

Study on the Bunch Compression by Use of the Wake Field

Kobayashi H., Kato R. and Isoyama G.

Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University
8-1 Mihogaoka, Ibaraki, Osaka 567, Japan.

ABSTRACT

In order to compress an electron bunch most effectively by use of the path difference in the magnetic field, a bunch shape has been derived numerically which gives the linear dependence of the electron energy with time by taking advantage of the wake field in the acceleration structure. It is shown that such a bunch can be compressed to a bunch much shorter than that obtained with Gaussian bunch having a non-linear correlation between the electron energy and time.

ウエーク場を利用したバンチ圧縮の研究

1.はじめに

現在、計画・建設されている電子加速器の多くは電子ビームの高輝度化や短バンチ化を目指している。また、磁場中を通過するときの航路差を利用したバンチの圧縮による短いバンチの発生の研究も盛んに行われている。

大阪大学産業科学研究所のLバンド電子ライナックは、3台のサブハーモニックプリバンチャー(SHPB)からなる入射器系を持ち、1バンチあたりの電荷量が世界でも最高レベルの電子ビームを加速することができる。バンチ内の電子数が多く、バンチ長が短い電子ビームを加速するRF加速電場は電子バンチ自身が加速管に誘起するウエーク場により、正弦波と異なる形状になる。大電流の加速器ではこのウエーク場の影響を避けることができない。しかし、ウエーク場を利用すれば、磁場中の航路差を利用するバンチ圧縮で用いられるようなエネルギー変調用の加速管なしにバンチ内のエネルギーと時間の相関を線形にすることができ、磁場中を通過するときの航路差を利用したバンチ圧縮を効果的に行うことができると考えられる。

この報告では、バンチ自身が誘起するウエーク場と加速電場を重ね合わせたときに、エネルギーと時間の相関が線形になるようなバンチ形状を求めた。また、重ね合わせた電場がバンチ内にエネルギー差を生みだし、それによりバンチがどのくらい圧縮できるかをシミュレーションを用い

て考察する。

2.バンチ内の電荷分布

ウエーク場を利用し、エネルギー分散を計算上最小にすることができるバンチ内の電荷分布はすでに報告されている。ウエーク場を用いてエネルギーと時間の相関を線形にできるバンチ形状は以下の方法で求めることができる。

最大加速勾配 E_0 のマイクロ波で距離 L にわたり加速される一個の電子が得るエネルギーは、加速位相が θ_1 の時、

$$V = E_0 L \cos \theta_1 \quad (1)$$

で与えられる。

加速管全体でのウエーク関数を W_L 、バンチ内の電荷分布を $f(\theta')$ とおく。式(1)をウエーク場を含むように拡張すると次式を得る。

$$V(\theta_1) = E_0 L \cos \theta_1 - \int_0^{\theta_0 - \theta_1} f(\theta') W_L(\theta_0 - \theta_1 - \theta') d\theta' \quad (2)$$

ここで θ_0 はバンチの先頭部の位相である。

バンチ内で、エネルギーと時間の相関が線形になるためには、以下の関係式を満たす必要がある。

$$\frac{\partial V(\theta_1)}{\partial \theta_1} = K \quad (3)$$

ここで、Kはバンチ内の電子が得るエネルギーと時間との相関関係から決まる定数である。

式(2)を θ_1 で偏微分し、式(3)の条件を使い、 $\theta_0 - \theta_1 = x$ とおくと電荷分布 $f(x)$ が得られる。

$$f(x) = \frac{K}{W_L(0)} + \frac{V_0}{W_L(0)} \sin(\theta_0 - x) - \int_0^x \frac{\partial W_L}{\partial x}(x - \theta') f(\theta') d\theta' \quad (4)$$

産研Lバンドライナックのウエーク関数は0~50psの時間の範囲で以下のように近似できる²⁾。

$$\omega(\tau) = A \cdot \exp\left[-\left(\frac{\tau}{B}\right)^n\right] \quad (5)$$

ここで、 $A=46.8V/pC/m$ 、 $B=13.5ps$ 、 $n=0.605$ である。産研Lバンドライナックにおいて、ウエーク場の作用によりバンチ先頭のエネルギーが高く、電子エネルギーが位相と共に線形に変化するバンチが得られるバンチ形状を図1と2に示す。

この場合、バンチ内のエネルギー勾配を大きくとるときは、ピーク電流は高くなる。

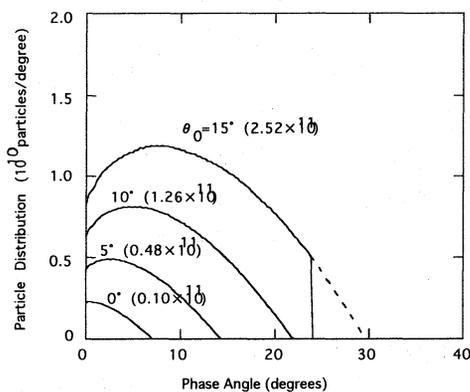


図1 加速電場の勾配を-0.017MV/degree/mにするバンチ形状
波線はウエーク関数が50ps以上の時間でも(5)のようになるときのバンチ形状 カッコ内は粒子数

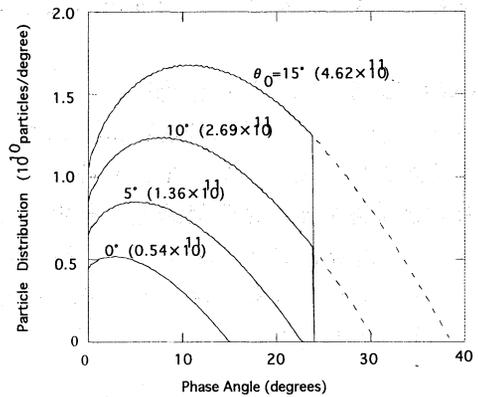


図2 加速電場の勾配を-0.033MV/degree/mにするバンチ形状

次に、バンチの先頭が低いエネルギーになる場合を図3と4に示す。

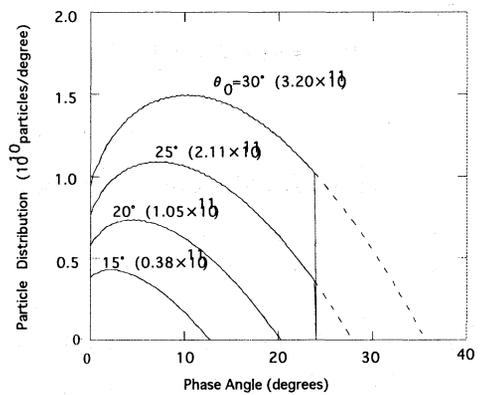


図3 加速電場の勾配を0.017MV/degree/mにするバンチ形状

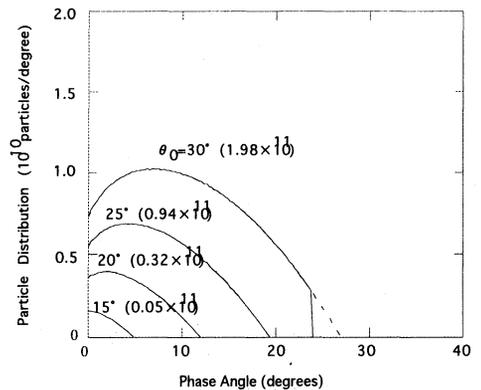


図4 加速電場の勾配を0.033MV/degree/mにするバンチ形状

バンチ先頭が高いエネルギーになる場合よりも、

バンチをより前方に乗せなければ電荷量を大きくすることはできない。また、バンチ内のエネルギー勾配を大きくすると、ピーク電流は低くなる。

3. 計算によるバンチの圧縮

産研Lバンドライナック（加速管3m）において、前方が後方よりも高いエネルギーを持つバンチを磁場中を通過するときの航路差を利用して圧縮することを計算により試みる。この場合、45° 偏向マグネットを2つ組み合わせて90° 偏向するモデルを考える（図5）。

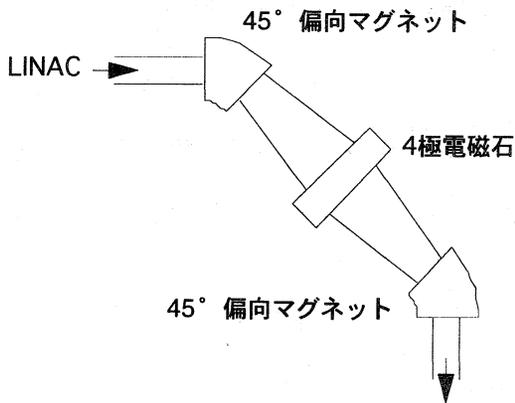


図5 バンチ圧縮計算に用いた90° 偏向するモデル

加速電場の同位相に乗る電子のエネルギー拡がりはないものとした。また、電子同士の空間電荷効果は無視した。この時のバンチ内の電荷分布は、図2のバンチの先頭を位相5° の位置に乗せたもの（全幅約50ps=約15mm）を用いた。90° 偏向後のバンチ形状を図6に示す。

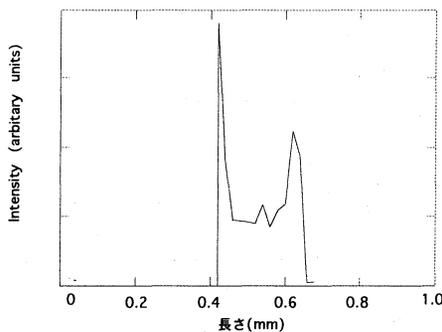


図6 圧縮後のバンチ形状

圧縮する前には、約50ps（15mm）あったものが、約0.8ps（0.25mm）にまで圧縮されている。

ライナックで加速されるバンチ形状は、普通、ガウス分布に近いので、今、図5の場合と同じ電荷量を持ち、半値幅が30psで全幅が60psバンチを考え、先頭を位相5° に乗せ、同じように圧縮した場合を図7に示す。

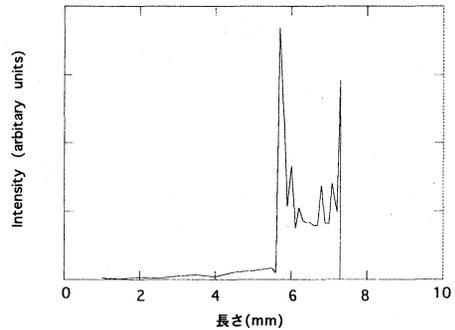


図7 電荷分布をガウス分布としたときに圧縮したバンチ形状

電荷分布がガウス分布と仮定した場合、バンチの大部分だけを考えても約5ps（1.5mm）ほどまでしか圧縮されない。

4. まとめ

ウエーク場を利用することでバンチ内のエネルギーと時間の相関が線形になるバンチ形状を求めた。バンチの先頭が高いエネルギーになる場合、バンチ内のエネルギー勾配を大きくとるときはピーク電流が高くなる。反対に、バンチの先頭が低いエネルギーになるときは、バンチ内のエネルギー勾配を大きくとると、ピーク電流は低くなる。バンチ圧縮において、エネルギーと時間の相関が線形であるバンチを圧縮した場合は、通常のガウス型のバンチを加速した場合に得られる非線形な相関を持つバンチを圧縮する場合に比べ、はるかに短いバンチが得られる。

参考文献

- 1) G. A. Loew and J. W. Wang, IEEE Trans. on Nucl. Sci. **NS-30**(1985) p.3228-3230.
- 2) S. Takeda, N. Kimura, K. Tsumori and M. Kawanishi, Proc. 5th Symposium on Accelerator Science and Technology, KEK (Sep. 1984) p.80.