

PARAMETER OPTIMIZATION OF JAERI ERL INJECTOR BY SIMULATED ANNEALING

R. Nagai¹, R. Hajima, M. Sawamura, N. Kikuzawa, N. Nishimori, T. Nishitani, E. Minehara
Free-Electron Laser Laboratory, Advanced Photon Research Center, Japan Atomic Energy Research Institute
2-4 Shirakata-Shirane, Tokai, Ibaraki, 319-1195

Abstract

Accelerating parameters of the JAERI ERL injector are optimized to generate high peak-current electron beam for high-power FEL operation. Simulated annealing is employed for the optimization method, because the bunching action in the injector is very complicated due to a merger of the ERL main loop. Optimization result of the local optimization method such as Newton method strongly depends on starting parameters of the optimization. Since a set of the starting parameters cannot be fixed a priori for the JAERI ERL injector, the optimization has to be done by the global optimization method such as simulated annealing. It is found that over 60 A peak current of the electron beam can be achieved in the JAERI ERL injector.

シミュレーテッドアニーリングによる原研ERL入射部のパラメータ最適化

1. はじめに

原研自由電子レーザーでは超伝導リニアックをエネルギー回収型リニアック(ERL)に改造し、自由電子レーザー(FEL)の高出力化を進めている^[1-6]。当初の計画では、コヒーレントシンクロトロン放射(CSR)によるエミッタンス増加を避けるために、周回軌道を回るバンチ幅を15ps (FWHM)程度以上(ピーク電流は30A程度以下)としていた^[7]。しかし、最近になって、CSRによるエミッタンス増加を抑える方法が見つけた^[8]ので、バンチを更に圧縮しピーク電流を高くしてFELの変換効率を上げることによる高出力化の可能性が出てきた。

これまでの原研ERLの運転およびParmela^[9]によるシミュレーションでは最短のバンチ幅は15ps (FWHM)程度までしか得られていない。高ピーク電流化(短バンチ化)によるFELの高出力化を実現するには、現在の入射部の構成で得られる最大のピーク電流値を明らかにし、現在の構成での高ピーク電流化が不可能であるならば、その問題点を明確にし入射部の改造を行う必要がある。

実際の運転およびParmelaによるシミュレーションで短いバンチが得られなかった理由として、以前の原研超伝導リニアックの構成^[10]でのパラメータを初期値としてパラメータ探索を行っていたことが考えられる。現在の構成で達成可能な最大ピーク電流値を明らかにするためには大域的最適化による最適解探索の必要がある。そこで大域的最適手法としてシミュレーテッドアニーリング(SA)^[11]を用い、ピーク電流値をParmelaにより算出することで現在の構成での最大ピーク電流値の評価を行った。

2. 原研ERL入射部の構成と最適化手法

原研ERLは以前の超伝導リニアックを改造する形で建設されており、入射部からのビームは新設された合流部で周回軌道と合流し主加速器へ入射している。図1に示すように、入射部は230kV電子銃、常伝導SHB (83.3MHz)、2台の前段超伝導加速器(499.8MHz、1cell)、合流部で構成されている。電子銃ではグリッドパルサーにより800ps (FWHM)、0.5nCの電子ビームを生成し、SHBにより速度変調

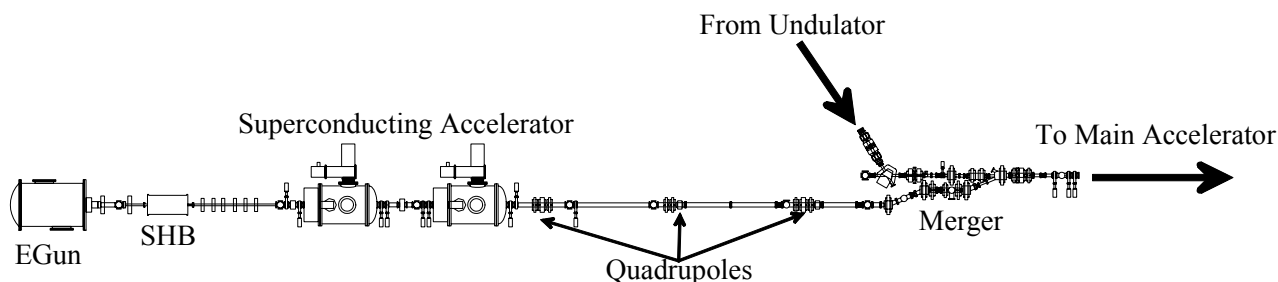


図1 : 原研 ERL 入射部の構成

¹ E-mail: r_nagai@popsvr.tokai.jaeri.go.jp

を与え、前段超伝導加速器までのドリフト空間で ballistic bunching (velocity bunching の一種)により 100ps程度まで圧縮される。さらに1台目の前段超伝導加速器で ponderomotive bunching (velocity bunching の一種)により圧縮され、2台目の前段超伝導加速器で速度変調を与え合流部までのドリフト空間で ballistic bunching により圧縮され、合流部での magnetic bunching により圧縮された電子ビームが主超伝導加速器へと入射される。

このように原研ERL入射部では様々なバンチング機構が入り混じっており、複雑なバンチングの挙動を示し、バンチングにはいくつものパラメータが関わっている。このように複雑な系でのパラメータ探索の初期値を決定することは非常に困難であり、ニュートン法のような確定的手法では初期値の周辺での局所的最適化しか行えないので、確定的手法による最適化は不適切である。したがって、原研ERL入射部で得られる最大ピーク電流を求めるためには、SAのような確率的手法による大域的最適化の必要がある。SAは実際の焼きなましを模擬した手法であり、温度Tを高温の状態からゆっくりとさげることで最適解を探す方法である。SAの最大の特徴は局所的最適解に陥らないようにするために、温度Tで決まる確立で悪い解も採択することである。SAのアルゴリズムは以下のようなものである。

- (1) 初期解をランダムに選択
- (2) ボルツマン方程式に基づき初期温度 T_0 を計算
- (3) 解の周辺の探索範囲でパラメータを一つずつ変えながら解を探す
- (4) 探した解が初期解より良ければ、無条件でその解を採択し、そこへ移動
- (5) 探した解が初期解より悪くとも、温度Tで決まる確立で採択し、そこへ移動
- (6) (3)-(5)を N_s 回繰り返す
- (7) 採択の確立がほぼ一定になるように探索範囲を調整
- (8) (3)-(7)を N_t 回繰り返す
- (9) $T=T \times R_t$ として冷却
- (10) 探索範囲が十分小さくなるまで(3)-(9)を繰り返す

SAの収束性は解きたい問題に応じたループの回数 N_s と N_t と冷却の速度 R_t を選び方による。一般に R_t は0.7以上であれば解を見つけられると言われているが、ここでは安全をみて R_t を0.8とした。ループの回数は N_s と N_t それぞれ15回と5回とした。

3. 最適化の結果

ピーク電流を最大化する際に最も寄与するパラメータはSHBの振幅と位相、前段超伝導加速器2台の位相、合流部の四極電磁石の強度であるので、これらをフリーパラメータとして、SAによりピーク電流最大化を行った。計算の結果、最適化以前はピーク電流36.3A、バンチ幅10.8ps (FWHM)であったのに対してピーク電流64.5A、バンチ幅5.6ps (FWHM)が得られた。その際の粒子分布の様子を図2に示す。

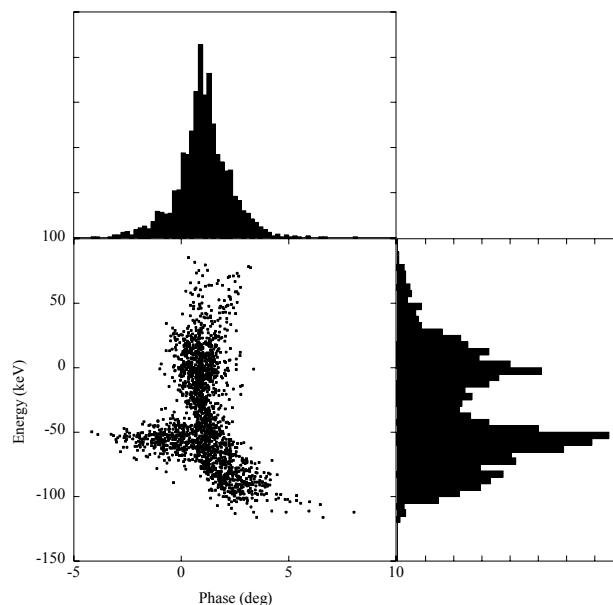


図2：ピーク電流最大化後の粒子分布

最適化以前と比較し、短いバンチを得るための肝要な点は何であるかを調べるために最適化前後の各空洞の位相とSHBの振幅を表1にまとめてみた。ただし、超伝導加速器の位相についてはbeam loadingが最大となる位相を90度としている。2台目の前段超伝導加速器(SCA2)の位相だけがほかのパラメータに比べて大きく変わっている。そこで、SCA2の前後の位相空間での粒子の様子を比較してみる。図3に示すように、SCA2に入射する際の粒子分布の様子は最適化前後でそれほど変化はないが、SCA2から出てきた粒子の分布を見ると、最適化前には曲がっていたのに対して最適化後は直線状になっている。即ち、SCA2の位相をcrestからより大きく外したことで直線状の粒子分布にでき、短いバンチを得ることができたということである。

表1：最適化前後の各パラメータの変化

	Amplitude (kV)	Phase (deg.)		
	SHB	SHB	SCA1	SCA2
before	90.0	-4.7	86.6	56.0
after	85.6	-5.0	85.5	48.8

この最適化後のx、y方向の規格化エミッタンスはそれぞれ $72\pi\text{-mm}\cdot\text{mrad}$ 、 $95\pi\text{-mm}\cdot\text{mrad}$ であり、やや大きくなってしまっている。幸い、原研ERL-FELの波長は $22\mu\text{m}$ 程度であるので、この程度エミッタンスでも問題にはならない。しかし、ビーム輸送でのエミッタンス増加やエネルギー回収の際に問題になる可能性があるので輝度を最大にする最適化を行った。ピーク電流最大化の際のエミッタンス増加の理由としては、無理にバンチ圧縮したことおよび、合流部前後の四極電磁石の強度が最適化されていないことが考えられる。そこで、合流部前後の四極電磁石の

強度もフリーパラメータとして、輝度の最大化を行った。その結果、ピーク電流49.8A、バンチ幅9.4ps (FWHM)かつx、y方向規格化エミッタンス $35\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$ 、 $26\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$ を得ることができた。入射部で加速する際のエミッタンスとバンチ幅の変化を図4に示す。合流部通過後も大きなエミッタンスの増加なしにバンチ圧縮できている様子がこの図から分かる。

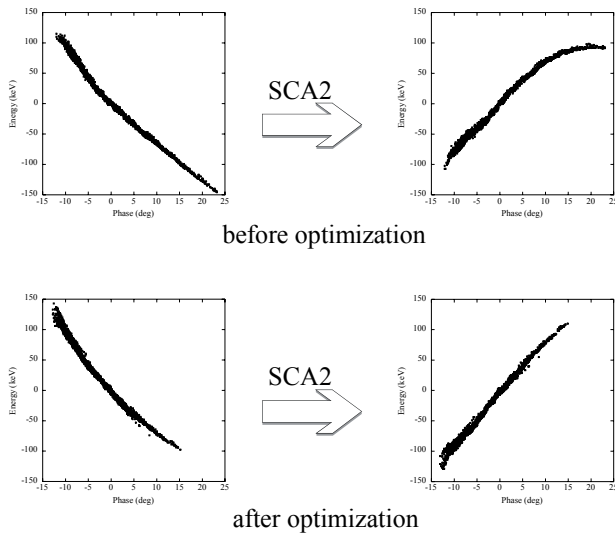


図3：SCA2前後での粒子分布の変化の最適化前(上)後(下)の比較

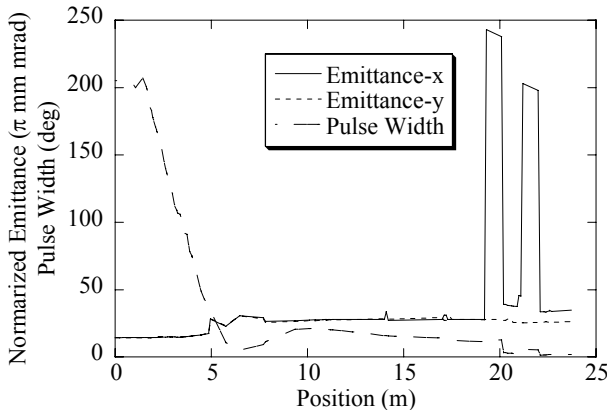


図4：最適化後のエミッタンスとバンチ幅

4. まとめ

SAによって原研ERL入射部のパラメータ最適化を行い、加速器のパラメータ最適化にSAが有用であることを確認した。この最適化の結果、現在の構成でピーク電流を64.5Aにできることが分かった。これにより、ピーク電流を高くしてFELの変換効率を上げることでの高出力化が現在の構成で可能であることが分かった。

今後は電子銃からアンジュレータもしくはビーム回収までの最適化を行う予定である。また、原研ERL-FELの安定性(タイミングおよび位相ジッタに対する許容度)の評価を行うには、最適パラメータを見つけておく必要があるため、SAを用いた加速器の最適化は原研ERL-FELの安定性評価には必要不可欠である。

SAの問題点としては計算に時間がかかる(収束までのステップ数が多い)ことである。そこで、SA以外の手法(例えば確率的進化手法など^[11])についても検討を進めているところである。

参考文献

- [1] 西森信行、他、Proc. of the 28th Linear Accelerator Meeting in Japan (2003) 159-161.
- [2] R. Nagai, et al., "Optical Resonator Optimization of JAERI ERL-FEL", to be published in Proc. of FEL2003.
- [3] 永井良治、他、"原研ERL-FEL用RFローレベル制御装置の改良"、本論文集
- [4] M. Sawamura, et al., Proc. of the 2003 Part. Acc. Conf. (2003) 3446-3448.
- [5] R. Hajima and E. Minehara, Nucl. Instr. and Meth. A 507 (2003) 141.
- [6] 峰原英介、他、Proc. of the 28th Linear Accelerator Meeting in Japan (2003) 159-161.
- [7] R. Hajima, et al., Proc. of the EPAC2000 (2000) 1033-1035.
- [8] R. Hajima, Jpn. J. Appl. Phys. **42** (2003) L974-L976.
- [9] Parmela ver. 3.34; L. M. Young, LA-UR-96-1835
- [10] N. Nishimori, et al., Phys. Rev. Lett. **86** (2001) 5707-5710.
- [11] 白石洋一訳、"組合せ最適化アルゴリズムの最新手法"、丸善(2002).