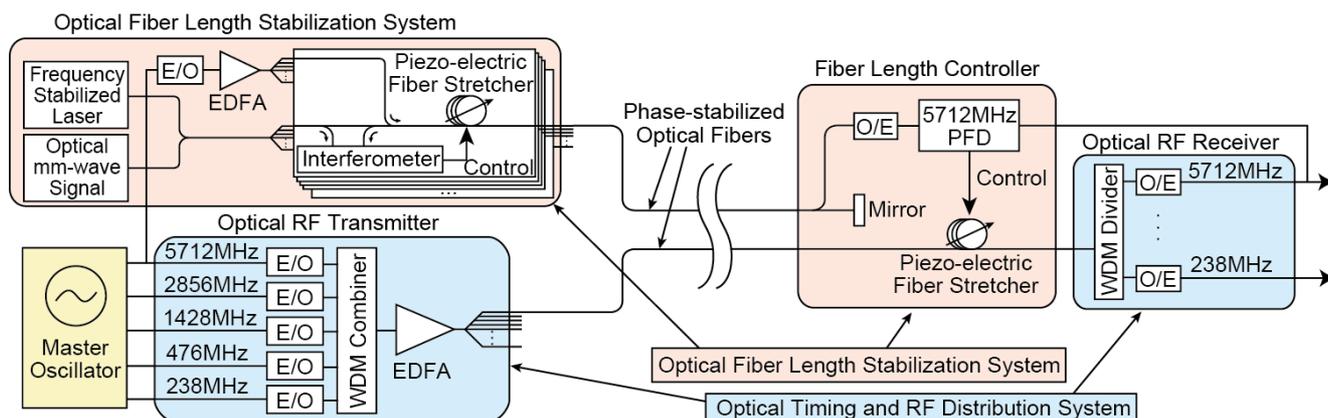


Figure 1: Schematic diagram of the optical rf distribution system in SACLA, including the optical fiber length stabilization system.

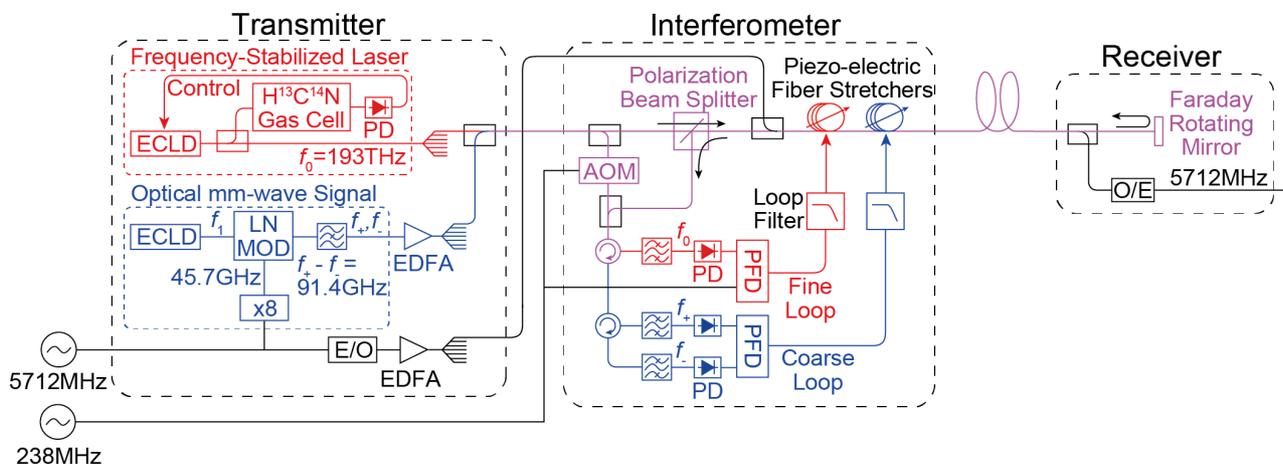


Figure 2: Block diagram of the optical fiber length stabilization system.

システム用光ファイバの光路長変動を監視するために用いられる。得られた光路長変動データは受信機側に設置されている光伝送システム用ファイバストレッチャにフィードバックされ、光路長が安定化される。

光伝送システムでは、Cバンド主加速部で使用する5712MHz、および、その分周信号である2856MHz、1428MHz、476MHz、238MHzがマスタオシレータにて生成され、Electric-to-Optical (E/O) 変換器にて光信号に変換される。これらの光信号は波長分割多重 (Wavelength-Division Multiplexing, WDM) により合成され、1本の光ファイバにまとめられる。この光信号は光ファイバ増幅器 (Erbium-Doped Fiber Amplifier, EDFA) で増幅され、各種構成機器に分配される。この光信号は受信機の Optical-to-Electric (O/E) 変換器にて電気信号が復元され、加速RF信号などとして使用される。前述のとおり、5712MHz信号は光路長制御システムのもとの位相比較され、光伝送システムの光路長安定化に用いられる。

3. 光路長制御システムの構成

本節では、まず光路長制御システム全体について簡単に説明し、その後、測長用光源や干渉計、フィードバック制御の詳細について述べる。

3.1 光路長制御システムの概略

光路長制御システムのブロック図を Figure 2 に示す。前節でも述べたように、周波数安定化レーザとミリ波光信号を測長基準として用いる。周波数安定化レーザは波長約1549nm、周波数約193THzで、この光の位相を使って光路長変動を測定する。そのため、感度としてはナノメートル領域となるが、測長範囲は1.5 μ mほど、時間換算で5fs程度にしかない。ミリ波光信号の方は、91.4GHz離れた2本の光信号 (f_+ , f_-) を生成することで、91.4GHzの位相から光路長変動を測定できるようにしている。このミリ波の波長は約3.3mm、周期は11psほどで、比較的広い範囲の光路長変動を測定できることとなる。

このように2種類の測長基準を用いるので、光路長制御システムには2つのフィードバックループが存在する。この2つのループを区別するため、周波数安定化レーザのループをFine系、ミリ波光信号のループをCoarse系と呼ぶこととする。これら2系統の制御ループを用いることで、測長結果を比較することができ、測長精度の信頼性が確認できるという特長がある。また、Coarse系の測長範囲は想定される光路長変動量よりも十分大きいので、電源を落としたあとに再投入した際でもCoarse系の測長結果に

したがってもとに戻すことで、停止前の光路長を再現することができる。このことから、電源投入時にはまず Coarse 系で停止前の状態付近まで戻し、その次に Fine 系を稼働させて光路長をその状態に精密に固定すればいいということになる。

3.2 測長用光源

Fine 系で用いる周波数安定化光源は、外部共振器型レーザダイオード (External Cavity Laser Diode, ECLD) からの光を $\text{H}^{13}\text{C}^{14}\text{N}$ (シアン化水素) ガスの P9 吸収線 (1548.955nm) にロックさせたものである。ECLD のスペクトル線幅は 3 kHz 以下で、これは 3 ms 程度遅延させても (距離にして 100 km 程度飛ばしても) 干渉性を持つことに相当するので、われわれの用途では問題にならない。周波数安定度については、Figure 3 に示すように全幅で約 1×10^{-9} である。これは 1 km の距離の変動が $1 \mu\text{m}$ の精度で検出できることに相当する。

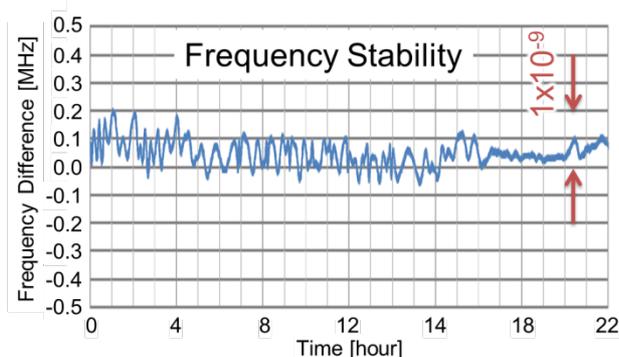


Figure 3: Frequency stability of the frequency-stabilized laser.

Coarse 系で使用するミリ波光信号は、ECLD からの光 f_i を LiNbO_3 変調器 (LN-MOD) に入力し、5712 MHz の 8 通倍である 45.7 GHz で変調して生成する。LN-MOD により 2 本のサイドバンド f_+ , f_- が作られ、その後の光バンド阻止フィルタで搬送波 f_i を除去することで 91.4 GHz 離れたサイドバンドだけが残る。したがって、結果的に 91.4 GHz で AM 変調された光信号が生成されることとなる。このミリ波の周波数安定度は、元の 5712 MHz の安定度でほぼ決まり、その値は全幅で 1×10^{-9} 以下である。これは Fine 系と同等の測長安定性を持つことを示している。また、8 通倍器が位相ノイズを増やしていないことを確認済みで、LN-MOD においても変調度を安定化するように DC バイアスを制御するなど、安定性向上のための対策を講じている。

3.3 干渉計

測長用の干渉計に入った光信号は、まず参照光を取り出す光カップラを通り、偏光ビームスプリッタ (Polarization Beam Splitter, PBS)、ファイバストレッチャを経て受信機に向かう。受信機側に入った光信号のうち、5712 MHz 光信号のみが取り出されて O/E 変換される。残りの測長用光信号はファラデー

回転ミラー (Faraday Rotating Mirror, FRM) で偏光を 90 度回転させた上で反射され、干渉計に戻される。戻った反射光は、PBS により分離され参照光と混合される。PBS と FRM を用いることで、途中のコネクタなどで散乱して返ってきた光を偏光の違いで弁別できるので、受信機までの距離を的確に測定することができる。

干渉信号を得やすくするため、参照光については音響光学変調器 (Acousto-Optic Modulator, AOM) で周波数を 238 MHz シフトさせてヘテロダイン検波する。反射光に周波数シフトした参照光を混合すると、238 MHz で AM 変調された光信号が得られる。その結果、Photo-Diode (PD) を用いて電気信号を取り出すと、238 MHz のビート信号が得られる。この 238 MHz 信号の位相が光の位相に相当する。

本システムでは測長用光信号が複数あるので、光バンドパスフィルタで光信号を分離してから PD に入れる。Fine 系の光の位相は、PD で得られた 238 MHz 信号と AOM に入力した 238 MHz 信号の位相を比較すれば求められる。Coarse 系のミリ波 (91.4 GHz) の位相は、2 本の光信号 f_+ , f_- のそれぞれから得られる 238 MHz 信号の位相を比較することで求めることができる。位相の比較には、位相周波数弁別器 (Phase-Frequency Discriminator, PFD) を用いている。これは位相に線形な電圧を出力するので、そのままフィードバックに使うことができる。

3.4 フィードバック制御

干渉計から得られた測長結果はフィードバック用のループフィルタを経て圧電式ファイバストレッチャに帰還される。本システムで使用するファイバストレッチャは制御範囲が 3 mm で、3 kHz 程度までフラットな周波数特性を持っている。しかし、15 kHz に機械的な共振があるので、その共振の影響を受けないようにループフィルタを設計する必要がある。

Fine 系については、測長範囲が $1.5 \mu\text{m}$ と狭く、ナノメートル級の変動にも敏感であるため、わずかな振動でも測長範囲から外れるおそれがある。そこで、Fine 系のループフィルタは帯域を広く取り、Figure 4 に示したボード線図のように、コーナー周波数を 1 kHz 程度とした。そして、位相余裕は 70 度ほど取れているので十分安定である。このように、Fine 系では帯域を広くすることで速い外乱が入っても安定に制御できるようにした。

Coarse 系については、測長範囲が約 3.3 mm と十分に広いので、外乱が入っても測長範囲を超えることはほぼないと考えられる。そのため、速い外乱に対応する必要がない。そこで、Coarse 系のループフィルタは単純に Proportional-Integral (PI) 制御とし、コーナー周波数が約 0.02 Hz となるようにパラメータが調整されている。

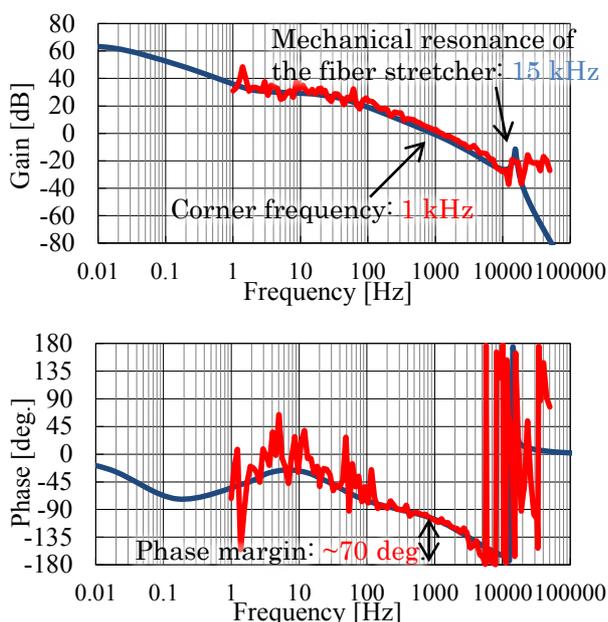


Figure 4: Board diagram of the fine control loop. The navy lines are calculation and the red lines are the measured results.

4. 性能評価

SACLA に導入した光路長制御システムの性能を調べるため、実験室での単体性能、SACLA での短期的な分解能測定・長期安定度測定、および、SACLA の運転中の加速 RF 位相の変動量について順に述べる。

4.1 実験室での性能測定

光路長制御システムの開発段階にて実験室で測定した結果について簡単に述べる。制御したのは長さ 1.5 km の光ファイバである。その結果を Figure 5 に示す。Fine 系、Coarse 系とも適切に光路長を制御できており、ループ内での測定ではあるものの、10 時間にわたって Fine 系で 1 fs pk-pk、Coarse 系で 70 fs pk-pk 以内に伝送遅延時間が安定化されていることがわかる。

4.2 SACLA での分解能測定

SACLA に実装された際の性能として、まず、短期データから得られる光路長測定分解能について示す。例として、長さ約 400 m の光ファイバで伝送しているシステムの 1 時間分のトレンドグラフを Figure 6 に示す。なお、このときは Fine 系の制御のみをかけている。光路長は安定化されているので、Fine 系、Coarse 系とも測長結果はほぼ一定で、このデータのばらつきが分解能であると考えられる。その値は、伝送遅延時間換算で Fine 系が 0.13 fs rms、Coarse 系が 2.8 fs rms であった。これは SACLA での光路長安定度に対する要求値 (50 fs) よりきわめて小さく、十分な分解能である。Coarse 系の分解能が 4.1 節のデータより良くなっているのは、実機製作時の低ノイズ設計が反映されたためと考えられる。

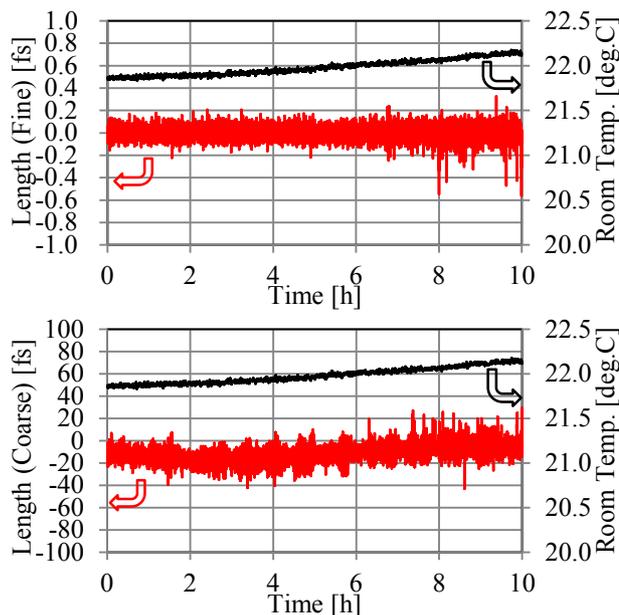


Figure 5: Trend graphs of the propagation delay variation for a 1.5km-long optical fiber measured at a laboratory. The upper figure shows fine loop data (red line) and the lower figure shows coarse loop data (red line). The room temperature is also plotted by the black lines.

4.3 SACLA での長期安定度

光路長制御の長期安定性を調べるため、約 2 週間の安定度データを Figure 7 に示す。このデータも 4.2 節と同様に長さ約 400 m の系統のもので、Fine 系の制御をかけてある。測長データの変動は Fine 系で 2 fs pk-pk、Coarse 系で 50 fs pk-pk に収まっていることがわかる。このことは、別々の測長方法を使って得たデータが 50 fs の精度で一致したことを示しており、われわれの光路長制御システムが 50 fs の精度を持っていると結論できる。

また、Figure 7 の下図からファイバ長変動を抑制するために約 1 ps 相当の長さ調整をしたことがわかる。なお、この測定では光伝送システムのファイバストレッチャを制御しておらず、図には受信機側の

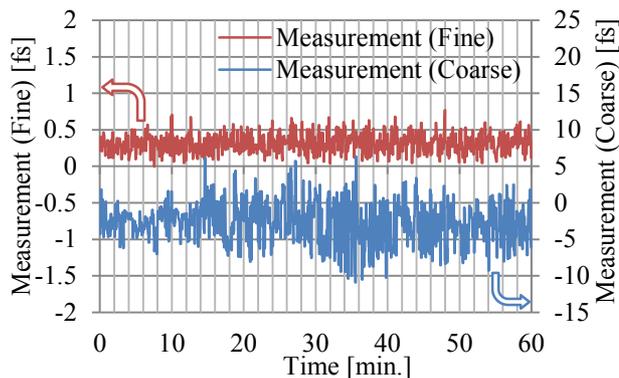


Figure 6: One-hour trend graphs of the propagation delay variation for a 400m-long optical fiber in SACLA. The red line shows fine loop data and the blue line shows coarse loop. The rms values of these data are 0.13 fs (fine) and 2.8 fs (coarse).

5712 MHz PFD で測定した光伝送システムの光路長測定データもプロットしている。このデータはファイバストレッチャ制御量とほぼ逆位相の関係となっている。光路長制御システム用光ファイバと光伝送システム用光ファイバは同じ経路を通過しているので、この 2 本の光ファイバはほぼ同じ光路長変動を示すことが予想されるが、実際にそのようになっていることをこのデータが示していることとなる。このように、光路長制御システムは想定通りの動作をしているものと考えられる。

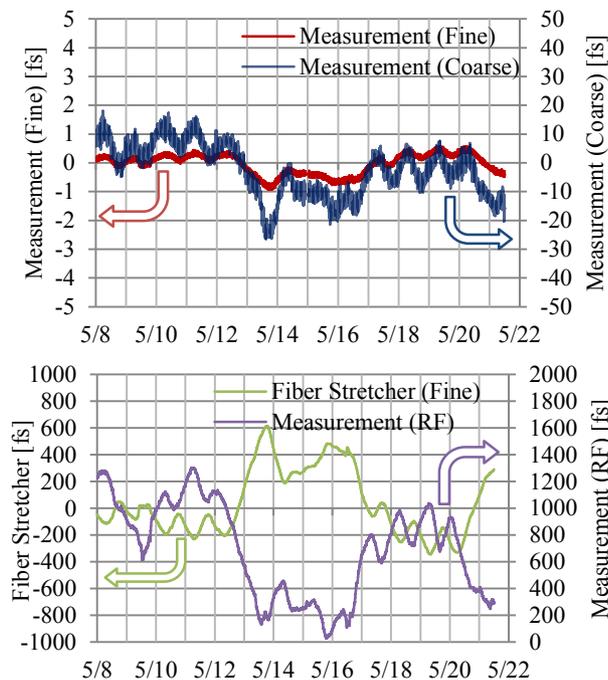


Figure 7: Two-week trend graphs of propagation delay variations for a 400m-long optical fiber. The upper figure shows length measurement data of the fine loop (red line) and the coarse loop (navy line). The lower figure shows an adjusted length with the fiber stretcher (green line) and length drift of the optical fiber for the optical timing and rf distribution system (purple line).

4.4 SACLA 運転中の加速 RF 位相変動

最後に、実際の SACLA の運転において、加速 RF 位相の変動が改善されたかどうか調べることにする。例として、SACLA のバンチ圧縮への寄与の大きい S バンド加速器の 1 週間の RF 位相の変動をプロットしたものが Figure 8 である。XFEL 出力を一定に保つために、S バンド加速器の位相はビームエネルギーやバンチ長モニタのデータを用いて自動制御されている。したがって、光路長を安定化した際に加速 RF の位相変動が小さくなっていけば、何らかの形で光路長制御システムの寄与があったと推定できる。

実際、光伝送システムのファイバ長を安定化していない状態 (Figure 8 上図) に比べ、安定化した状態 (Figure 8 下図) では変動が約半分になっていることがわかる。このように、加速 RF 位相の変動が部分的に低減されたことが見て取れる。

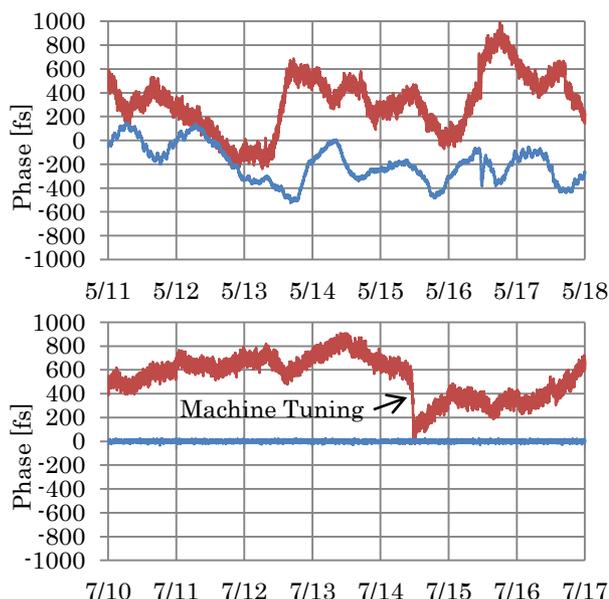


Figure 8: One-week trend graphs of the phase data of the S-band accelerator (red line) and the optical length data detected by the PFD at the receiver side (blue line). The length regulation for the rf distribution fiber was not applied for the upper figure and was applied for the lower figure. The unit of the vertical axis is femtosecond, converted from the rf phase.

5. まとめ

XFEL 施設 SACLA の各構成機器のタイミング変動を低減するために、タイミング信号分配に使用する光ファイバの光路長制御システムを開発・実装した。本システムでは、光路長測定に周波数安定化レーザを基準にするもの (Fine 系) と 91.4 GHz ミリ波を基準にするもの (Coarse 系) の 2 つの測長系を用いることとした。実際、本システム SACLA で運用したところ、Fine 系と Coarse 系のファイバ長制御後の測長結果が長期間に渡り 50 fs 以内で一致し、SACLA の要求を満たしていることが確かめられた。また、本システムでタイミング信号を安定化させたところ、加速 RF 位相の調整量が低減されていることもわかった。このように、光路長制御システムを導入することにより、SACLA の安定度がさらに向上したと考えられる。

参考文献

- [1] Y. Otake, et al., Proceedings of ICALEPCS07, Knoxville, Tennessee, USA, p. 706, FOAA02 (2007).
- [2] H. Maesaka, et al., Proceedings of ICALEPCS2009, Kobe, Japan, p. 85, TUC002 (2009).
- [3] T. Asaka et al., Proceedings of LINAC2012, Tel-Aviv, Israel, p. 486, TUPB006 (2012).