

Development of an optical timing and rf distribution system for XFEL/Spring-8

Yuji Otake^{A)}, Takashi Ohshima^{A)}, Naoyasu Hosoda^{A)}, Hirokazu Maesaka^{A)}, Kenji Tamasaku^{A)},
Mitsuru. Musha^{B)}, Kazuhiro Imai^{C)} and Motonobu Kourogi^{C)}

^{A)} SPring-8 joint project for XFEL/RIKEN

1-1-1 Kouto, Sayo-tyou, Sayo-gun, Hyogo, 679-5148, Japan

^{B)} Institute of Laser Science, Univ. of Electro-communications

1-5-1 Chofugaoka, Chofu-shi, Tokyo, 182-8585, Japan

^{C)} Optical Comb Inc.

4259-3 Ngatuda-cho, Midoriku-ku, Yokohama-shi, kanagawa, 226-8510, Japan

Abstract

At RIKEN, XFEL/SPring-8, an accelerator for X-FEL is under construction. Timing and rf phase control accuracy of less than 100 fs is required to the timing and LLRF system of the accelerator for stable lasing. However, realizing this accuracy is very difficult by present electronics technology. Therefore, we are trying to have this accuracy by laser technology. This optical system for the LLRF comprises an optical comb generator, having 5712 MHz, 1 ps width, pulse train, as which has LN crystal installed into an optical Fabry-Pérot cavity, a DFB laser locked to an acetylene absorption spectrum (1538 nm), and an optical fiber timing and rf distribution system, which has a function of optical length regulation controlled within 3 μm for 25 km by a Michelson interferometer. In this paper, we describe a basic idea of the system, and some results of components development. The results show enough specification to realize the requirement of less than 100 fs.

XFEL/SPring8 用光タイミング・低電力高周波分配システム の開発

1. はじめに

X線自由電子レーザーでは、SASEを実現するために、磁気的なシケインを用いたバンチ圧縮により数十フェムト秒のパルス幅で数キロアンペアと言う大強度で安定な電子ビームを必要とする。^[1] これを実現するためには、加速エネルギーの安定度が 10^{-4} 以下である必要がある。^[2] この安定度で電子ビームを加速するXFEL用線型加速器は、大きく2つの部分に分かれる。A. 一つは、電子ビームを高周波のクレスト加速部で、加速器の2/3をしめる。この部分は加速高周波5712 MHzの1度以下、500 fs程度の位相(時間)安定性があれば良い。B. 他の部分は、磁気的シケインにより電子ビームのバンチ圧縮を行うために、エネルギーチャープを付ける加速部である。この部分は、加速高周波の電界がビームの加速方向にほぼ線形に変化するように補正しながら加速するので(加速基本波とその3次高調波で加速電界を線形化して、加速器の出口でビームにほぼ線形のエネルギーチャープを付ける。)、最終的なビームのパルス幅以下の位相精度が必要である^[3]。その値は、5712

MHzの位相にして0.1度程度、100 fs以下である。我々は上記のAの部分、SCSS試験加速器における高周波機器により、位相などの要求性能が電気回路で実現できることを実証している^[4]。しかしながらBの部分は、その要求値の実証は済んでおらず、電気回路で実現するのも現状の技術では困難である。そこで我々は、この100 fs以下の時間精度・安定性を実現するためにレーザー技術の採用を考えた。その理由は、時間の測定限界は扱う波の波長に大きく制限されており、我々が使用を考えている波長1500 nm帯のレーザーと波長約5 cmの5712 MHzの高周波では一目瞭然であるからである。この報告では、レーザー技術を使用したXFEL装置用タイミング・低電力高周波分配システムの設計と要素開発の現状に加え、時間精度要求値の実現性を考察する。

2. 設計方針

ほぼ全長800 mの複雑なシステムであるX線レーザー光源(加速器とアンジュレータ)と実験装置をフェムト秒の時間領域で安定に駆動するためには、全系を、一つの時間基準の光パルスにより正確に同期すること

が必須である。一つの時間基準信号で、加速器用の5712 MHzなどのサイン波の発生ができ実験装置用にこのサイン波に同期した高い時間精度の極短パルスを供給するために、我々は加速周波数の繰り返しの光コムパルスを使用することにした。この光コムパルスを発生するためには、時間安定性に優れたファブリペロー型電気光学変調器を用いることとした。このコム発生器は、5712 MHzと2856 MHzの多周波の繰り返し構造を持つ光パルス発生に対応でき、今回必要な加速器駆動用のサイン波の発生と実験装置駆動用パルスの発生の両方が同時に満足できる特徴を持つ。ここで重要な点は、光コム発生器がXFEL装置の時間基準となるマスターオシレータの高周波信号を、ノイズを増加させることなく光のパルス列に変換することである。ちなみに我々のマスターオシレータのノイズ強度は、XFELの時間ジッタの要求精度を満足している。^[4]このコム発生器で使用するレーザー源の波長は、通信に幅広く利用されている1.5ミクロン帯を選択した。これは、光部品を安価に入手してシステムを安く容易に構築するためである。量産の光部品を使用することで、各部品の安定性（故障の少なさ）、ひいてはシステムの安定性も保障される。以上に加えて本装置では、タイミング信号などを1km程度の光ファイバーで伝送しなければならない。この伝送距離を考えると、伝送路である光ファイバーが敷設される環境の温度安定度が、フェムト秒の時間精度を実現するためには不十分である。この時間精度を実現するためには、光ファイバーの光路長の変動が数十 μm 以下でないといけない。こ

の値は、2ppm/ $^{\circ}\text{C}$ の光路長温度係数を持つ位相安定化ファイバーでも達成できない。必要なフェムト秒の時間精度を実現するには、光ファイバー伝送路の往復を使ったレーザーマイケルソン干渉計を使用して、光路長の μm 精度の制御を行う。干渉計での測距性能を決定する重要な要素は、周波数が安定な狭周波数帯域のレーザー源である。これには、寿命の問題と簡便性から半導体DFBレーザー（分布帰還型半導体レーザー）を使用した。これは光コムの駆動と共用である。周波数安定化は、光をアセチレンの吸収線にロックして行うものとした。

3. 光タイミング・高周波分配システム

前節の設計方針に従って設計した、X線自由電子レーザー用の光タイミング・高周波分配システムを図1に示す。信号の流れに従って説明する。まず、A フェムト秒領域の時間精度を保証した加速高周波信号を発生する、低ノイズの信号源がある。B 次に、この信号源の5712MHzの信号で変調された光コムパルスを発生する、光コム発生器がある。C この発生器と並行して、レーザー源であるアセチレンの吸収線にロックしたDFBレーザーがある。D 発生したコムパルスや加速器で使用する238MHzの高周波やトリガー信号を、一つの光ファイバーで波長多重伝送(WDM)するための装置と、光アンプ(EDFA)、光路長制御装置が続いてある。一つのファイバーで多重伝送するのは、先に述べた光路長の制御をそのファイバーで行えば、伝送する全ての信号の時間精度が保障されるからである。E 伝送先で、非クレスト加速部では個々にピンフォト

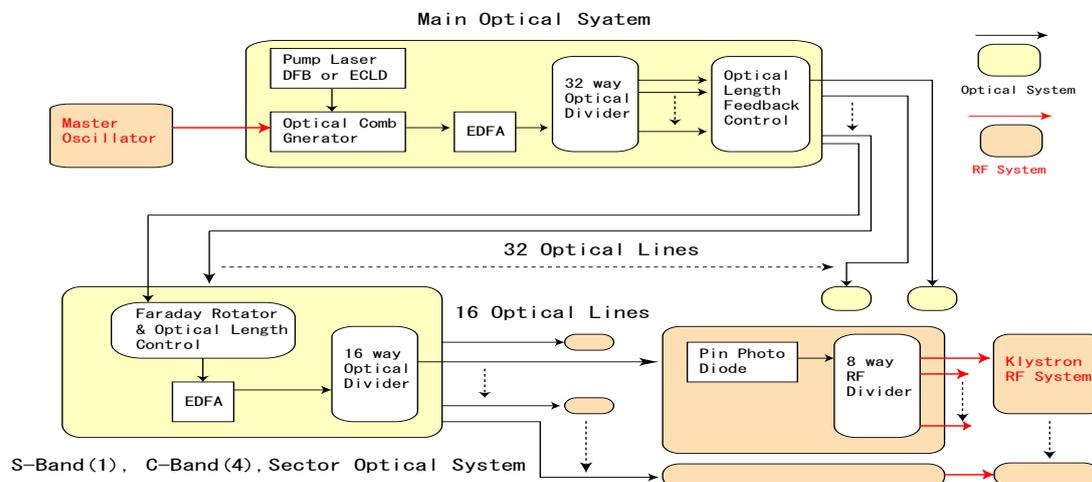


図1. XFEL/Spring-8 光タイミング・高周波分配システム

ダイオードとバンドパスフィルターにより加速高周波信号を取り出し、クライストロンなどの大電力高周波源を駆動する。またクレスト加速部では伝送端で光アンプにより信号の光量を増幅する。分配器で16程度に分岐し、光ファイバーの光路長制御をおこなわずに光を短距離伝送して、加速器に沿った各々16台のクライストロンの塊を駆動する。

4. デバイスの開発状況

現在、前項3のシステムを構築すべく光の構成機器の開発を行っている。初期段階の開発が終了しているのは、DEF レーザー源、光コム発生器である(図2)。^[5]図3には、光コム発生器にマスターオシレータからの5716MHzの高周波を加えて得られた光コムの波形を示す(a)。また、発生した光コムの波長スペクトラムを示す(b)。長基線のファイバーの光路長制御は、著者の一人である電気通信大学の武者の開発したALOMA(チリ電波望遠鏡アレー)用のシステムの転用を考えた。^[6]既存のSPring8の1kmファイバーを使用して、光路長安定化がXFELに使用できるフェムト秒の精度を満足できるかを実験した。^[7]図4にはその実験装置(a)と光路長のフィードバックかけたときの誤差スペクトラムを示す(b)。



図2. (a) 周波数安定化レーザーと光コム発生器の外観. (b) 光コムモジュールの装束. ^[8]

5. まとめ、謝辞

現段階では概略のシステム設計が終了して、それに沿った各光機器の開発を行っている段階である。開発した機器では、I 光コム発生器が所定の1ps幅で5712MHz間隔の光パルス列を出力できた。重要な点は、光コム発生器がマスターオシレータのノイズをほとんど増加させない性能を実験で示したことである(図3(c))。この実験では、キャリアから1MHz以上離れた部分のノイズ増加が見られるが、この点は、我々が開発したDEFレーザー源の線幅が原因であると考えている。レーザーの狭線幅の実現は、外部共振器型のレーザー(ECLD)、DFBファイバーレーザーなどを検討している。IIファイバーの光路長の制御であるが、図4の結果は、もともとこのシステムが持つ性能(25kmで3 μ mに変化を抑える。)を満足している事を示唆している。また加速器でのファイバーの設置環境に於いて、制御のダイナミックレンジを含め、十分我々の要求であるフェムト秒領域の時間制御できることを示した結果である。このようなコム発生器が信号源のノイズを増加させないなどの機器開発現状を考えると、XFELの光タイ

ミング・高周波分配システムの開発は順調であると言える。最後に、この研究に対するXFELプロジェクトのメンバーの支援に感謝するものであります。

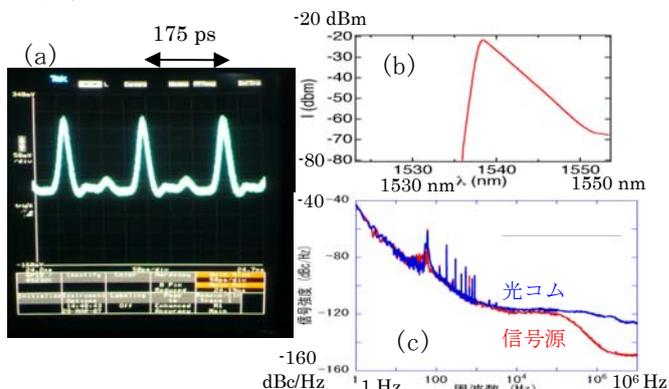


図3. (a) 光コムの波形. (b) 光コムのスペクトル. (c) 光コム+信号源のノイズ. ^[8]

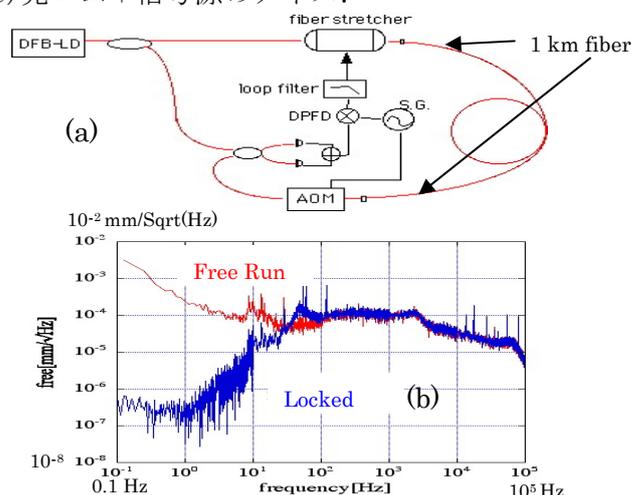


図4. 光ファイバー光路長制御装置(a)と実験での光路長制御の誤差スペクトル(b)。

参考文献

- [1] SCSS X-FEL Conceptual Design Report, 2005.
- [2] 田中 均ほか, 私信, 2007.
- [3] M. Cohlus et al., BUNCH COMPRESSION STABILITY DEPENDENCE ON RF PARAMETERS, Proc. The 27th FEL conf., USA, 2005.
- [4] Y. Otake et al., Sub-pico-second trigger system for the SCSS prototype accelerator, Proc. of the 26th International Free Electron Laser Conference, 2006.
- [5] 細田ほか, 本研究報告集, 2007.
- [6] M. Musya 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, Springer-Verlag, 2006.
- [7] 前阪ほか, 本研究報告集, 2007.
- [8] 玉作賢治ほか, フェムト秒精度でのタイミング信号伝達・計測技術開発, JST-XFEL 利用推進研究課題報告書, 2007.