

共振器型自由電子レーザー高輝度 THz 帯発振のための 速度集群最適化シミュレーション

SIMULATION OF VELOCITY BUNCHING OPTIMIZATION FOR BRIGHT THz LIGHT SOURCE FROM OSCILLATOR FEL

住友洋介*, 早川建, 早川恭史, 野上杏子, 境武志, 田中俊成

Yoske Sumitomo*, Ken Hayakawa, Yasushi Hayakawa, Kyoko Nogami, Takeshi Sakai, Toshinari Tanaka
LEBRA, Institute of Quantum Science, Nihon University

Abstract

Recent developments of THz light source have brought significant advances in material diagnostics. Especially, the high-bright THz radiation plays a crucial role in understanding the transformation property of material. The oscillator free electron laser (FEL) with a middle-range linear accelerator has a great potential to generate such the bright light source at reasonable cost. Hence we expect the acceleration of further developments of material science and related subjects through THz spectroscopy. We illustrate a simulation for pre-bunching of electron beam by a combination of velocity bunching along three travelling wave accelerator cavities at Nihon University. When a pre-bunched electron beam enters the oscillator FEL, the coherent bright radiation is generated and further amplified by the resonator mirrors. Since we expect the electron energy to be less than 25 MeV, it is necessary to simulate and optimize the combination of velocity bunching including the space-charge effect. In this presentation, we focus on the optimization of velocity bunching, and discuss the other possibilities of pre-bunching.

1. 背景

近年の技術発展により THz 帯光源の開発が盛んに行われており、物性現象などの研究に活用されている。特に高輝度の THz 光源は物質の性質変化を探るために役に立つ。小・中規模線形加速器と共振器型自由電子レーザーを用いた THz 帯の高輝度光源開発により、光源の入手が容易となり関連研究分野の飛躍的な発展を促進すると期待される。

本発表においては日本大学電子線利用施設 (LEBRA) における線形加速器の利用を想定する。LEBRA では 3本の 4m の進行波加速管で加速を行い、2つの 45 度偏向磁石を通り、その後全長 2.4m 程度の共振器型アンジュレーターで発振を行っている (Fig.1 参照)。共振器型アンジュレーターにより発生する光源のパワーは、アンジュレーターによる放射強度と共振器鏡における損失のバランスにより決定される。そこで、電子ビームのプレバンチ化によりアンジュレーターでコヒーレント放射を引き起こし、電子数に対する非線形な放射の増加により、高輝度の THz 帯光源開発を行う。

LEBRA のアンジュレーターのパラメーターは $\lambda_u =$

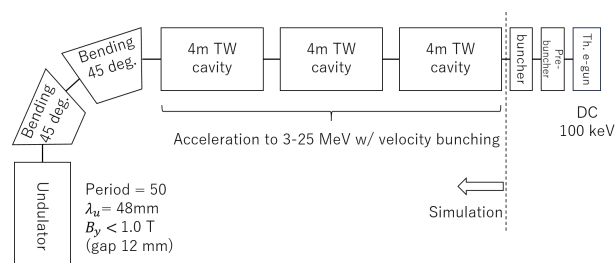


Figure 1: The layout of beam line at LEBRA, Nihon Univ. Quadrupole magnets are located in between.

* sumitomo.yoske@nihon-u.ac.jp

48 mm, $K = 2.0$ (24 mm gap 時) であるが、THz 帯 (0.1 - 10 THz) での放射光を得るためには、アンジュレーターの共鳴条件の近似式:

$$\lambda_r = \frac{\lambda_u}{2\gamma^2} \left(1 + \frac{K^2}{2} \right) \quad (1)$$

から 3 - 25 MeV 程度の電子ビームエネルギーが必要であることがわかる。このような低いエネルギーではバンチ内における空間電荷効果が無視できない。その為、プレバンチ化や粒子の輸送に関して空間電荷効果を含めたシミュレーションが重要である。

プレバンチの方法としては、進行波加速管を用いたベロシティ・バンチング (速度集群) や 2つの 45 度偏向磁石を用いたバンチ化があげられる。特に、速度集群は、エネルギーが十分低い電子ビームにおいて、進行波の入射位相の調整によりバンチの先頭と末尾でエネルギー差を作ることによって電子に若干の速度差が生じさせ、バンチ長を短くするというものである。THz 帯でのアンジュレーター放射には 25 MeV 以下の電子ビームエネルギーが必要となるが、このようなエネルギーでは速度集群によるプレバンチ化が効果的である。LEBRA では 3本の加速管があり、それぞれの位相を調節して適切な組み合わせを用いることで、加速管 1本の時よりも効果の高いバンチ化が実現可能となる。本発表においては、3本の 4m 進行波加速管における速度集群シミュレーションを中心に最適化条件の報告を行う。なお、1本の 3m 加速管を用いた速度集群、並びにその FEL でのコヒーレント放射については [1] で報告が行われているので参照されたい。

2. 加速管 1本における速度集群

まずは、進行波加速管 1本における速度集群について考える。空間電荷効果を取り入れたシミュレーションを行うため、粒子分布軌道計算コード ASTRA を用い

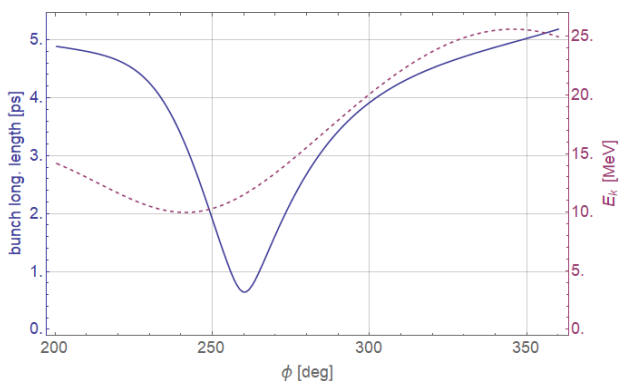


Figure 2: The phase scan of one TW cavity against bunch length (blue, solid) and mean energy (red, dashed) with the peak gradient 7 MV/m.

る [2]。LEBRA では Fig.1 のように、加速管の前にプリバンチャー、バンチャーが設置されているのであるが、ASTRA における進行波のシミュレーションでは周期的な電場をもつものしか取り扱うことができず、バンチャーは加速しながらバンチさせるように設計されており周期的な構造とはなっていない。その為、本発表においては、バンチャー後で理にかなった電子粒子分布を仮定し、そこから 4m 進行波管における 1 バンチの粒子軌道の計算を行う。

プリバンチャー、バンチャーによってバンチ化、加速が行われた後の粒子分布として Table1 のパラメーターを仮定する。バンチャー内での粒子広がりを抑えるため 5 MeV まで加速を行い、熱電子銃なので規格化エミッタンスは比較的良くない数値であるとした。また、考える加速管の加速勾配は 7 MV/m とする。一つ目の加速管とプリバンチャー、バンチャーには同じクライストロンからパワーを供給しており、現在の構成上プリバンチャー、バンチャーに十分パワーを入れるためには、一つ目の加速管にも 7 MV/m 程度の加速勾配を考えるのが妥当となる。

Table 1: A Set of Parameters for Electron Initial Distribution after the Buncher.

| Q | E_k | $\Delta E/E$ |
|------------|----------------|-----------------------|
| 40 pC | 5 MeV | 0.5 % |
| σ_z | $\sigma_{x,y}$ | $\varepsilon_{n,x,y}$ |
| 5 ps | 3 mm | 20π mrad mm |

この初期分布を用いて進行波管 1 本において位相スキャンを行った結果を Fig.2 に示す。この図は、加速管後におけるバンチのプロファイルを測ったものである。結果からは、通常の加速に用いる位相ではなく、それよりも低く加速するところでバンチ長が最小となることがわかる。なお、通常加速に使うエネルギー分散が最小となるところは、 $\phi = 346$ 度付近で $\Delta E/E = 0.46\%$ 、 $\sigma_z = 5.0$ ps に対して、バンチ長が最小となるところでは、 $\phi = 261$ 度付近で $\Delta E/E = 7.2\%$ 、 $\sigma_z = 0.64$ ps となっている。

今までは加速勾配 7 MV/m で考えていたが、もし加速勾配をかえるとすると結果的に得られる最小バンチ

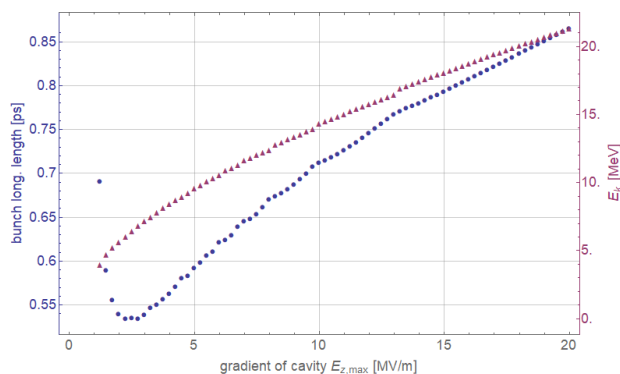


Figure 3: The gradient scan for minimum bunch length (blue circle) and its mean energy (red triangle). The phase scan is performed, given each gradient.

長、並びに加速エネルギーは変化する。Figure3では、加速勾配を変化させたときの最小バンチ長とエネルギーを示してある。なお、各勾配において位相スキャンを行いバンチ長が最小となる位相を求めている。図からは現在用いている 7 MV/m よりも小さな加速勾配においてより速度集群の効果が顕著になっていることがわかる。ただ、現在の LEBRA の構成においてはプリバンチャー、バンチャーの入力パワーをある程度保つためには、1 本目の加速管の加速勾配は 7 MV/m 程度で考える必要があり、以降 1 本目の加速管については 7 MV/m で考える。

3. 加速管 3 本の組み合わせによる速度集群

次に 3 本の加速管における速度集群の組み合わせを考える。ここでは、バンチ長を短くするだけではなく、コヒーレント放射による非線形の放射増加が起こる条件を見つけることを目的とする。コヒーレント放射の放射パワーは以下により特徴づけられる。

$$P(w_r) = ((1 - B(w_r)^2)N + B(w_r)^2 N^2) P_0(w_r),$$

$$= P_{\text{linear}}(w_r) + P_{\text{coherent}}(w_r) \quad (2)$$

$$B(w_r) = e^{-(w_r^2 \sigma_z^2)/2}.$$

ここで、 $w_r = 2\pi f_r = 2\pi c/\lambda_r$ 、 N は電子数、 $P_0(w_r)$ は 1 電子による放射パワー、 $B(w_r)$ はバンチ因子と呼ばれるコヒーレント放射を特徴づけるパラメーターである。なお、バンチ長 σ_z は時間の次元をもっているものとした。バンチ因子が大きくなるとコヒーレント放射による非線形増加が見込めるのであるが、バンチ因子は放射波長に対する相対的なバンチの長さで決まるものであるため、(1) と合わせて考えるとビームのエネルギーも重要となる。

3 本の加速管で最終的に必要となるエネルギーが 25 MeV 以下であることから、加速位相だけではなく減速位相も含めた位相スキャンが重要となる。ただ、3 本分すべてスキャンするというのは並列化した上でも計算コストがかかりすぎるので、ここでの方針としては、まずは位相間隔を大きく取り雑な全体スキャンを行い、その上でバンチ因子が大きな値を示すあたりで細かく位相スキャンを行った。

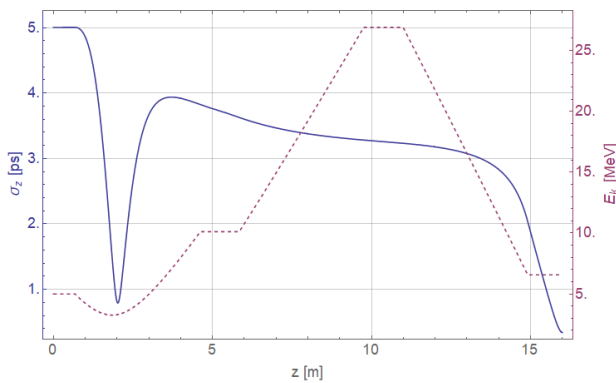


Figure 4: An example of particle tracking data of bunch length σ_z (blue, solid) and mean energy (red, dashed) at each 7 MV/m gradient. The bunching factor reaches 0.35 at 16 m from the virtual initial point.

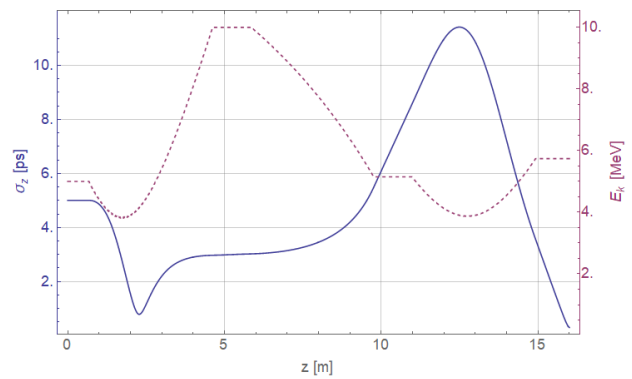


Figure 6: Another example of particle tracking data of bunch length σ_z (blue, solid) and mean energy (red, dashed) at 7, 3, 3 MV/m gradients respectively. The bunching factor reaches 0.62 at 16 m from the virtual initial point.

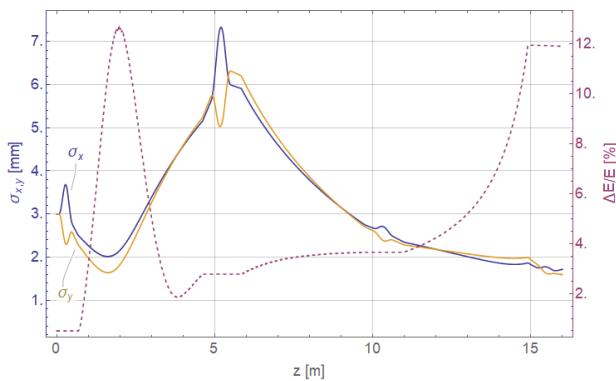


Figure 5: An example of particle tracking data of bunch size $\sigma_{x,y}$ (blue, yellow, solid) and energy spread (red, dashed) at each 7 MV/m gradient.

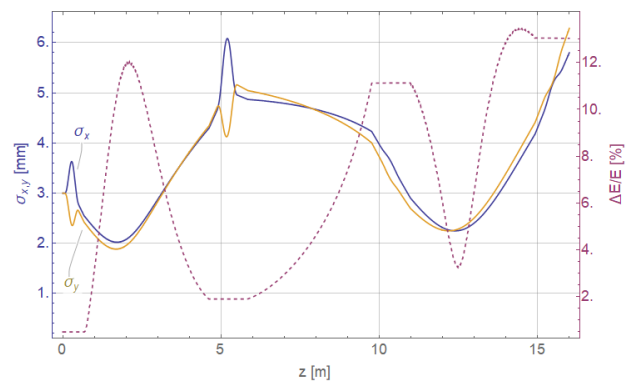


Figure 7: Another example of particle tracking data of bunch size $\sigma_{x,y}$ (blue, yellow, solid) and energy spread (red, dashed) at 7, 3, 3 MV/m gradient respectively.

まずは、3本の加速管ともに7 MV/mの加速勾配を持つときを考える。この場合に位相のスキャンを行い、バンチ因子が大きくなる時の例を Fig.4 に示す。ここで、図は粒子追跡データを表しており、図の座標横軸は Fig.1 におけるシミュレーション初期点からの距離を表している。この例では1本目の加速管で一度減速バンチ化が起こり、2本目で加速しながらの弱いバンチ化、3本目で減速が起こるときに再度強いバンチ化が起こっている。最終的にはバンチ長 $\sigma_z = 0.34$ ps, $E_k = 6.6$ MeV, $f_r = 0.68$ THz, バンチ因子 $B = 0.35$ 程度であり、コヒーレント放射の比率としては(2)から、 $P_{\text{coherent}}/P_{\text{linear}} = 3.4 \times 10^7$ となり、高い放射強度が期待できる。

また、Fig.5 にこの場合のビームサイズとエネルギー分散を示す。LEBRA における4m 進行波管のアーチャーは $\phi = 20$ mm であることを踏まえると、2本目の加速管入り口で多少の損失はあるものの、さほど電荷損失は無いと言えるだろう。エネルギー差を利用した速度集団であるので、最終的なエネルギー分散は高いものとなっている。

なお、Fig.2 において、最小バンチ長は $\sigma_z = 0.64$ ps となったが、この時はエネルギーが12 MeV程度と高く、バンチ因子は大きくならずコヒーレント放射の

優位性は期待できない。コヒーレント放射を引き起こすためにはエネルギーの調整も重要であり、Fig.4 の例では複数本の加速管における位相調整の組み合わせにより実現可能となっている。

上記例においては得られた同じタイプの速度集団のうち最大のバンチ因子となるものを示した。エネルギーが変わると放射の波長も変わり結果的なバンチ因子も影響を受けるが、位相スキャンの結果からは、THz 帯で放射を起こす広範囲のエネルギーにおいて、コヒーレント放射が優勢となるバンチ因子の実現が他の位相の組み合わせにより可能となっていることがわかる。もし様々な放射波長を用いたいのであれば、同じ加速勾配でも位相の組み合わせと偏向磁石の調整を行うことで可能となる。

実際のアンジュレーターは偏向磁石後の90度曲がったところに設置されており図の終端点よりも先であるが、バンチ長の最小点は3本目の位相調整等で容易に行える。本発表においては加速管位相の組み合わせによる速度集団効果に焦点を当てているので、3本目の加速管終端点付近においてバンチ長が最小となるようにした。

次に加速勾配を変化させてみる。LEBRA においては

2つ目のクライストロンで2,3本目の加速管に均等にパワーを供給しているの、2,3本目の加速勾配は同時に変化させたものを考える。先述の例のような状況(Fig.4)は、2,3本目の加速管の加速勾配を3, 5 MV/mに変化させた場合においても存在しており、バンチ化のパラメータ領域が広く安定に存在することがわかる。

位相スキャンで得られたうちでは、3本それぞれ7, 3, 3 MV/mの加速勾配の際に先述の例とは異なる性質のものが存在している。この場合におけるバンチ長とエネルギーの振る舞いをFig.6に示す。図から読み取れるように、今度は2本目は減速に用いて、3本目で減速、加速の両方を行っている。最終的なバンチ長 $\sigma_z = 0.30$ ps, $E_k = 5.7$ MeVとなり、 $f_r = 0.52$ THz, バンチ因子は $B = 0.62$ 程度にまで増大する。また、コヒーレント放射の比率としては $P_{\text{coherent}}/P_{\text{linear}} = 1.6 \times 10^8$ となり、非常に高い放射強度が期待できる例である。

この例においては3本目の加速管でも減速し4 MeV以下にまでエネルギーが落ちていることから、空間電荷効果等によりビームサイズの制御が難しくなっている(Fig.7参照)。非常に高い放射強度が得られる例ではあるのだが、3本目の出口においてもビームが広がってしまっており、その後のアンジュレーターまでの粒子の輸送に対しても工夫が求められる。

4. 議論と展望

本発表では、3本の進行波加速管を用いた速度集群の組み合わせによって、バンチ因子が増加する条件を見出した。バンチ因子はコヒーレント放射を特徴づけるものであり、バンチ因子が大きくなれば自由電子レーザーによる光源のパワーが増幅し、共振器鏡による損失を踏まえた上でも高輝度の発振が期待される。THz帯の周波数でコヒーレントな発振を行うには、バンチ長のみならず適切なエネルギーに加速する必要があり、この2つの条件を調整するのに複数の加速管を用いた速度集群の組み合わせが有効であることを示した。

加速管の前にはバンチャーがあるが、ディスク間距離が一定ではないので周期的な構造を持たず、ASTRAによる進行波のシミュレーションが難しいことからバンチャー後のシミュレーションを行った。その為、バンチャー後に $\sigma_z = 5$ psを持っていると仮定をしたが、これがもし $\sigma_z = 3$ psだった場合を考えよう。Fig.4のような速度集群の組み合わせを位相スキャンにより求めてみると、最終的なバンチパラメータは、 $\sigma_z = 0.18$ ps, $E_k = 6.7$ MeV, $\Delta E/E = 7.2\%$, $B = 0.74$, $P_{\text{coherent}}/P_{\text{linear}} = 3.0 \times 10^8$ となった。バンチャー後のバンチ長が短くできると、バンチ因子が大きくなるだけでなく、エネルギー分散も比較的強く抑えられていることがわかる。実際にこのような好条件を実現するためにはバンチャーのシミュレーションと最適化が必要不可欠となるが、このためにはより詳細な計算ができるシミュレーションコードを用いる必要があり今後の課題とする。なお、電子銃や周期的なプリバンチャーについてはASTRAでの計算が可能である。

今回は速度集群による効果に着目したため3本目の加速管後までの結果を示したが、実際のLEBRAにおけるアンジュレーターは2つの45度偏向磁石後に設置さ

れている。2つの偏向磁石を粒子が通るときには、エネルギーが高い粒子は外径側のより長い経路を通り、低い粒子は内径側の短い経路を通る。速度集群が行われたバンチではエネルギー差が十分ついている状況となっているので、位相調整により偏向磁石入口におけるエネルギー分布を制御することで偏向磁石を用いたバンチ化も期待できる。その為、今後は速度集群と偏向磁石を組み合わせたバンチ化のシミュレーションも行っていく予定である。

結果からは、速度集群の効果が高いほどエネルギー分散が大きくなる。エネルギー分散が大きいとアンジュレーターにおいて得られる放射波長にばらつきが生じ、放射強度にも影響が現れる。バンチ因子の大きさも踏まえて、こういったバンチパラメータによりアンジュレーター放射が最適化されるかを知るには、自由電子レーザーのシミュレーションを行う必要がある。特に速度集群等によりバンチ長が短くなっており、時間依存したシミュレーションが必要となるので、GENESIS 1.3 [3] を利用した最適化を検討していく。

シミュレーションによる最適化に通じり目処が付いたら、実験への反映を行っていく。実際の実験においては様々な誤差が入ることから、シミュレーション結果の実現・確認のためにはプロファイルモニターの充実が欠かせない。現在のLEBRAにおいては運転中の放射線による影響から、スクリーンモニターやワイヤーモニター等のプロファイルモニターがあまりない状況にある。その為、可能な限り多くのビームモニターの設置を検討し、高輝度THz帯発振を実現する。

参考文献

- [1] S. Kashiwagi *et al.*, doi:10.18429/JACoW-IPAC2016-TUPOW009.
- [2] K. Floettmann, "Astra user manual, see <http://www.desy.de/~mpyflo/>," *Astra-dokumentation*.
- [3] S. Reiche, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, vol. 429, no. 1, pp. 243–248, 1999.