

Timing and low level RF system toward XFEL

Takashi Ohshima^{1,A)}, Hirokazu Maesaka^{A)}, Naoyasu Hosoda^{A)}, Kenji Tamasaku^{A)},
Mitsuru Musha^{B)} and Yuji Otake^{A)}

^{A)}RIKEN, 1-1-1 Kouto, Sayo, Hyogo, 679-5148

^{B)}Institute of Laser Science, Univ. of Electro-communications
1-5-1 Chofugaoka, Chofu-shi, Tokyo, 182-8585

Abstract

The construction of RIKEN XFEL is under progress. In this accelerator, it is needed to drive accelerator cavities by an RF signal with a time accuracy of 50fs and an amplitude stability of 1E-4. To satisfy these requirements, an optical system to deliver the reference RF signals is employed to the XFEL. The system has about 1 km long and nearly 80 destination points. The prototype modules of an optical transmitter and an optical receiver were fabricated and tested. The phase noise of these modules for 5712MHz signal corresponds to a time jitter of about 7 fs, which is estimated by integrating the SSB noise spectrum from 1 MHz to 10 MHz. This value is allowable level for our demand. The Low Level RF control (LLRF) configuration for the XFEL is almost the same as that used for the SCSS test accelerator, except special care will be taken to stabilize the temperature around RF modules and RF cables. The performance of the LLRF in the SCSS test accelerator was checked by measuring the jitter of beam arrival timing at an RF-BPM cavity. Its short term timing jitter was 50 fs in rms, which is within the requirement for the XFEL. The optical transmission system and the LLRF system have promising performance toward the XFEL

XFELに向けたタイミング・RF制御

1. はじめに

西播磨SPring-8キャンパスでは2010年秋からのコミッショニング開始に向けてX線自由電子レーザー(XFEL)の建設が進められている[1]。この加速器においては、RF信号の位相および振幅の設定、検出について厳しい個所では50fs以下、0.01%以下という高い精度が要求されている[2, 3]。そのために、XFELの原理検証器であるSCSS試験加速器の建設の段階で、RF制御システムとして、低位相雑音の基準RF信号発生器の製作、IQ法を用いたRF信号位相・振幅の変調器、検出器の開発、それらの制御/出力監視に用いられる高速・高精度DAC/ADCモジュールの製作、基準RF信号に対するジッタを700fsに抑えた遅延パルス信号発生器の開発が行われた[4]。しかし、XFELにおいては、バンチ圧縮率が3000とSCSS試験加速器に比べ1桁高い。それに応じてRF信号に対する許容値も、単純比例としても試験加速器に比べ10倍厳しいものとなる。また、基準RF信号の伝送距離についても、試験加速器では最長約100mであったが、XFELでは最長1km近い距離を伝送する必要がある。基準RF信号を伝送するべきラックの数も約80台程度と大きな数となっている。

上に述べたような、大規模なシステムで高度に安定した加速RF位相・振幅を実現するためには各構成要素の温度変化の影響を取り除くことが重要となる。この目的のために、次の対策を講じる予定である。

a) 水冷ラックの採用：RF制御に関連した機器は、温調された冷却水を用いて温度安定化のなされたラックに収めることとした。また、空洞ピックアップ

プからIQ検出器までを結ぶケーブルに関しては断熱保温を行い、そこに温調した冷却水を通水することにより温度の安定化を図ることにしている。

b) 温調された光ファイバーによる基準RF信号の伝送：基準RF信号伝送には、断熱保温、温調された冷却水を通水による温度安定化を図った光ファイバーを用いる。温度安定化によって抑えきれないドリフトについては、光ファイバーの長さを一定に保つ制御回路を用いる。

今回の報告では、XFELでの基準RF信号伝送システムの構成、温度安定化への取り組み、RF制御の改良とビームを使って測定したその性能について述べる。

2. XFELの基準RF信号伝送と温度安定化

2.1 基準RF信号の伝送

XFELは長さ約700mの施設である。熱陰極電子銃からの電子ビームは、238MHz Sub-harmonic Buncher、476MHz Booster、Lバンド(1428MHz)加速管、Sバンド(2856MHz)加速管、Cバンド(5712MHz)加速管の順に通過し加速される。図1に加速器の概念図を示す。基準となるRF信号を発生させるマスターオシレータは、電子銃の近傍に設置される。基準RF信号は、加速器に沿って分散されて設置された制御用19"ラックに伝送される。その制御ラックの数はバンチングを行う部分で25台、クレスト加速

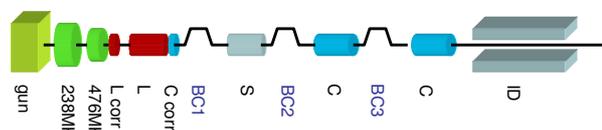


図1 XFEL加速器の加速空洞構成概念図。

¹ E-mail: ohshima@spring8.or.jp

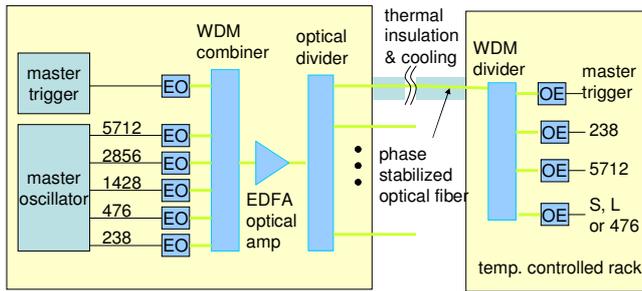


図2 波長多重を用いた標準RF信号の伝送。

部で46台である。挿入光源の設置される光源部においてもRF-BPMを用いたビーム位置測定やCTを用いたバンチ電流測定がおこなわれるため、さらに数台の標準RFを受信するラックが設置される。また、ポンプ・プローブ実験などのために、正確なタイミングをもった信号を実験棟まで伝送する必要があり、合計80台近いラックに標準RF信号を伝送することとなる。

標準RF信号の伝送に関しては、光ファイバーを用いたシステムを構築する[3]。試験加速器で用いていた電気的な同軸ケーブルを用いた伝送では、高周波信号の大きな伝送損失、伝送経路での温度変化による電気長の変化、接地電位差に関連したトラブルなどが考えられたためである。標準RF信号の伝送には図2に示すような波長多重の手法を用いる。各ラックには加速管に供給するRF信号、タイミング制御のために必要な5712MHz、238MHz、マスタートリガ信号の複数の信号を送る必要がある。これを1本のファイバーで伝送することができればコスト削減につながるためである。実機での使用を視野に入れた波長多重用光信号送受信機の試作が行われ、昨年度末に納品された。試作機の試験を行った結果、EDFA光増幅器においてDC電源のノイズにより雑音の増加があること、中に使用されている光学部品の通常のファイバーが大きな伝達時間温度変化を与えることなどがわかった。そこで、DC電源の低ノイズ化、不要ファイバーの長さの削減の対策がとられた。対策後の試作機について、5712MHz、238MHz信号出力の位相ノイズを測定した。その結果を図3に示す。光送受信器を経由した信号は、マスターオシレータの信号に比べて、100kHz以下のオフセット周波数において位相ノイズは増加していない。EDFAに起因すると思われる1MHz以上の位相ノイズのレベルは5712MHzに対しては-145dBc/Hz以下と小さく、これは1MHzから10MHzまで積分では7fsの時間変動に対応するが、これは許容範囲内である。

2.2 温度安定化への取り組み

光伝送には、位相安定化光ファイバーを採用する予定である。このファイバーは、5ps/km/K以下という伝達時間温度係数を持つ。さまざまな制約から、標準RF信号の伝送に用いられる光ファイバーは、クライストロンギャラリーの加速器トンネル壁沿い高さ約3mの位置を通線する予定となっている。この位

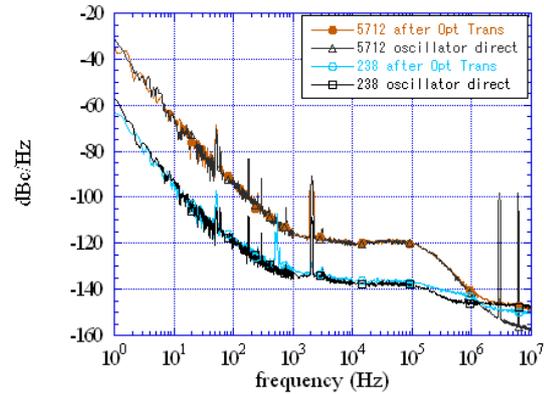


図3 光送受信器を通過した後のRF信号の位相ノイズ。

置での気温変動は空調機の精度から±2度が見込まれる。この温度変動により、位相安定ファイバーを採用しても1kmの伝送時には±10psの遅延時間の変動が予想される。そこで、光ファイバーは断熱保温したケースに収め、26度±0.2度に温度調整された冷却水を通水して温度安定化を図る予定である。

標準RF信号の精度を維持するためには、さらに、各空洞に励起されるRFの位相、振幅を高い精度で検出し、その値を一定に保つように高い精度で制御することが重要である。そのため、RFの位相、振幅を制御、検出する機器が納められる制御ラックに対し、温調した水を使って温度安定化を図る。このラック内の空気は、温度を26度±0.2度に安定化した冷却水が通るラジエーター通し5台のファンを使って循環させる。これにより、ラック内の温度安定化を図る。

空洞のピックアップ信号を伝送する同軸ケーブルの温度変動は、RF位相、振幅検出器大きな影響を与える。ここで用いる同軸ケーブルには電気長の温度係数の小さなものを使用する。XFELではさらに、同軸ケーブルを断熱材で覆い、温度調整された冷却水を通水して温度の安定化を図る予定である。

2.3 光ファイバー長安定化

標準RF信号伝送において受動的対策では抑えきれない温度による伝送時間の変化を更に抑制するために、生じたファイバーの光路長変化を測定して補正する能動的対策を取ることも検討している[2]。ファイバー長測定には光ヘテロダインの方式を用いる。SPring-8蓄積リングに張られた2kmの光ファイバーを用いた実験では、100Hz以下の周波数領域でファイバー長の変動は $0.2\mu\text{m}/\sqrt{\text{Hz}}$ という値を得た。これは1Hzから100Hzまでの積分値として $2\mu\text{m}$ となり、10fsの時間変動内に抑えることに対応する。この実験で使用されたファイバーストレッチャでは80Hz程度で位相遅れが発生していた。現在は5kHzまで帯域が伸びている改良型のストレッチャが入手できており、さらに広い帯域で安定化を図る予定である。

3. RF制御系の改善

SCSS試験加速器では、安定したSASE光の飽和を得

るために、また、XFELでの使用を目指した性能達成のために、各構成要素の改善が進められている。

その一つにRF変調信号の高精度化があげられる。初期段階でのSCSS試験加速器の運転経験から、安定したSASE光の飽和のためには、238MHz、476MHzの加速電圧・位相制御における設定精度が足りないことが運転グループから指摘されていた。そこで、IQ変調器に対して振幅・位相を設定するために用いられていたDACボードの分解能を12bitから14bitに向上させる対策を採った。また、RF増幅器の温度ドリフト、クライストロンの温度変化による変動などの影響を取り除くため、空洞ピックアップからの信号の位相、振幅が一定となるようにソフトウェアによるフィードバック制御を実装する対策を採った[5]。その結果、238MHzにおいてピックアップ信号の安定度についてrmsで位相0.02度、振幅0.03%以下の値が実現されている。

また、電子銃から得られるビームのうち、1nsを切り出すために用いられているディフレクタのタイミングが、タイミング回路の収められているラックの温度変化の影響を大きく受けることがわかった。これに対しては、ディフレクタを駆動した信号をタイミング系のラックまで送り戻し、計測したタイミングのずれを元にフィードバック制御を行うことで、温度変動の影響を低減することに成功した[6]。

これらの改善後のLLRFシステムの総合性能を確認するために、試験加速器において、基準RF信号とビームの到達時間との間のジッタが測定された。試験加速器の挿入光源手前に設置されたRF-BPMの基準空洞にビームが誘起する信号と、基準RF信号との間の位相差を測定した[3]。図4に2008年6月30日から7月4日までの期間にわたって測定した到達時間の結果を示す。一日の中での到達時間の変動は大きい時で500fs程度見られている。図4には試験加速器Sバンド下流にあるパンチコンプレッサにおけるエネルギー分散部の水平位置も合わせて示した。到達時間と電子ビームのエネルギーには強い相関が見られることから、10時間程度の長期変動の要因は加速器上流部でのエネルギー変動の可能性がある。長期の

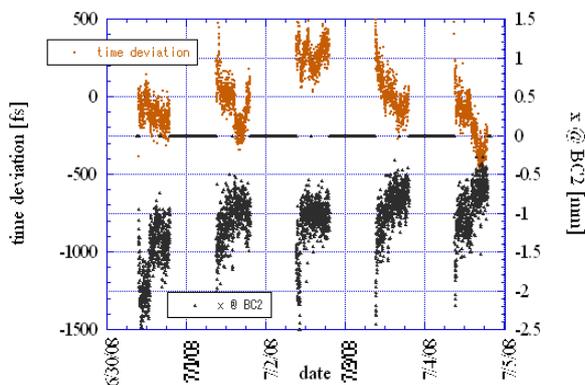


図4 電子ビーム到達時間測定システムの測定結果。結果にはBCエネルギー分散部での水平位置も合わせて示している。

変動を除いた短期ジッタについては、rmsで50fs以下に抑えられていた。

4. まとめと今後

RF制御に関しては試験加速器での運転の経験を生かし、高精度高安定なシステムの実現に向けて検討を進めている。検討されている機器の一部は現在運転中のSCSS試験加速器で使用されており、試験加速器の調整やEUV光の利用実験を通して長期の運転が行われている。RF信号の位相、振幅のゆっくりとしたドリフトの影響は、ソフトウェアで組んだ信号安定化プログラムを用いることにより低減を図っている。LLRFシステムを含めた加速器高周波源の総合的な性能については、基準RF信号に対するビームの到達時間のジッタを測定することによりなされ、短期ジッタはrmsで50fs以下であることが確認された。この値は要求値に近い値であるが、安定な動作のためにはさらに改善が必要であり、今後の課題である。

基準RF信号伝送に関しては、波長多重を用いた信号伝送において位相ノイズの増加が影響のない範囲であることが確認できた。光伝送路は断熱保温を行い、さらに残った変動はファイバー長安定化回路を用いて補正を行う。安定化回路により2kmのファイバーに対して2 μ mの長さで安定化を行うことができることが確認された。

XFELに用いられるLLRF関連の制御ラックの初号機は、平成20年12月に納品予定である。初号機の動作確認が行われたのち、月産約6台のペースで量産機の生産が開始され、平成22年3月末までに全数が納品される予定となっている。納品されたLLRF制御装置を使用して平成22年10月からは加速管のコンディショニングが開始され、平成22年度末から加速器のビーム運転が開始される予定である。

参考文献

- [1] T. Shintake, et al., "X線自由電子レーザー計画の現状", in these proceedings.
- [2] Y. Otake, et al., "XFEL/SPring8用光タイミング・低電力高周波分配システム の開発", Proceedings of the 4th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Wako, Aug. 1-3, 2007, (2007), pp.106-108
- [3] Y. Otake, et al., "Timing and LLRF System of Japan XFEL to realize femto-second stability", Proceedings of the ICALEPCS07, Knoxville, Tennessee, USA, (2007), pp.706-710
- [4] T. Ohshima, et al., "XFELに向けた低電力高周波システムの改良", Proceedings of the 4th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Wako, Aug. 1-3, 2007, (2007), pp.559-561
- [5] H. Maesaka, et al., "SCSS試験加速器のRFシステムの高精度化", in these proceedings.
- [6] N. Hosoda, et al., "SCSS試験加速器におけるEUVレーザー安定化のための高電圧パルスディフレクタのタイミング制御", in these proceedings.