

## DISTRIBUTION OF A 5.7 GHz RF BY OPTICAL COMB AND A TRIGGER SIGNAL BY PSK METHOD FOR XFEL/SPRING-8

Naoyasu Hosoda<sup>A)</sup>, Takashi Ohshima<sup>A)</sup>, Hirokazu Maesaka<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> Institute for Laser Science, University of Electro-Communications

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

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

4259-3 Nagatuda-cho, Midori-ku, Yokohama-shi, Kanagawa, 226-8510

### Abstract

The construction of the XFEL/SPring-8 accelerator is in progress toward a start of commissioning in 2010. The aim of the low level RF and timing system of the accelerator is to distribute very high precision (less than 100 fs) RF reference signals and trigger signals along a long distance over 700 m. We use optical fiber system for realizing these precisions, because the optical fiber can transmit a faster signal with lower loss and higher time precision than these of a signal transmission by using a copper cable. The main acceleration frequency of 5.7 GHz is used as a reference signal frequency. To distribute the reference signal, we are going to use an optical comb which has the structure of a pulse train with a 1 ps pulse width and a 175 ps (5.7 GHz) pulse spacing. The optical comb enables us to transmit a low noise signal that ensure high precision timing, and to distribute not only a 5.7 GHz RF but also an optical trigger pulse synchronized to an electron beam for experiments. To obtain the optical comb with the low noise, we have developed an optical comb generator and a wavelength stabilized laser of 1538 nm. In the test of the generator and laser, the maximum square root of the Allan variance of the laser was  $8 \times 10^{-11}$  between 0.5 and 2500 sec. We successfully confirmed the requirement of less than 100 fs time resolution by transmitting a 5.7 GHz RF without increasing serious noise by the optical comb. Meanwhile, concerning the trigger pulse distribution, a transmission of a pulse wave form by using a laser and a photo diode is not so easy, since usual E/O and O/E converters using the diodes cannot handle DC signal, because of a limited frequency band width. Therefore, we had an idea to use a Phase Shift Keying (PSK) method to transmit the trigger pulse. This method is one of digital modulations, which can transmit data by changing the phase of an RF signal, and does not use the DC signal. An experiment to transmit a trigger signal by the PSK method using the E/O, O/E, and an optical fiber was carried out and we confirmed it works well with a low timing jitter to be able to maintain the requirement.

## XFEL/SPring-8での光コムを用いた5.7GHz RF伝送と PSK方式を用いたトリガー伝送

### 1. はじめに

SPring-8サイトでは、8GeV電子線形加速器とアンジュレータからなる全長約700mのX線自由電子レーザー(XFEL)装置の建設が始まっている<sup>[1]</sup>。この装置の加速器は、238、476、1428、2856、5712MHzの高周波空洞による電子銃からの電子ビームの速度バンチ圧縮と、ビームへのエネルギーチャープと偏向電磁石列による行路差を使ったバンチ圧縮により、電子ビームのパルス幅を2nsから100fs以下に縮める。安定なX線レーザーの非線形増幅を実現するためには、このバンチ幅100fsの電子ビームを安定に生成しなければならない。そのためこの加速器のタイミングシステムは、100fs以下の超高精度でRF基準信号やトリガー信号を大きな施設全体に配信する必要がある<sup>[2]</sup>。加速器機器への配信に加え、実験利用者

がXFELの極短パルスという特徴を利用してポンプ・プローブ実験などを行うので、そのためのトリガー配信も同時に考慮する必要がある。

これらを実現することは、同軸ケーブルによる伝送システムでは、減衰、分散、ケーブル長の大きな温度依存性などにより困難である。このため我々は光ファイバーシステムを採用する。特に保守性や価格などを考慮して、世界中で活発に製品開発が進んでいる通信分野でのシステムを取り込むことにした。本発表では光ファイバーシステムの源である波長安定化光源、RF・光パルスを伝送するための光コム、そしてトリガーを伝送するためのPSK方式について報告する。加えて、実験において開発した装置が、我々が要求するような100fsの時間安定性を満足したことを報告する。

## 2. 波長安定化光源

位相ジッターの無い基準RFを伝送するために、マイケルソン干渉計を使ったファイバーの光路長安定化<sup>[3]</sup>や光コムを使用する。このための光源は、強度、周波数、スペクトル幅に関して短期・長期安定度とも良いものでなければならない。短期の位相・強度安定度は光源の周波数線幅に影響されるので、線幅が1MHz以下の分布帰還型(DFB)半導体レーザーを採用した。ファイバーの光路長測距の精度向上のためには、長期の波長安定度が要求される。この実現には、光源の波長をアセチレン同位体の吸収線に同期するための線形吸収ガスセルモジュールを採用した。そしてこれらを組み合わせた光源を製作した。ガスセル内の圧力を5Torrと低くし、圧力シフトの変化による影響が少なくなるよう対策している。波長としては通信市場で多く使われている1500nm帯の波長である1538.2nmとした。この光源は、内部に共振器が無い機械的安定性に優れているという特徴を持っている。

波長安定化光源の評価を、電通大の飽和吸収(共振器増強型)アセチレン安定化光源を用いて行った。これは光周波数基準として認められており、 $2 \times 10^{-12}$ 以下という高い安定度を持っている<sup>[4]</sup>。両者の光を合波しそのビート信号周波数を測定するのだが、測定可能な周波数にするため、電通大の光コム発生器で波長の近い光を発生し、その光とのビート周波数を測定した。図1にそのアラン分散を示す。0.5から2500秒の間で $8 \times 10^{-11}$ 以下という高い安定度を確認した。

## 3. 光コム発生器

主加速器の加速周波数は5.7GHz(Cバンド)であり、我々はこの周波数を全系の基準周波数として使う。これを伝送するために、幅1psの光パルスが175ps(5.7GHz)間隔で連続している光コムを採用することにした。この光コムをPINフォトダイオードで電気に変換し、バンドパスフィルターを通すことで、5.7GHz RFを取り出せる。また5.7GHzに同期した高精度光パルストリガーとして実験利用者に提供できる。

光コム発生器には、ファブリ・ペロー共振器内に

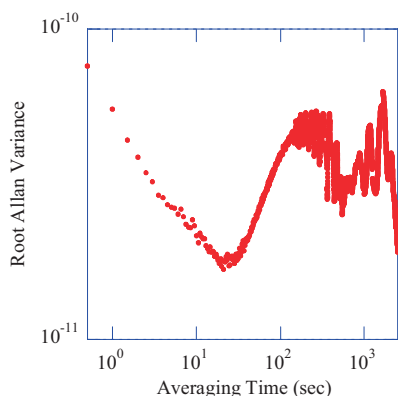


図1：波長安定化光源のアラン分散

電気光学結晶(LiNbO3)を配置した光位相変調器を用いた。これに単一波長の光と変調RFを入力すると、間隔が変調周波数に一致した周波数サイドバンドを持つ光が出力される。この構成要素はすべてパッシブなため非常に安定した光コムを発生できるという特徴を持っている。入力周波数は $5712 \pm 1$  MHzである。

波長安定化光源からの光と低ノイズマスター信号発生器<sup>[5]</sup>からの5.7GHz RFを光コム発生器に入力した時の、波長スペクトルの包絡線を図2に示す。光源の波長を中心として光コムが発生している。短波長側はフィルターで落としている。この光コムを22GHzの帯域を持つPINフォトダイオードで電気に変換し、オシロスコープで見たのが図3である。帯域が足りずパルス幅が広がっているが、間隔は175psとなっている。

光コムで伝送することで、5.7GHz基準RF信号の位相ノイズがどう変化したかを測定したものが図4である。これには光コム出力を増幅するための光アンプ(EDFA)によるノイズも含まれている。1kHz以下に見られるピークは信号発生器に元からあるものであり、特に60Hz成分が大きく見えている。それらも含め、10kHz以下では光コムによる信号劣化はほとんど見られない。1から100 kHzでは2dB程度の増加にとどまっている。それ以上では増加し、1MHz付近で最大+25dBとなっている。この増大はDFBレーザーの線幅に起因すると考えられ、どの程度問題になるかは、さらに検討が必要である。またこの1MHz付近のノイズの低減のために、光源の狭線幅化が有効と考えられ、外部共振型レーザー(ECLD)やファイバーDFBレーザーなども検討している。

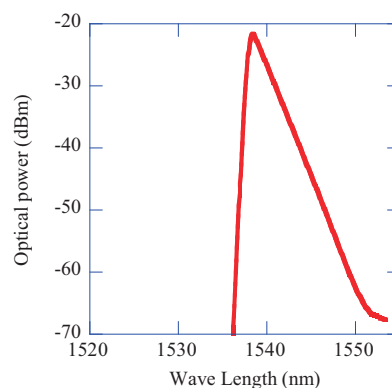


図2：光コムの波長スペクトル

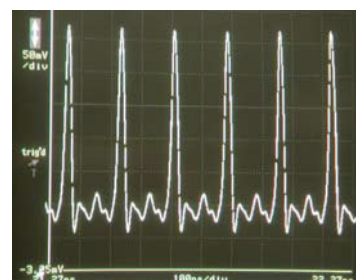


図3：光コムの時間波形

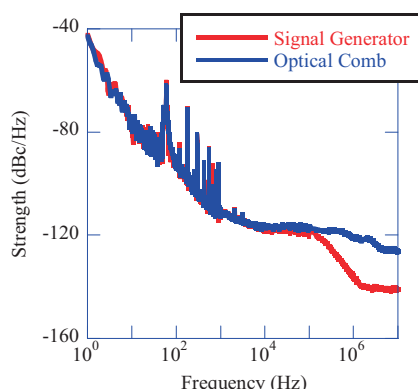


図4：5.7GHz伝送時の位相ノイズの比較

#### 4. PSKによるトリガー伝送

電気信号を光強度変調に変換する光変調器は、DCドリフトがあるため、長期間の使用ではバイアス電圧の制御が必要で安定化は容易でない。一般には変調信号はDCブロックなどを介して入力するので帯域が限られてしまい、トリガーなどの矩形波をそのままの波形で伝送できない。この理由から、我々はデジタルデータ通信で一般に使われている位相シフトキーイング(PSK)方式を応用することを考えた。これは、RF信号の位相をトリガー信号のエッジで反転させたPSK変調信号を伝送する方式である。図5にPSK方式での波形の概念図を示す。PSK信号を位相検波することで、トリガーパルスを取り出すことができる。この利点はDCを含む低周波帯域を必要とせず、RF信号近傍の帯域ですむことである。

これを検証するため、図6のような測定系を用意した。トリガーは5.7GHz同期型時間遅延モジュール(TDU)<sup>[6]</sup>で発生する。このTDUトリガーの5.7GHzに対するジッターは0.7psである。これをHittite社のIQ変調器 HMC496LP3でPSK信号にし、10GHz LN光強度変調器で光に変換し、シングルモードファイバーで伝送する。22GHz PINフォトダイオードで電気信号にもどし、ミキサで復調し、ローパスフィルタで矩形波を取り出す。この復調したトリガーの5.7GHzに対するジッターは標準偏差で5.5psであった。悪化の原因はIQ変調器周りの配線や信号レベルが不足気味だったことなどと思われる。

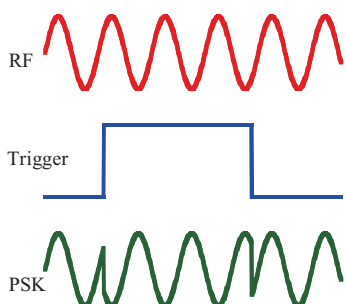


図5：PSK方式での波形

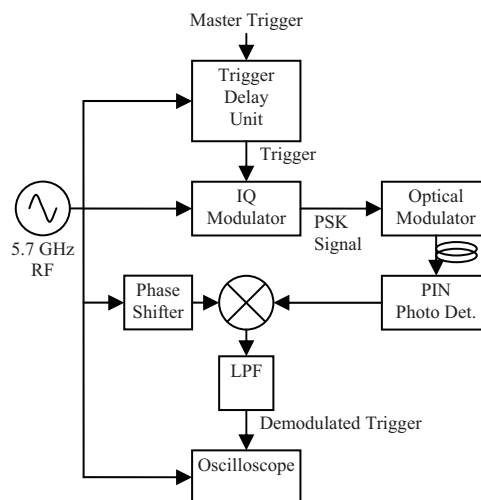


図6：PSK方式測定系の概念図

#### 5. まとめ

X線自由電子レーザーで用いるタイミングシステムのうち、光ファイバーシステムで用いる波長安定化光源と、基準RF信号を伝送する光コム発生器を製作した。これらを用いた光コムシステムで、低ノイズマスター信号発生器からの信号の品質を大きく悪化することなく伝送できた。マスター信号の側波帯ノイズの強度積分が100fs以下の時間精度を持っていることから<sup>[7]</sup>、今回の光コムシステムも同様の精度を持っていると思われる。

また、トリガー信号を伝送するためのPSK方式の実証試験を行い、5.5psのジッターであった。これは5.7GHzの1波長より十分小さく、機器のトリガー時にはTDUや光コムパルスに再同期されるので、機器へのトリガー信号も100fs以下の同期精度が保障されるはずである。

#### 参考文献

- [1] 新竹 *et al.*, "X線自由電子レーザー建設の現状", 本研究会
- [2] 大竹 *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", 本研究会
- [3] 前坂 *et al.*, "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ー長安定化", 本研究会
- [4] K. Nakagawa *et al.*, "Development of an acetylene optical frequency standard at 1.5  $\mu\text{m}$  and its applications", Proc. SPIE 4269, 41 (2001)
- [5] 大島 *et al.*, "XFELに向けた低電力高周波システムの改良", 本研究会
- [6] 細田 *et al.*, "5712MHz同期型時間遅延VMEモジュールの開発", 第2回日本加速器学会年会・第30回リニアック技術研究会, 佐賀, 2005年7月20日
- [7] Y. Otake *et al.*, "sub-pico-second trigger system for the SCSS prototype accelerator", Proc. of the 26th International Free Electron Laser Conference, 2006.