

SACLA 軟 X 線自由電子レーザービームラインにおける六極電磁石を用いたエネルギーチャープ非線形性補正

NONLINEAR ENERGY CHIRP CORRECTION USING SEXTUPOLE MAGNETS AT THE SOFT X-RAY FREE-ELECTRON LASER BEAMLINE OF SACLA

渡川和晃[#], 原徹, 田中均

Kazuaki Togawa[#], Toru Hara, Hitoshi Tanaka
RIKEN SPring-8 Center

Abstract

A soft x-ray FEL (free-electron laser) beamline of SACLA is driven by a dedicated 800-MeV electron accelerator (SCSS+) and being operated in parallel with two hard x-ray FEL beamlines. Responding to the demands of short laser pulses from users, a nonlinearity correction system using sextupole magnets is proposed to obtain shorter electron bunches. Since the frequency of the SCSS+ injector linac is S-band, the non-linearity correction of a bunch compression process using a harmonic correction cavity is not so efficient as the SACLA injector, whose frequency of the linac is L-band. Instead of a complex and costly correction cavity system, the sextupole magnets are simply installed in a dispersive section of the first bunch compressor chicane. In this paper, we report the basic design concept and some detail studies of this nonlinear correction.

1. はじめに

理化学研究所のSPring-8キャンパスでは、X線自由電子レーザー(XFEL)施設SACLAのためのプロトタイプマシンとして、極端紫外領域のFEL光を発生するSCSS試験加速器が2005年に建設された[1]。この加速器は2014年にSACLA光源棟の収納部内に移設され、波長が8 nmから60 nmの軟X線FEL光を発生するための加速器にアップグレードされた(加速器名はSCSS+) [2]。最大加速エネルギーは800 MeV、バンチ電荷量は約0.3 nC、最大繰り返しは60 Hzである。

SCSS+は2台のシケイン型バンチ圧縮器を備えている。1台目は入射器の出口に設置されており、50 MeVの電子ビームのバンチ長を数psから1psに圧縮する。2台目はC-band主加速部の途中に設置され、500 MeVの電子ビームを最終状態であるサブpsに圧縮する。SCSS+の入射器は、エネルギーチャープの非線形性を補正する高調波空洞を備えていないため、最終のバンチ長が0.5 ps程度、ピーク電流が300 A程度に制限されている。FEL光の特性としては、パルスエネルギー100 μJ、パルス幅100 fs以下という値が既に達成されているが、さらに強度が高くパルス幅の短いFEL光を提供することを実験ユーザーから要求されている。

SCSS+の入射器は、S-band加速管を用いて電子ビームを加速しながらエネルギーチャープを与えているので、効率良くエネルギーチャープを線形化するためにはX-bandの補正空洞が必要となる[3]。X-bandの高周波技術は既に確立されているものの、もう一つの周波数を加速器に導入するとなれば多大

な労力を要し、コストも安くはなく容易なことではない。そこで我々は、Fig. 1に示すようにバンチ圧縮器に六極電磁石を設置してエネルギーチャープの非線形性を補正することを提案した。

rfの非線形性によりバンチの先頭と後尾のエネルギーは中央の線型成分に対して双方とも低くなっているため、シケイン内を飛行する距離が長くなり、その結果、バンチ圧縮器の出口でオーババンチングを生じてしまう。そこで六極電磁石をシケインの分散部に挿入し、飛行距離が短くなるようバンチの先頭と後尾に対して内側にキックを与えようというアイデアである。六極電磁石の強度を適切に調整してやれば、バンチ圧縮器の出口でエネルギーチャープが線形化される。

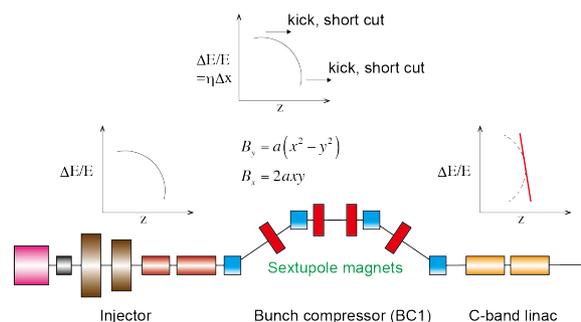


Figure 1: Concept of the nonlinear energy chirp correction using sextupole magnets.

2. 基礎理論

バンチ圧縮器の前後の進行方向座標を変換する式は次のように表される。

[#] togawa@spring8.or.jp

$$z = \frac{1}{C_B} \bar{z} - \left[\frac{R_{56} \bar{E}''}{2 \bar{E}} + T_{566} \left(\frac{\bar{E}'}{\bar{E}} \right)^2 \right] \bar{z}^2 + o(z^3) \\ \approx \frac{1}{C_B} \bar{z} - \frac{1}{2} \alpha z^2 \quad (1)$$

ここで、 z と \bar{z} はバンチ圧縮器の入口と出口における基準粒子に対する進行方向の位置、 C_B は線形のバンチ圧縮係数、 R_{56} と T_{566} は1次および2次のモーメントコンパクトジョン、 \bar{E} は基準粒子のエネルギー、 \bar{E}' と \bar{E}'' は z に対する \bar{E} の1次および2次微分である[4]。 $\alpha = 0$ を満足すれば、電子バンチはいかなる圧縮係数においてもオーババンチをせずに均等に等倍圧縮される。矩形電磁石を用いた標準的なシケインでは T_{566} は近似的に $-3R_{56}/2$ となるので、 $\alpha = 0$ を満すには \bar{E}'' が正である必要がある。補正空洞を用いればこれは達成できるが、別の解として六極電磁石を用いてシケイン内の飛行距離を微調整し、 R_{56} とは独立に T_{566} を制御することも可能である。

摂動計算により T_{566} は次式で表すことができる[5]。

$$T_{566} = 3\theta^2 \left[\frac{2}{3}L + \Delta L + \frac{2}{3}K_1\theta \left(\frac{L}{2} + k\Delta L \right)^2 (1-k)\Delta L \right], \quad (2)$$

K_1 はシケインの斜行部に置かれた六極電磁石のK値（進行方向に積分したもの）である。鏡面对称性の条件から、 K_4 (K_3)は K_1 (K_2)と等しくなる。また、式(2)は第4六極電磁石の効果も含んでいる。 K_1 が負で絶対値が十分大きければ、 T_{566} を負にすることが可能となる。この T_{566} から $\alpha = 0$ を満足するための条件を得ることができる。

$$\theta = \frac{2(2L+3\Delta L)(\bar{E}\bar{E}''/\bar{E}'^2-3)}{3K_1(L+2k\Delta L)^2(1-k)\Delta L} \quad (3)$$

シケインの幾何パラメータはFig. 2で定義した。最後に、線形のバンチ圧縮係数の定義式からもう一つの条件を得ることができる。

$$\theta = \sqrt{\frac{(1/C_B-1)\bar{E}/\bar{E}'}{2(2/3 \cdot L + \Delta L)}} \quad (4)$$

以上の二つの条件式から、バンチ圧縮器のレイアウトと六極電磁石の磁場強度を決定することができる。

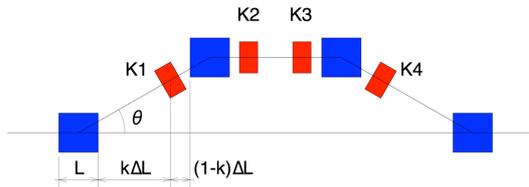


Figure 2: Layout of the bunch compressor chicane with sextupole magnets.

3. パラメータの最適化

シケイン内のベータ関数を適度な値にするために、現状のバンチ圧縮器（長さ 11 m）に収まるよう各パラメータの最適化を行なった。また、次のパラメータ、初期ビームエネルギー (\bar{E}_0 : 1 MeV)、入射器リニアックの周波数 (k_s : S-band)、加速電場

振幅 (eV_s : 50 MeV)、偏向電磁石の長さ (L : 0.3 m)についても現状の値を用いた。第1バンチ圧縮器の圧縮係数は、多段バンチ圧縮のスキームで用いている標準的な値 ($C_B = 5$) を選択した。

3.1 Rf位相

六極電磁石の強度を決める前に、バンチ圧縮過程において最小の2次非線形性を与えるrf位相を導出する。バンチ圧縮器の出口におけるビームエネルギーを固定すると、 α は次のように表すことができる。

$$\alpha = \left(\frac{1}{C_B-1} \right) k_s \left[3 \frac{(\bar{E}-\bar{E}_0) \tan \phi}{\bar{E}} + \frac{1}{\tan \phi} \right] \\ \equiv -3 \left(\frac{1}{C_B-1} \right) k_s f(\phi). \quad (5)$$

関数 $f(\phi)$ をFig. 3に示す。 $f(\phi)$ は次の位相で最小となる。

$$\phi = -\tan^{-1} \sqrt{\frac{\bar{E}}{3(\bar{E}-\bar{E}_0)}}. \quad (6)$$

初期ビームエネルギーが十分小さく無視できる場合、 ϕ は正確に -30° となる。

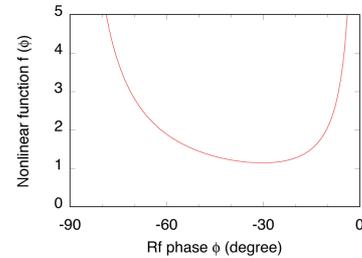


Figure 3: 2nd order nonlinear function $f(\phi)$.

3.2 六極電磁石の位置

式(3)から六極電磁石の磁場強度を最小にする最適な位置係数 k を求めることができる。Figure 4に示すように、 K_1 は $k = \frac{2}{3} + \frac{L}{6\Delta L}$ で最小となる。斜行部の長さ ΔL に対して偏向電磁石の長さが十分短い場合、 k は正確に $2/3$ となる。六極電磁石によるキック角は分散の大きいところで大きくなるが、非線形性の補正が行われる第1から第2六極電磁石までの距離は k が大きくなると短くなるため、位置係数 k に最適値が存在するのである。 K_1 の k 依存性はフラットボトムであるので、きりの良い数値 $k = 0.7$ を選択した。

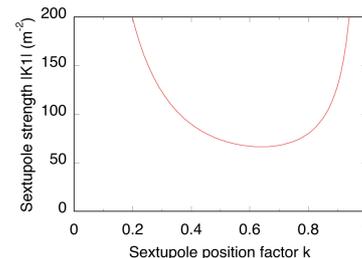


Figure 4: Sextupole strength as a function of the position factor k .

3.3 斜行部長さ、キック角、六極電磁石強度

Figure 5 にシケインパラメータの条件式(3)と(4)を様々な K_1 に対してプロットする。 K_1 を小さくするには ΔL を長くすればよいので、可能な限り長い値 $\Delta L = 1.9 \text{ m}$ とした。式(4)から偏向角 $\theta = 0.057 \text{ rad}$ が得られ、式(3)から $K_1 = -68 \text{ m}^{-2}$ となる。

第 2 六極電磁石の磁場強度は、分散 η とその微分 η' がシケイン出口で閉じる条件から、

$$K_2 = -\frac{K_1}{4} \left(\frac{L+2k\Delta L}{L+\Delta L} \right)^2 \quad (7)$$

となる[5]。

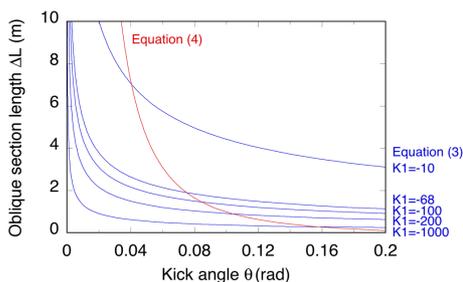


Figure 5: Chicane parameter conditions for various sextupole strengths.

3.4 パラメータの制御性

六極電磁石と偏向チャンバーは固定して設置するので、 R_{56} を変えることが出来ない。従って、S-band の rf 位相によって圧縮係数や非線形補正を制御することも考えておく必要がある。Figure 6 にバンチ圧縮係数と 2 次非線形性を補正する六極電磁石の強度を S-band 位相 ϕ_s の関数として示す。 -26° から -36° までの ϕ_s の範囲でバンチ圧縮係数は 3 から ∞ まで調整可能であり、 $|K_1|$ は 200 m^2 を超えない。

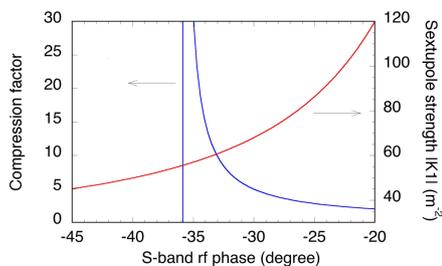


Figure 6: Parameter tunability by the injector S-band phase.

3.5 粒子トラッキングシミュレーション

最後に、ELEGANT コード[6]を用いたシミュレーションで六極電磁石による非線形補正の効果の確認を行なった。第 1 バンチ圧縮器入口のエネルギープロファイルは三角関数 $\bar{E} = \bar{E}_0 + eV_s \cos \phi$ (\bar{E}_0 : 1 MeV, eV_s : 50 MeV, center phase: -30°) を仮定した。電流分布は、バンチ長が 10 ps でピーク電流 25 A の一様分布を仮定した。規格化エミッタンスは水平垂直共に 0.6 mm mrad とし、空間電荷や CSR などのコレクティブ効果は無視した。第 1 バンチ圧縮器から第 2 バンチ圧縮器までの C-band 加速器の位相

は 0° とし、第 2 バンチ圧縮器の R_{56} は -37 mm とした。

Figure 7 に第 2 バンチ圧縮器出口の縦方向位相分布図を示す。 K_1 は最大のバンチ圧縮が得られるよう -100 m^2 に調整した (Figure 8)。C-band 加速器と第 2 バンチ圧縮器の非線形性も補正しているため、 $|K_1|$ は理論値よりも大きな値となっている。

コレクティブ効果も原理的に多項式展開で表現することが出来るので、これらの 2 次非線形性も同様に六極電磁石で補正することが出来ると考えられる。また、一般的に多極電磁石でキックを与えると rms エミッタンスが増加してしまうが、FEL 発振に寄与する位相空間上のコア部に密度は十分高い値を保持していると考えられる[7]。

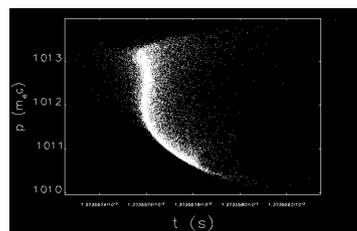


Figure 7: Simulated energy-time phase space plot at the BC2 exit of the SACLA-BL1.

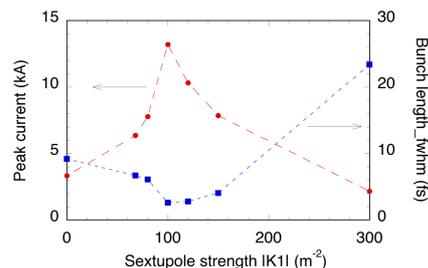


Figure 8: Simulated bunch profile tuning by the sextupole magnets.

4. まとめ

SSCS+の第 1 バンチ圧縮器の分散部に六極電磁石を挿入してエネルギーチャープの 2 次非線形性を補正する手法を考案した。現在、六極電磁石や偏向チャンバー等のハードウェアの製作を行っており、本年度内に設置してビーム試験を行う予定である。

参考文献

- [1] T. Shintake *et al.*, Nat. Photonics 2, 555 (2008).
- [2] S. Owada *et al.*, J. Synchrotron Rad. 25, 282 (2018)
- [3] K. Togawa *et al.*, Phys. Rev. ST Accel. Beams 12, 080706 (2009).
- [4] M. Dohlus *et al.*, ICFA Beam Dynamics Newsletter 38, 15 (2005).
- [5] H. Tanaka *et al.*, internal report (in Japanese).
- [6] M. Borland, Advanced Photon Source Report No. LS-287 (2000).
- [7] H. Maesaka *et al.*, Phys. Rev. Accel. Beams 21, 050703 (2018).