

cERL 周回部におけるバンチ長の測定 BUNCH LENGTH MEASUREMENT AT RETURN LOOP OF CERL

本田洋介^{*A)}、島田美帆^{A)}、高井良太^{A)}、アリシェフアレクサンダー^{A)}、シェベレフミハイル^{A)}
Yosuke Honda^{*A)}, Miho Shimada^{A)}, Ryota Takai^{A)}, Alexander Aryshev^{A)}, Mikhail Shevelev^{A)}

^{A)}High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

Abstract

One of the features of Energy Recovery Linac is the possibility to operate short bunched beam in a high repetition rate. It is expected to be useful for producing coherent emission of THz light. At cERL, short bunched beam will be produced by bunch compression mode which controls longitudinal dispersion of the arc section at off-crest operation of the main accelerator. For precise beam tuning of bunch compression, a reliable bunch length monitor is necessary. We have been developing a bunch length monitor based on an interferometer system utilizing a coherent transition radiation. We show the first example of the measurement and the status of bunch compression experiment.

1. はじめに

ERL(エネルギー回収型線形加速器)は、線形加速器の特長である低エミッタンスで短バンチのビームを、エネルギー回収の原理で大平均電流で連続運転できる加速器である。KEKでは、将来の大型ERL加速器のための試験加速器としてcERLが建設され、現在コミッションが続けられている。cERLでは、高繰り返し短バンチビームの特長を生かして、THz領域のコヒーレント放射を発生し、利用することができると期待されている。

良く知られているいくつかの放射過程のコヒーレント放射のスペクトルを、cERLで想定するビームパラメータで計算した結果を、Figure 1に示す。RMSバンチ長100 fsで、数THzまでのコヒーレント放射が得られることが分かる。入射器で生成するビームのバンチ長は数psを想定しているため、THz光源として運転するには、周回部においてバンチ圧縮を行うことが必須である。

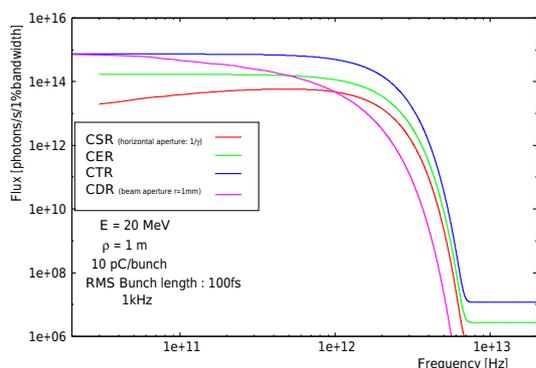


Figure 1: Coherent radiation expected from cERL parameter.

Figure 2にcERLのレイアウトを示す。バンチ圧縮運転では、加速空洞をオフcrest位相で運転してバンチ内にエネルギー勾配をつける。さらに、第1アーク部の分散関数を調整して有限な長手方向の分散 R_{56} をつ

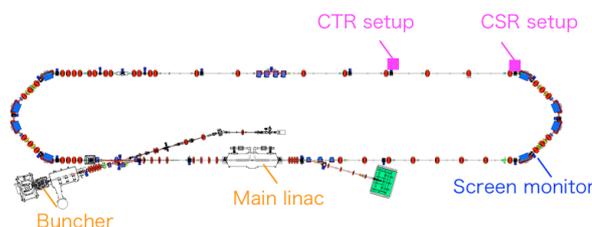


Figure 2: Layout of cERL.

ける。これによって、下流の直線部において時間方向に圧縮したバンチが実現できることになる。このバンチ圧縮の調整を行う為には、アーク部の R_{56} の微調整と、アーク下流の直線部のバンチ長モニターが必要である。

TR(遷移放射)は、導体標的にビームが衝突して発生する放射である。光源点が良く定義できること、周波数特性が平坦であること、また、45度に標的を置くと、90度方向に放射が得られ開口を大きく確保できることから、ビーム診断に用いるのに適している。バンチ長が波長と同等以下になると、コヒーレントな放射となる(CTR)。ただし、ビームを破壊してしまうので、高繰り返し運転では使用出来ない。平均フラックスが必要な場合は、CSRやCDRのような、非破壊な過程を利用し、連続運転を行うのが良いであろう。

cERLの周回部の直線部では、CTRを利用してバンチ長の測定を行っている。

2. CTR干渉計によるバンチ長測定

直線部の一つのスクリーンモニタを改良し、通常のビーム調整時のプロファイルの測定と切り替えて、TR標的(厚み70 μmのシリコンにアルミコーティングしたものが、ビームに45度に挿入される。)からの放射を、石英ビューポートからビーム軸と直交方向に取り出せるようにした。

CTRのスペクトルを十分に広い帯域で検出し、また、波長に依存した位相のずれが無視できるならば、CTRの自己相関法、即ち干渉計信号により、バンチ形状を得

*yosuke@post.kek.jp

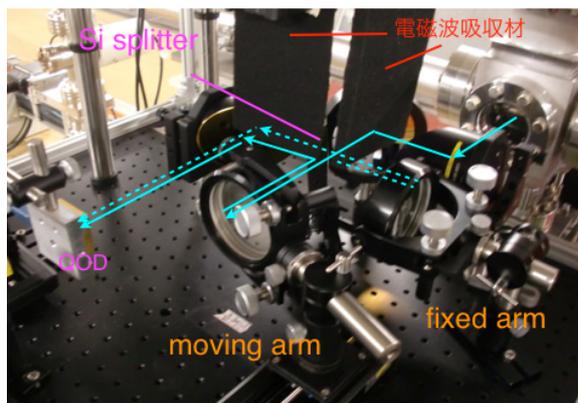


Figure 3: Setup of CTR interferometer.

ることが出来る。Figure 3 に、構成した CTR 干渉計のセットアップを示す。TR は $1/\gamma$ の発散角で放射されるため、最初にパラボラミラー(焦点距離 220 mm)を用いて平行光にする。これをビームスプリッターで2つの光路に分け、平面鏡で反射して戻し、再び合成する。片方の光路は固定、もう一方の光路は平面鏡を自動ステージに設置してあり、光路長が可変である。合成した信号をパラボラミラーで集光し検出器に入力する。ビームスプリッターは、シリコン基板(厚み 300 μm 、または 100 μm)を用いた。検出器は、QOD(Virginia diode 社)と呼ばれる、ダイオード型で広帯域(100 ~ 1000 GHz)のものを用いた。検出器は、2軸ステージにマウントされ、水平、垂直方向に位置調整することが出来るようにした。干渉信号を確認する過程で、片方ずつの光路を塞いで測定する必要がある。このため、遠隔でそれぞれの光路に電磁波吸収材を挿入できるようにしている。

最初の試験は、バンチ電荷 0.4 pC/bunch、バンチ繰り返し 1.3 GHz、パルス長 1 μs のビーム条件で行った。アーク部を利用したバンチ圧縮は行わず、入射器のバンチャー電圧で若干のバンチ長の調整は出来る。干渉信号の測定の前に、まず光路の位置合わせの確認を行った。Figure 4,5 は、各光路からやってくる信号強度の空間分布を測定したものである(スキャンしていない軸については、プロファイル全体の中央に固定)。片方の光路を電磁波吸収材で塞いだ状態で、検出器位置をスキャンした。TR はラジアル偏光でドーナツ状の分布のはずであるが、途中の光学系と検出器の偏光依存性の為に、水平スキャンでは1山、垂直スキャンでは2山の分布になっている。干渉計の動作のためには、2つの光路の光軸の一致と、強度のバランスが重要であるが、それらは良く調整されていることが確認出来た。

検出器は両方向のプロファイルの中央の位置に固定し、干渉計として片方の光路長をスキャンしたところ、Figure 6 に示す干渉縞信号が得られた。仮に、理想的に広帯域で検出した場合、元のバンチ形状がガウス型であれば、干渉縞信号もガウス型になるはずである。実際は、検出器および輸送光学系の帯域が有限である効果で、何回か振動する波形になる^[1]。これを解析してバンチ長を見積もるには、観測帯域を定義するフィルタ関数を仮定する必要がある。とくに、ここで見られるよ

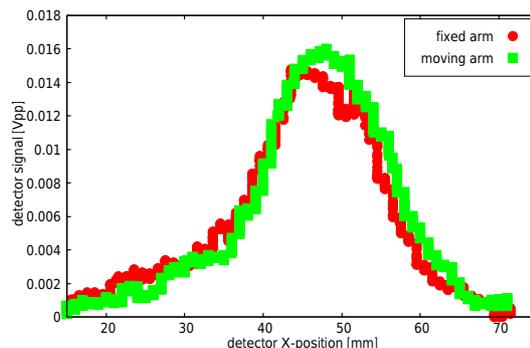


Figure 4: Profile at the detector (horizontal).

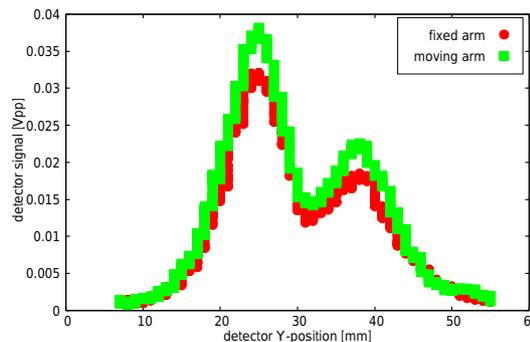


Figure 5: Profile at the detector (vertical).

うな3周期の振動を理解するには2次以上のフィルタ効果があると考えられる。フィルタの次数を試行錯誤しフィッティングした結果、バンチ長は 1.9~2.3 ps (RMS) と見積もられている。より正確な測定を行うには、帯域を制限する要因の理解が必要である。

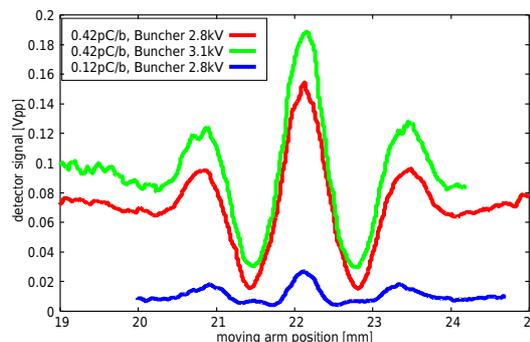


Figure 6: Example of an interferogram.

シリコンスプリッターの帯域が測定を制限していると予想し、2度目の試験では厚み 100 μm のものに交換した。この時は、ビーム条件も異なり、バンチ電荷 5 pC/bunch、バンチ繰り返し 162.5 MHz、パルス長 1 μs である。Figure 7 に干渉縞信号の結果を示す。条件が異なるので、Figure 6 と直接比較できないが、振動の様子が異なり、フィルタ効果が変わったと考えている。バンチャーの電圧を変化させてバンチ長を調整し、波形の応答を調べた。バンチャー電圧を上げバンチが短くなるに従って、信号強度は強く、中央のピークが細くなる応答

を確認した。

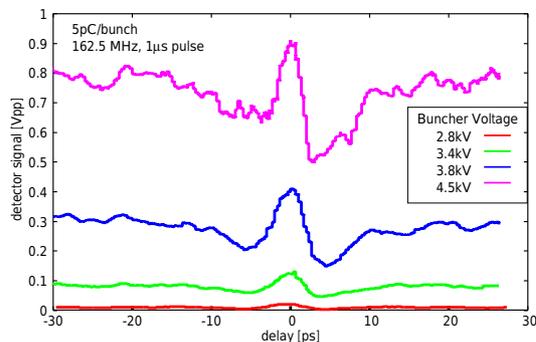


Figure 7: Example of interferogram (2nd trial with 100 μm Si splitter).

3. バンチ圧縮の試験

アーク部を利用したバンチ圧縮の試験も行っている。バンチ圧縮には、主空洞のオフ Crest 加速と、アーク部の R_{56} の微調整が必要である。アーク部には 6 台の四極電磁石があり、これらの組み合わせで、色消し (アクロマート) の光学系となっている。通常は等時性 (アイソクロナス) にもなる条件で使用しているが、バンチ圧縮においては、色消しの条件は保持したまま R_{56} を微調整するため、四極電磁石をある比率で同時調整できるようにした。

バンチ圧縮は次の手順で行った。まず、下流側主空洞の位相を、通常のオン Crest の状態から一定量だけずらす。そのままでは、位相をずらした分だけビームエネルギーが下がるので、それを補償するだけ主空洞の振幅を上げる。ビームエネルギーは、アーク部入口のスクリーンモニターで確認する。バンチ長を反映する何らかのモニター値を見ながら R_{56} を微調整して、バンチ長最小を探す。

バンチ長は、CTR の強度を指標として測定した。CTR 干渉計の一つの光路を塞いで、単なる強度測定として使用した。Figure 8 は、それぞれの主空洞位相条件において、 R_{56} をスキャンしながら CTR 強度を測定した結果である。 R_{56} のある有限な値において CTR が非常に強くなる条件があることが確認できた。また、この条件は、主空洞位相のシフト量と符号に依存する様子も確認できる。

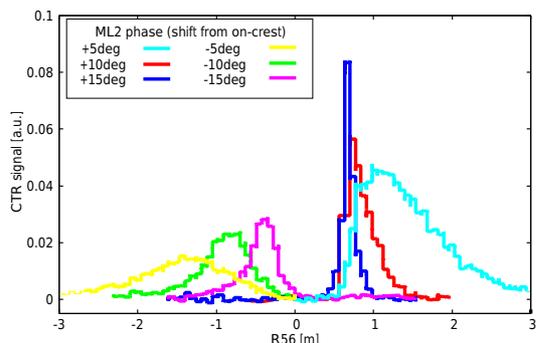


Figure 8: Bunch compression experiment.

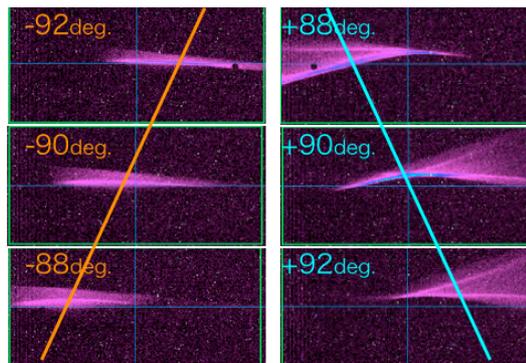


Figure 9: Example of bunch length measurement with the zero-cross method.

4. 圧縮前のバンチ長の評価

圧縮前のバンチ長を理解しておきたい。そこで、アーク部より上流で主加速空洞を利用した評価を行った。具体的には、通常は最大加速位相で運転している 2 台の主加速空洞のうち、下流側の 1 台の位相を 90 度ずらし、いわゆるゼロクロス運転を行う。時間的に線型に変化する加速電場により、時間軸に沿ってエネルギー変化を与え、アーク部入口の分散がある位置のスクリーンモニターで、水平方向のサイズとして時間幅を評価する事が出来る。

ここで示す一例は、高電荷運転用に入射器を最適化調整したビーム条件で、バンチ電荷 7.7 pC/bunch、バンチ繰り返し 162.5 MHz の条件で測定を行ったものである。Figure 9 は、オン Crest 位相から -90 度および +90 度付近において、アーク部入口のスクリーンモニターで測定したビーム像である。水平ビームサイズから時間幅が、また、位相を僅かに変化させたときの重心の移動量から時間軸の校正係数が分かる。どちらのゼロクロス位相でも校正係数は概ね一致していると見られることから、測定自体は正しく成されていると考えている (位相に依存する軌道のキックの影響は小さい)。ただし、ビームプロファイルが 2 山に分裂しており、理想的なガウス型をしていないことから、バンチ長の定義が簡単で無い。RMS バンチ長を、5.3 ps (+90 度のデータから換算)、あるいは、3.3 ps (-90 度のデータから換算) と読み取り、 4.3 ± 1.0 ps と評価する。

5. まとめ

cERL では、コヒーレント放射の発生に向けて、バンチ圧縮運転の試験を開始している。ビーム調整の為に、バンチ長モニターが必須であり、CTR 干渉計による測定システムの立ち上げを行っている。

なお、本研究の一部は、光・量子融合連携研究開発プログラムによるものである。

参考文献

[1] Y. Honda, et al., “ERL 試験加速器における周回部バンチ長計測の検討状況”, 第 11 回加速器学会年会プロシーディングス.