

日大共振器型 FEL における動的位相変調を用いた 完全同期長発振シミュレーション

SIMULATION OF ZERO-DETUNING OSCILLATION EXCITATION FROM DYNAMICAL PHASE MODULATION AT NIHON U. OSCILLATOR FEL

住友洋介*, 早川建, 早川恭史, 野上杏子, 境武志, 高橋由美子, 田中俊成

Yoske Sumitomo*, K. Hayakawa, Y. Hayakawa, K. Nogami, T. Sakai, Y. Takahashi, T. Tanaka
LEBRA, Institute of Quantum Science, Nihon University

Abstract

At the LEBRA facility, Nihon Univ., we provide a bright infra-red light at few mJ pulse energy in a variable range of wavelengths, that is generated by the oscillator FEL with the 20 μ s electron beam. The integrated oscillation excitation energy is enhanced when the resonator length is slightly desynchronized with the spacing between electron bunches. On the other hand, when the resonator length is perfectly synchronized, a higher peak power and a shorter pulse length are expected although a longer pulse electron beam is required to reach the saturation. In this presentation, we study the FEL oscillation excitation by simulation, starting from the desynchronization of resonator length, and switching to synchronization at a midpoint of the macro pulse. This can be realized by applying a phase modulation to the RF pulse accordingly. We expect a high oscillation excitation respecting the property of perfectly synchronized resonator length, even with the 20 μ s electron beam. We use the time-dependent 3D simulation code, GENESIS 1.3 to explore the condition for oscillator excitation with the dynamical phase modulation at the high charge operation mode of LEBRA-FEL.

1. 背景

日本大学電子線利用研究施設 (LEBRA) における共振器型 FEL では、20 μ s 程度のパルス幅の電子ビームを用いた発振により、パルスあたり数 mJ の可変波長赤外光を生成しユーザー利用に提供している。共振器型 FEL は、アンジュレーターを挟んで共振鏡があり、アンジュレーターで発生した光はこの共振器内に蓄積される。蓄積された光が後進の電子ビームと逐次的に相互作用を行うことにより、さらなる光生成を促し高強度の光を蓄積する飽和状態へと達する。初めは電子ビームのショットノイズから徐々に光を生成するが、ある程度の強度になってからは電子ビームのマイクロバンチ化が進行し、コヒーレント放射を誘発させることで蓄積光は指数関数的に増幅する。十分高強度となったところでは蓄積損失も大きくなり、利得と損失が釣り合うところで飽和状態となる。この為、蓄積光の高強度化には高い利得が必要となるが、利得は蓄積光と電子ビームとの相互作用の仕方により大きく影響を受ける。アンジュレーターを通過する電子は蛇行運動をすることから、生成される光に対して電子ビームにはスリッページと呼ばれる遅延が発生する。また、この遅延があることから、共振器長を電子バンチの間隔より若干短くしておくことにより、蓄積光と電子の相互作用を長い時間確保することができ、長い飽和時間から高い出力となる。このように、通常の LEBRA-FEL の運転では非同期長による発振が行われている。

実は利得のピーク値に関して言うのであれば、完全同期した状態の共振器長の方が高い利得となる。電子ビームと光パルスのコアの部分の相互作用による蓄積が優勢となることから、一つの電子バンチあたりの相互作用時間は短く、飽和状態にたどり着くためには多くの相互作用

用を持つための十分長いマクロパルス幅が必要となる。だが、発振状態にまでたどり着くことができれば、ピーク値が強いだけではなく、数サイクルとパルス幅の短い光を生成できる方法であることが報告されている [1,2]。

完全同期長発振を行うためには十分な相互作用を確保するための長いマクロパルスが必要となるが、これを解決するために非同期長から始めて、途中から完全同期長へと変更する方法も提案されている (例えば、[3,4] を参照)。この方法では、実際に共振器長自身を変更するわけではなく、RF の位相に途中から変調をかけることで電子バンチ間隔を調整し (動的位相変調)、共振器長にあうように調整する方法である。特に最近の報告では、細かな調整を行うことで 7 μ s 程度のマクロパルスでも完全同期長発振に特徴的である、高い変換効率の実現が可能となっている [4]。

本発表では、日本大学 LEBRA において、この動的位相変調を適用した場合での完全同期長発振の特性評価をシミュレーションにより行う。特に、高いピーク出力となるように、高電荷状態の運転であるバーストモードと呼ばれる運転状態に焦点を当てる。シミュレーションとしては、時間依存三次元シミュレーターの GENESIS 1.3 [5] (v. 3.2.2, 以下 GENESIS) を用いて、ガウス型の仮定はあるものの、電子バンチのパラメーターを考慮した現実に近い方法での発振条件の比較を行う。なお、過去には動的位相変調は考慮されていないが、低電荷での運転となるフルバンチモードにおける発振状態に関して、GENESIS を用いた計算と実験とを比較したこともあり、この結果からは悪くない精度での一致が見られている [6]。また、FEL シミュレーションに関連して、完全同期長発振のより精度の高いシミュレーションを行うために、GENESIS などで用いられている SVEA 法を用いない方法の提案も行われている [7]。

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

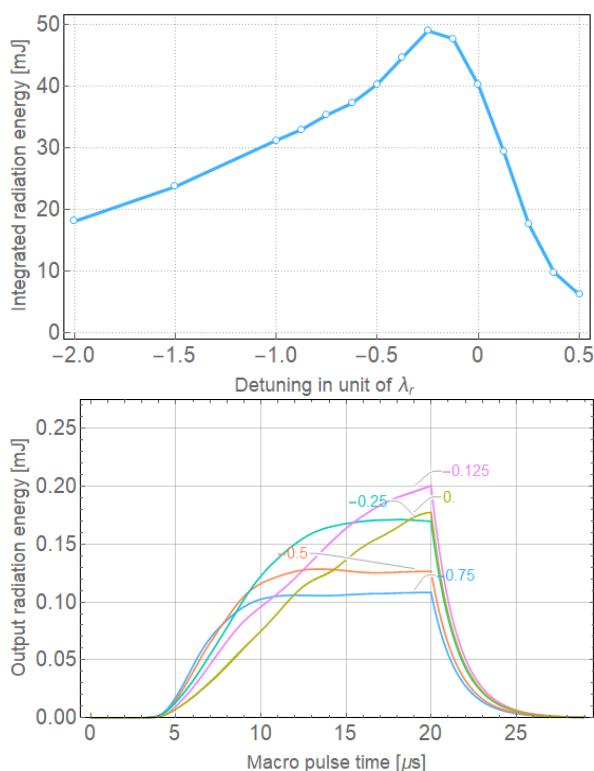


Figure 1: Detuning curve given the initial condition in Table 1. The assigned numbers in the bottom figure mean the detuning values in unit of the radiation wavelength.

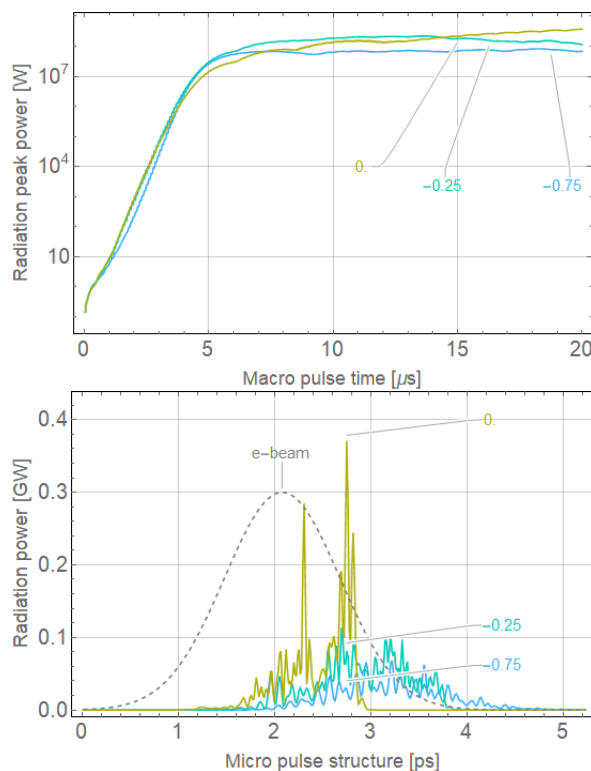


Figure 2: The upper figure illustrates the growth of oscillation excitation at some detuning points, while the bottom figure shows the profile of accumulated pulse. The grey dashed line displays the e-beam profile at an arbitrary unit.

2. DETUNING CURVE

まず、高電荷状態のバーストモードにおける発振状況を理解するため、動的位相変調を適用しない場合を考えよう。アンジュレーターや共振器のパラメーター、入口における電子バンチの初期条件としては以下のものを考える。

Table 1: A Set of Parameters for the Initial Condition at Undulator Entrance

K	λ_u	period	λ_r
2.02	48 mm	50	4020 nm
z_{Rayleigh}	z_{waist}	cavity loss	coupling
1.47 m	1.2 m	3%	1%
Q	E_k	$\Delta E/E$	
400 pC	68.4 MeV	1 %	
σ_z	$\sigma_{x,y}$	$\varepsilon_{n,x,y}$	
0.6 ps	0.5 mm	15π mrad mm	

LEBRA では DC 100 keV の熱電子銃で電子生成を行っており、エミッタンスは若干大きめの値を想定している。また、アンジュレーターは 45×2 度偏向部の後に設置されており、偏向部を用いてバンチ化を行っているため、エネルギー分散もさほど小さくない。これらの

パラメーターは過去の実験における値を尊重したものとなっているが、バンチ長や正確な電荷量は測られておらず不明な点であることから、後に他の値との比較を行う。発振波長 λ_r に関しては、時間非依存モードの GENESIS で波長のスキャンを行い、最大出力が得られる波長とした。共振器は二枚凹面鏡で鏡間距離 6.72 m、曲率 4 m、共振器損失は 3 % とし、ビームがアンジュレーター中心で最小径を取るものとなっている。蓄積された光は、凹面鏡にある結合孔から外部に光を 1% 取り出し、ユーザラインへと供給している。電子ビームは 64 個おきの RF 波で電子バンチが加速されており、つまり、共振器長からは共振器内では 2 つの光パルスが蓄積することになる。

GENESIS を用いたシミュレーションでは上記パラメーターをもとに計算を行い、アンジュレーター出口での電磁波データを用いて逐次的に計算を行っている。この電磁波データは複素場で与えられており、共振器内で蓄積されるガウスビームを考慮すると、複素共役をとることで発散波面から収束波面へとしたものをアンジュレーター入口から入射させる。ここで、パルスの先頭や終端に対して、ガウスビームにおける収束・発散性とは多少の違いが出るようになるが、パルス幅は Rayleigh 長に対して十分短く、その差は無視できるものとした。

初期条件として Table 1 を用いて GENESIS でシミュレーションした結果を Fig. 1 に示す。ここで、上図の横軸は共振器長の同期長からのずれ dL を、縦軸は共振器外に取り出された放射エネルギーの積分値を表してい

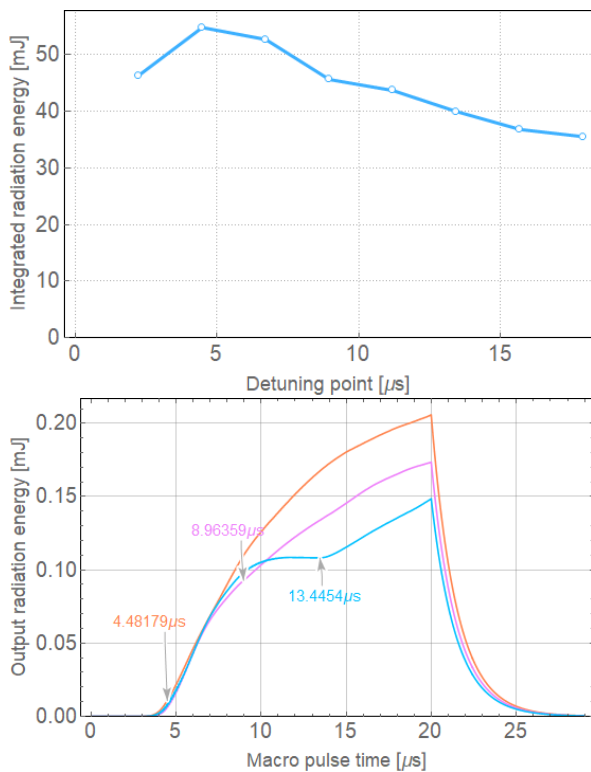


Figure 3: The achieved energy from dynamical detuning $dL = -0.75\lambda_r \rightarrow 0$. The each arrow point in the bottom figure shows the point to apply the modulation.

る。下図では、マクロパルスに対する蓄積エネルギーの振る舞いを示しており、ある程度同期長からずれがある方が飽和状態に早く到達し、全体の積分値を稼ぐことができることがわかる。これらの振る舞いは共振器型 FEL でよく知られた状況を再現しており、シミュレーションの妥当性を見ることができる。Figure 2 では、上記状況のうち、 $dL = 0, -0.25\lambda_r, -0.75\lambda_r$ の時の蓄積状況 (上図) と蓄積された光パルス波形 (下図) を、取り出し出力を縦軸として描いたものである。完全同期長発振の場合では、 $20 \mu\text{s}$ でもまだ飽和には達していないが、短パルス・高ピーク出力の波形となっている。この状況では 400 pC と比較的高い電荷の電子バンチであることから成長が見受けられているが、低電荷の場合ではより長いマクロパルスが必要となる。

では、異なる初期条件ではどうなるであろうか。例えば、同じ $Q = 400 \text{ pC}$ でも、バンチ長が $\sigma_z = 0.3 \text{ ps}$ と短い場合は、 $dL = -0.125\lambda_r$ の場合においても飽和に達することができ、積分エネルギーで 100 mJ を超える蓄積が得られる。ピーク出力では完全同期長のときが最大となり、取り出し出力で 1.5 GW に達する短パルスを得ることができる。

他に、 $Q = 700 \text{ pC}$ 、 $\sigma_z = 0.6 \text{ ps}$ の場合においては、 $dL = -0.5\lambda_r$ の状態でもまだ飽和状態に達していないものの、高電荷の影響で $dL = -0.125\lambda_r$ では積分エネルギーで 130 mJ にまで到達する。また、エネルギー分散やエミッタンスが改善されると発振状況も大幅に改善を受けることになる。本発表では現状の LEBRA の運転

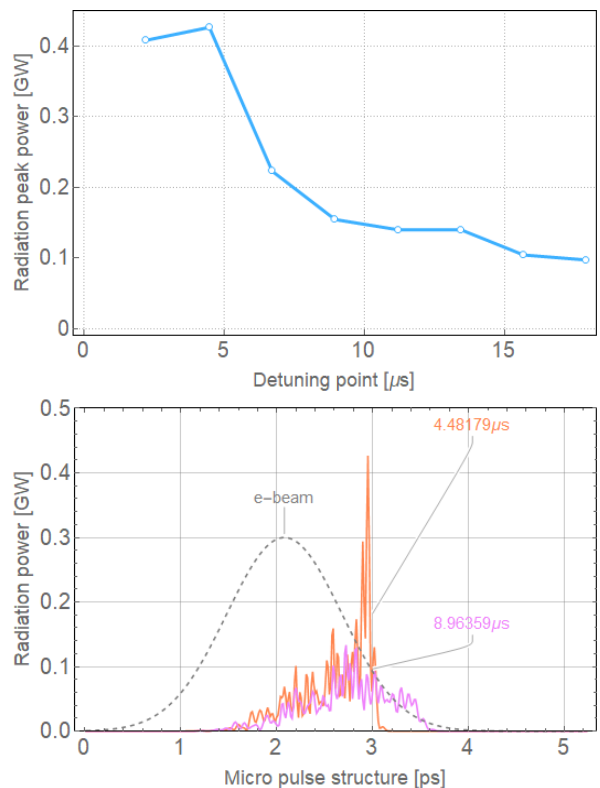


Figure 4: The peak power and resultant profile given each modulation point.

状況に対する動的位相変調の効果を見積もるため、次節では Table 1 の初期条件に対して動的位相変調を適用した結果を示す。

3. 動的位相変調による完全同期長発振

この節では動的位相変調を適用した場合を考える。マクロパルスの途中から RF の位相に変調を加え、電子バンチ間隔を共振器長に合うように変更を加えるのであるが、途中のどの点から変調を加えるかによって影響が変わってくる。Figure 1 下図を見ると、 $dL = -0.75\lambda_r$ の点で比較的早くに飽和に達しているため、この非同同期長での発振に対して動的位相変調を適用してみよう。

Figure 3 上図では、それぞれの変調を加えた点に対する外部へと取り出した積分エネルギー値を示してある。下図では、それぞれの変調適用点とエネルギーの蓄積具合の関係を描いてある。これらからは、発振が飽和に達する少し前から変調を加え、完全同期状態にするとより多くのエネルギーを蓄積できることがわかる。Figure 1 と比較してみると、単純に非同同期長により得られる積分エネルギーよりも、動的位相変調を用いた場合のほうが若干であるがエネルギーを蓄積することができている。これは、完全同期長状態では利得が大きくなるので、発振の飽和状態から更に積み増すことができるからであると考えられる。また、Fig. 4 では、光パルスにおける最終蓄積出力のピーク値を比較してある。前節で見たとおり、完全同期長になる時間がより長い状況のほうがピーク値が成長する傾向にある。例えば、下図において $4.48 \mu\text{s}$ の点から変調を加えたものはピーク値の成長が見

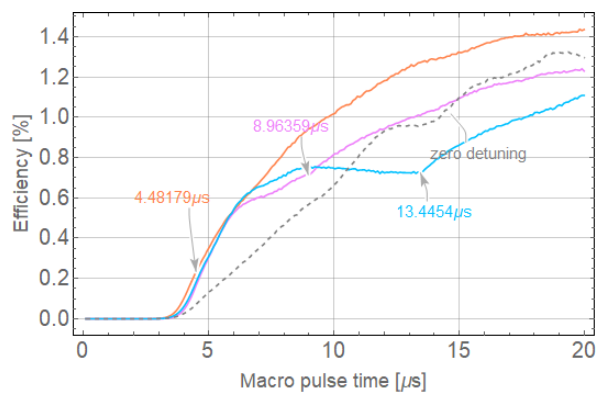


Figure 5: The efficiency growth given each modulation point. The efficiency at $dL = 0$ is also shown for comparison.

て取れるが、非同期長の時のパルス幅の名残があり鋭いピークとまではなっていない。

電子ビームは相互作用することにより光電磁場によりマイクロバンチ化が引き起こされ、より多くのエネルギーが光へと変換される。この変換効率の進展具合をそれぞれの変調点に対して示したものが Fig. 5 である。ここでは、それぞれの動的位相変調の場合に加えて、完全同期長で発振を行った場合も比較のために示してある。非同期長 $dL = -0.75\lambda_r$ のままでは 1% にも満たない効率であるが、動的位相変調を加えた点から徐々に向上を始めているのがわかる。特に、 $4.48\mu\text{s}$ からの変調に関しては、 $20\mu\text{s}$ に到達した際に完全同期長を超える効率を示しており、動的位相変調が有効であることを示している。なお、ここでの変換効率は、GENESIS 出力のうち電子ビームエネルギー損失が計算スライス毎の平均値を出しているものだととして算出していることに留意いただきたい。

Figure 3, 4, 5 では、 $dL = -0.75\lambda_r$ から完全同期長への動的位相変調の結果を示した。この他に異なる非同期長から始める事も考えられる。例えば、 $dL = -0.5\lambda_r$ では、相互作用が若干減る分飽和に達する時間は遅くなるが、利得は大きくなる。この場合においては変調を加える点を若干遅くすることで最適化を図ることができ、結果的に $dL = -0.75\lambda_r$ の場合と同等の積分エネルギーや効率を得ることが出来る。ただ、完全同期長となるタイミングが遅くなることから、光パルスのピーク出力は若干減少する。このように、ピーク出力を除けば、他の非同期長から始めた場合においても最適なタイミングで変調を加えることにより、積分エネルギーや変換効率の増加が期待できる。

動的位相変調においても、パラメーターが Table 1 と異なれば状況が変わる。まずは、バンチ長が短い場合として、 $Q = 400 \text{ pC}$, $\sigma_z = 0.3 \text{ ps}$ を考えてみよう。この場合は同期長に近い状態においても $20\mu\text{s}$ の間に飽和状態に達することができており、積分エネルギーなら $dL = -0.375\lambda_r$ から始まり、 $4.48\mu\text{s}$ の点に変調をかけたもので 117 mJ と高い値となっている。ピーク出力なら、 $dL = -0.25\lambda_r$ に $2.24\mu\text{s}$ の点での変調を行うと、ピーク出力 2.57 GW で変換効率は 2.57% に達するものとなっている。完全同期長発振のみの場合だと、変換効

率は同程度まで発展するが、飽和状態には到達することができず、ピーク出力で 1.5 GW 程度であるので、バンチ長が短くなると動的位相変調による効果が大幅に向上すると言えるだろう。

次に、電荷の高い場合の $Q = 700 \text{ pC}$, $\sigma_z = 0.6 \text{ ps}$ を考える。高電荷の影響により積分エネルギーは高く、 $dL = -0.375\lambda_r$ に $6.72\mu\text{s}$ の点に変調をかけたものでは 147 mJ までの蓄積が見られた。一方ピーク出力の方はさほど伸びず、 $dL = -0.25\lambda_r$ に $4.48\mu\text{s}$ での変調で、 0.993 GW で変換効率は 2.06% である。ちなみに完全同期長発振のみでは、 0.6 GW , 2.0% 程度となっている。以上をまとめると、積分エネルギーに関しては高電荷による効果が期待でき、ピーク出力に関しては短バンチ化による影響が大きく現れている。ピーク出力に関しては、コア同士の相互作用が重要となるので、コア部に集中させるような短いバンチ長のほうが有利であるということだろう。

4. 議論と展望

日大 LEBRA のバーストモード (高電荷モード) での共振器型 FEL に動的位相変調を適用した発振状況について GENESIS を用いたシミュレーションで評価を行った。 $Q = 400 \text{ pC}$ でバンチ長 $\sigma_z = 0.6 \text{ ps}$ を仮定した結果から、動的位相変調を適用した場合には効率向上が見られ、積分エネルギー、ピーク出力共に増加を見ることができた。その効果のうち、特にピーク出力に対してはバンチ長が短くなることで大幅な向上が期待できる。全体の特性としては、完全同期長での発振によりピーク出力の向上と短パルス化が引き起こるので、日大 FEL のようにマクロパルス幅に制限があるような状況では、早い段階で十分な強度で発振を起こし、そこから位相変調で完全同期長へと持っていくことが高強度短パルス光を生成する上では重要となる。

日大 LEBRA においては、現在のところ FEL 用のアンジュレーターに減磁が確認されており、本来の性能を発揮できていない状況にある。その為、今回シミュレーションで得られた結果を実験で再現するためには、磁石列の復活が欠かせない。近いうちこの修繕を行い、実験との比較、更には現状測られていない変換効率の測定も行っていければと考えている。

参考文献

- [1] N. Nishimori *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, 86, 5707 (2001).
- [2] R. Hajima and R. Nagai, *Phys. Rev. Lett.*, 91, 024801 (2003).
- [3] K. Hayakawa *et al.*, FEL2005, THPP008 (2005).
- [4] H. Zen *et al.*, 日本原子力学会 2018 年春の年会.
- [5] S. Reiche, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, vol. 429, no. 1, pp. 243–248, 1999.
- [6] Y. Hayakawa *et al.*, 第 1 回日本加速器学会年会, 5P75 (2004).
- [7] R. Hajima and R. Nagai, 第 14 回日本加速器学会年会, WEP019 (2017).