

光を用いた高精度タイミング伝送システムの開発

量子・物質工学科 植田研究室 流王登志雄

1. はじめに

現在、兵庫県の佐用郡にある大型放射光施設・SPring-8 キャンパス内にて、X線自由電子レーザー（X-ray Free Electron Laser：XFEL）施設の建設が進行中である。全長は約700mで、電子を80億電子ボルト（8GeV）まで加速し、最短波長0.06nmのX線レーザーの発振を目指している。XFELはこれまでにない非常に強い光で、超高速のパルス光であるため、原子や分子といった非常に微細なものが非常に速く変化する様子を連続的に観察することが期待されている。

XFELの発生装置は電子銃、線型加速器、アンジュレータ（永久磁石列）にわけることができる。まず電子銃から発射された自由電子は加速器で加速させられ、アンジュレータで制動放射を受けることによりレーザー発振に至る。この時、電子を効率よく加速させるために各加速器間で加速器を動作させるための高周波（RF）信号を同期させる必要がある。また、ポンプ・プローブ実験など、XFELを用いた解析実験を行う際には、利用者がXFELのパルスの来るタイミングを知っておく必要があるため、XFELの発振側と利用者側でパルスタイミングを同期させておく必要がある。このとき求められる精度は、RFの位相のゆらぎが0.01rad以下、パルスタイミングのゆらぎが10fs以下になっている。

本実験では、XFELでの使用を目的とした、光を用いたRF・パルスタイミングの伝送システムの開発を行った。

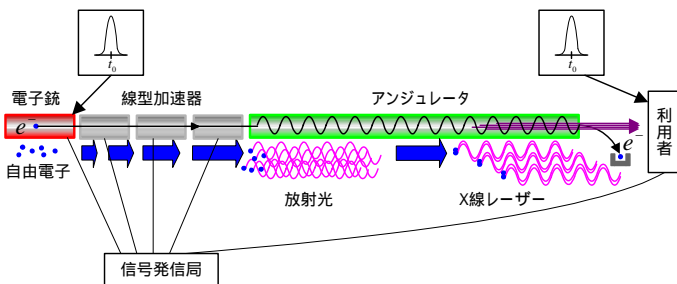


図1. XFEL 発振装置概略図

2. 原理

2.1. 光周波数コム

本実験では信号伝送には光周波数コムを用いた。光周波数コムはEOM（Electro-Optic Modulator）により入射光に位相変調をかけることによって、入射光の周波数を中心にサイドバンドを立てることによって形成される。

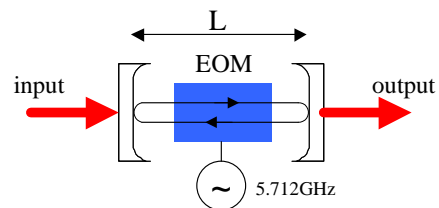


図2. EOMを用いた光周波数コム発生

光周波数コムの特徴はRF信号とパルスを同時に伝送できる点である。図3のように横軸を周波数で見ると、変調周波数の間隔で等間隔に並んだ櫛のよう見え、RF信号を伝送できる。また、図4のように横軸を時間として見るとパルスとしてみることができる。本実験では5.712GHzのRF信号を伝送した。

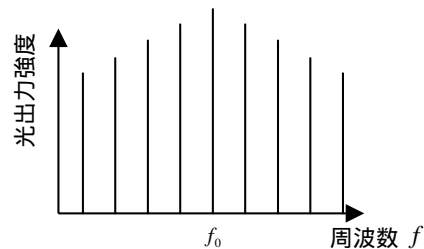


図3. 横軸を周波数で見た光周波数コム

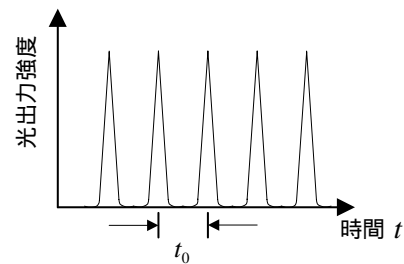


図4. 横軸を時間で見た光周波数コム

2.2. ファイバ長安定化回路

本実験では実験系には光ファイバを用いた。ファイバは熱や振動で伸び縮みする。そこで、ファイバ長を一定に保つために、植田研で研究されているファイバ長安定化回路を用いた。

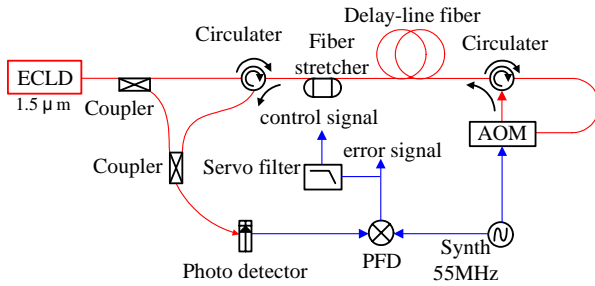


図 5. ファイバ長安定化回路概略図

まず、外部共振器型半導体レーザー光源 (ECLD) から出た波長 $1.5 \mu\text{m}$ の光はカプラーによって参照光と計測光に分けられる。計測光はまっすぐファイバ中を伝搬し、終端の AOM (Acousto-Optic Modulator) によって周波数をシフトさせられる。ここで周波数をシフトする理由は二つある。一つは終端まで来た光を周波数シフトしてマーキングすることにより、ファイバ中の散乱光と区別するためである。もう一つは、終端から戻ってきた計測光がカプラーで参照光と干渉するとき、55MHz のビート信号を検出するためである。このビート信号をフォトディテクターで電気信号に変換し、PFD (Phase Frequency Discriminator) に入れることにより、PFD からファイバ長の変動情報が検出でき、それをサーボ回路に通し、ファイバストレッチャーにフィードバックすることでファイバ長を一定に保つ。

2.3. PFD (Phase Frequency Discriminator)

PFD の構成は図 6 のようになっている。ビート信号と基準となる 55MHz の信号がそれぞれのカウンタに入った後にデジタル加算器によって加算されることにより、

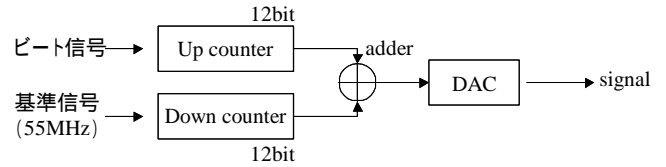


図 6. PFD の構成

光の何波長分のファイバ長が変化したかという情報のせた信号を検出できる。この PFD の特徴は可制御範囲が広い点である。

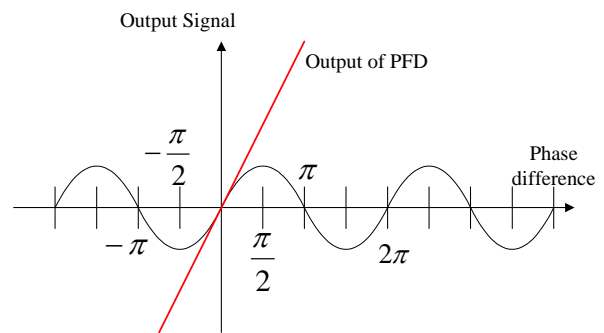


図 7. PFD の出力信号

従来、検出器から出てくる信号は図 7 のような正弦波の形で検出される。そのため可制御範囲は $-\pi/2 \sim \pi/2$ に制限され、安定点が $\pi/2$ 以上変動してしまった場合には、 2π ずれた隣の安定点で新たに安定化される、サイクルスリップという現象が起きてしまう。しかし、PFD ではカウンタのビット数を上げることにより、可制御範囲を線形的に拡張した。可制御範囲は $2^{\text{(ビット幅)}}$ 倍広くなったため、従来の検出器ではサイクルスリップが起きてしまうような外乱が加わった場合でも、PFD では位相変動の情報を記憶し、元の安定点まで引き戻すことが可能である。

3. 実験

3.1. RF 位相ゆらぎ測定

本実験では、SPring-8 に既設のファイバを用いて RF 位相ゆらぎの測定を行った。図 8 に実験系の概略図を示す。これは前述のファイバ長安定化回路に光周波

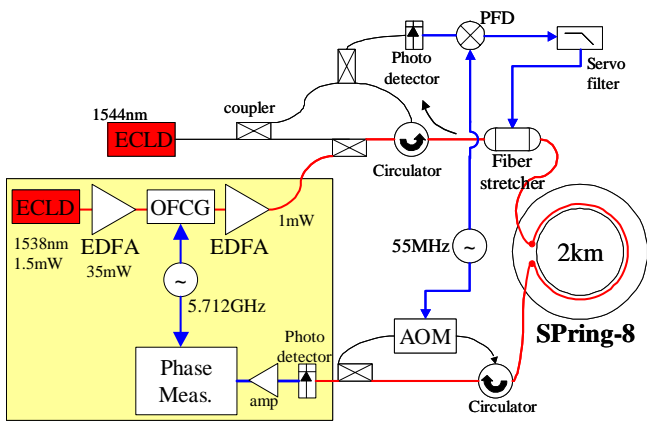


図 8. 実験系概略図

数コムの発振系と RF 位相ゆらぎの測定系を追加したものである。まず ECLD から出た光が EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier) で増幅された後、OFCG (Optical Frequency Comb Generator) に入ることによって光周波数コムが形成される。OFCG には 5.712GHz の RF 信号が入っており、この RF 信号を伝送する。発生した光周波数コムは EDFA で再び増幅された後、ファイバ中を伝搬し、終端のフォトディテクターで電気信号に変換される。この信号を基準となる 5.712GHz の信号と共に位相ゆらぎ計測系に入れることにより、位相のゆらぎを測定した。

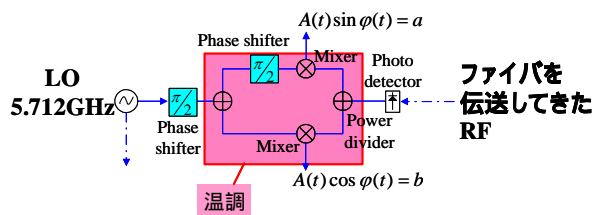


図 9. 位相ゆらぎ計測系

図 9 に位相ゆらぎの計測系概略図を示す。計測系には温度に敏感な電子部品を使っているため、温調をつくり温度を一定に保った。それぞれの RF 信号が計測系に入ると計測系の内側にあるフェイズシフターにより、位相が $\pi/2$ ずれた二つの信号が検出される。これを以下の式に代入することにより、RF 位相ゆらぎを検出した。

$$\tan \varphi(t) = \frac{\sin \varphi(t)}{\cos \varphi(t)} = \frac{a}{b}$$

$$\varphi(t) = \tan^{-1}\left(\frac{a}{b}\right)$$

ここで、計測系の外部のフェイズシフターはそれぞれの信号の振幅を検出するために用いた。

以下に今回の測定結果を示す。

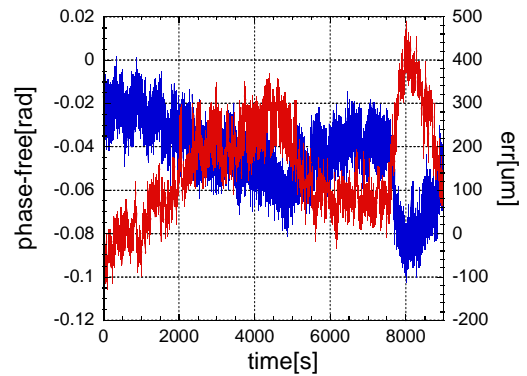


図 10. 非安定時の位相変化とファイバの変動長の関係 (青：位相 赤：ファイバの変動長)

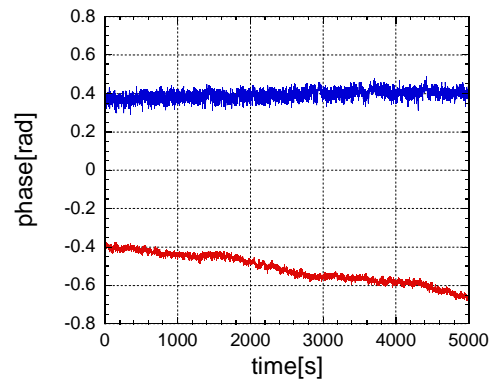


図 11. 安定化時と非安定化時での位相変化の比較 (青：安定時 赤：非安定時)

図 10 のグラフは非安定化時の位相とファイバ長の時間的な変化を表わしたものである。9000 秒の測定でファイバ長は 0.6mm、位相は 0.1rad 変動した。このグラフから位相変化とファイバ長変化には相関性があることが見受けられる。

また、図 11 のグラフは安定時と非安定時の位相の変化を比較したものである。安定化時では非安定化時と比べて位相が

ほぼ一定に保たれていることがわかる。しかし、全体的に 0.04rad ほどのドリフトが見られ、今後、この発生原因を突き止める必要がある。

3.2. PFD の製作

今回、実験系に用いる PFD を新たに製作した。新たな試みとして、基盤パターン図作成用ソフト PCBE を用いて図面パターンを作成し、それを元に基盤加工機を用いて両面基盤を加工することで PFD の製作を行った。これにより今後、PFD の量産が可能となった。図 12 に今回作製した PFD の写真を示す。

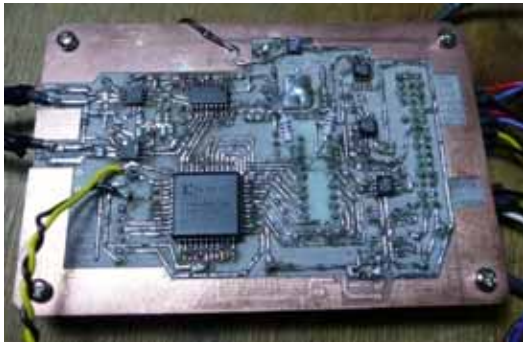


図 12. PFD 回路

3.3. Timing jitter 計測

本実験ではタイミングジッター計測用の相互相関計を作成したが、データを取るまでには至らなかったため、測定原理のみを説明する。

今回は図 13 のような相互相関計を製作した。この相関計に参照光と計測光を入れる。参照光と計測光は図 8 のような実験系から検出する。まず、発生した光周波数コムをハーフミラーで分け、一つを参照光とし、もう一方のファイバを伝送して終端から出てきた光周波数コムを計測光とした。次に参照光を実験系に入れたときにレンズで集光され、BBO (バリウムボライト) 結晶に入る時の波形をコーナーキューブ (C.C.) 2、3 をずらすことにより半パルス分ずらしておく。そこへ、C.C.1 を動かすことに計測光の波形を

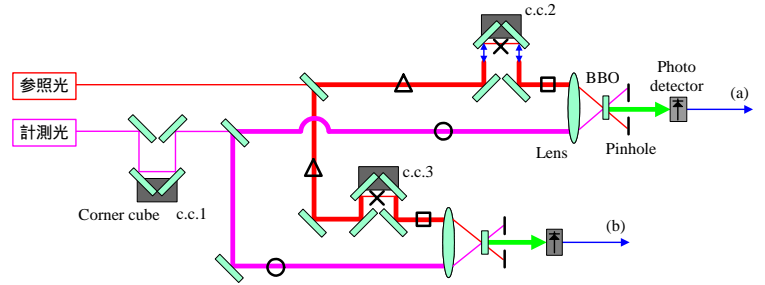


図 13. 相互相関計概略図

動かしていくと、BBO 結晶上で波形が重なった部分の面積に応じた強度の第二高調波が発生する。この時、発生する二つの第二高調波の位置が半パルス分ずれたところで、二つの波形の強度が等しくなる。これを差し引きすると図 14 のような波形になる。ここで、二つの波形を差し引きするのは、パルスは強度の揺らぎが大きいので、その影響をなくするためである。この波形の 0 点付近の時間に対する強度の変化を見ることで、Timing jitter を計測しようと考えている。

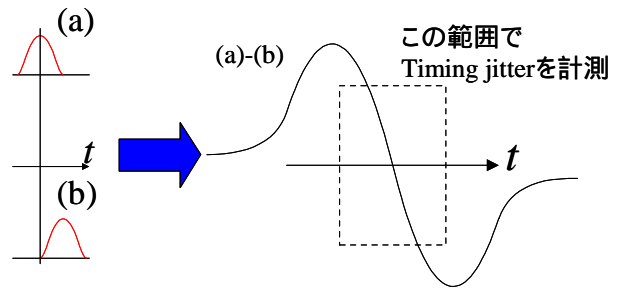


図 14. Timing jitter 計測
(a)、(b)は半パルス分ずれた波形)

4. 今後の予定

今後の予定としては、RF 位相の揺らぎを実験系のそれぞれの部分で再測定し、ドリフトの原因を究明する。

また、今回できなかった、Timing jitter を計測し、それについての評価も合わせて行う予定である。