

コヒーレント遷移放射を用いたバンチ間距離の精密測定

高橋 俊晴^{1,A)}、松山 奉史^{A)}、柴田 行男^{B)}、伊師 君弘^{B)}

^{A)} 京都大学原子炉実験所

〒590-0451 大阪府泉南郡熊取町野田1010

^{B)} 東北大学多元物質科学研究所

〒980-8577 宮城県仙台市青葉区片平2-1-1

概要

短バンチ電子ビームから放射されるコヒーレントな放射を用いたビーム診断法が、精密なバンチ形状計測において非常に有用であることは既の実証されている。今回新たに、バンチ間距離の高分解測定法を開発した。コヒーレントな放射は、各バンチからの波束どうしで可干渉性を有しており、干渉計を通して観測する場合、インターフェログラム上には自己相関図形に加えて相互相関図形が現れ、両者の間隔がバンチ間距離に相当する。4 μ secのマクロパルスを200 nsecごとの微小領域に区切って測定した結果、マクロパルス中の位置により最大60 fsecのバンチ間隔のゆらぎを観測した。これは加速周波数から求まるバンチ間隔770 psecに対して0.01%の分解能に相当する。

1. 序論

短バンチ電子ビームを用いたコヒーレント放射光が、1989年に東北大核理研ライナックで初めて観測されて以来^[1]、様々なタイプのコヒーレントな放射（遷移放射、回折放射、スミス・パーセル放射、チェレンコフ放射）の基礎的性質が実験的に解明されてきた^[2]。それらの研究の中で、コヒーレントな放射が新たな分光光源として有用であるばかりでなく、新しいビーム診断法として非常に役に立つことが明らかになった。例えば、コヒーレント放射光やコヒーレント遷移放射のスペクトル分布から、電子の軌道方向の電子分布を高い分解能で求めることができるし、コヒーレント遷移放射の発散角の分布を測定することにより、電子ビームのエミッタンスを求めることができる^[3]。

現在我々の研究グループが開発研究をしている、コヒーレントな放射を種としたマイクロバンチ自由電子レーザー^[4]では、元になるコヒーレント放射の波束の周期性、つまりバンチ間隔の精密さが重要となる。本研究では、コヒーレント遷移放射をフーリエ変換干渉分光計で測定することにより、各バンチから放射される波束の間隔、つまりバンチ間の距離を高い精度で決定する手法を新たに開発した。

2. 原理

マルチバンチ電子ビームからのコヒーレントな放

射は、各バンチから放射される光の波束どうしでも可干渉性を有することが明らかになっている^[5]。図1は京大原子炉ライナックにおける電子ビームの時間構造を示している。各バンチは加速周波数のLバンドに対応する770 psecの間隔で並んでおり、各バンチからの波束もこの時間間隔で干渉計に入射する。これを、マイケルソン型あるいはマーチン・パレット型の干渉計で観測する場合（例えば図4に示すような干渉計）、移動鏡側と固定鏡側の光路差が0の付近では、あるバンチからの光の波束自身による干渉を表す自己相関図形 (auto-correlation interferogram) が得られる。次に、光路差をバンチ間隔に等しい23 cmとした場合には、あるバンチからの波束と、ひとつ後のバンチからの波束との間の

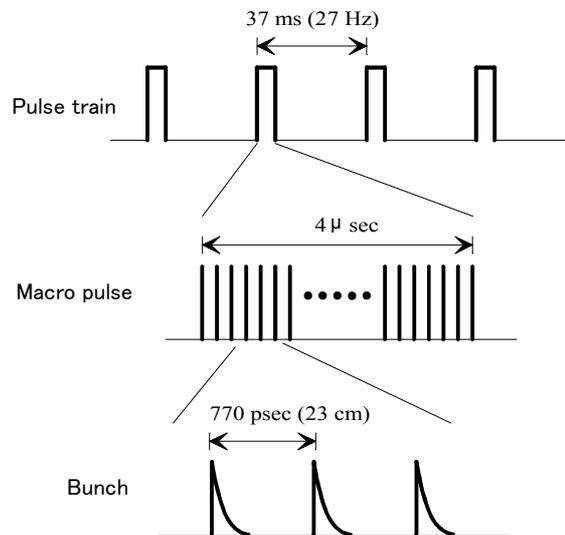


図1：電子ビームの時間構造。

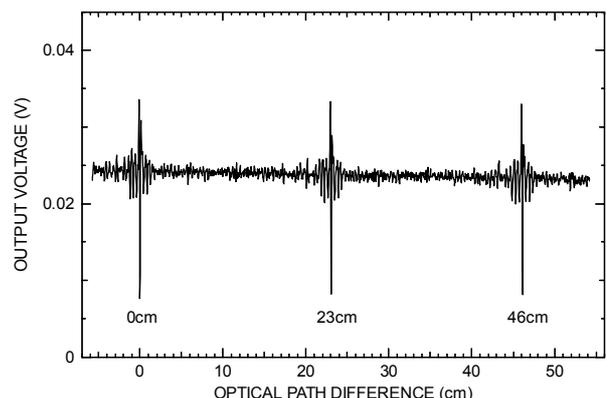


図2：バンチ間干渉を示すインターフェログラム。

¹ E-mail: takahasi@rri.kyoto-u.ac.jp

干渉による相互相関図形 (cross-correlation interferogram) が現れる。以前、京大原子炉電子ライナックで測定されたバンチ間干渉の結果を図2に示す^[6]。光路差0 cm、23 cm、46 cmの付近に等しい形状をした干渉図形が現れており、確かに各バンチからの波束どうして可干渉性を有していることがわかる。

つまり、自己相関図形と相互相関図形の間隔を測定することによって、バンチ間の距離が求まることになる。

3. 実験方法

実験は京都大学原子炉実験所のLバンド電子ライナックを用いて行われた。図3に実験装置の概要を示す。遷移放射の放射源(S)にはびんと張ったアルミ箔を用い、ライナック先端の高真空中に設置した。高エネルギー電子がこのアルミ箔を通過するときに発生する後方遷移放射が、真空窓W1(50 μm厚カプトン)を通して加速器本体室から実験室に導かれる。球面鏡M2の受光角は75 mrad (f数13.3)であり、M2とM3の間は直径150 mmの平行光束で送られる。

ライナックはマクロパルス幅4 μsecの定常モードで運転され、エネルギー33 MeV、繰り返し27 Hz、平均ビーム電流57 μAであった。

図4にフーリエ変換干渉分光計の詳細を示す。ビームスプリッターとして、直径10 μmのタングステン線を25 μm間隔に並べたワイヤーグリッドを2枚使用した、手作りのマーチン・パレット型の偏光干渉分光計である。移動鏡MF3は光路差55 cmまでとることができる。移動鏡の送りにはステッピングモーターが用いられており、最小移動量すなわち1パルスあたりの移動量は5 μm、光路長にして10 μmである。固定鏡MF4は通常、ビーム

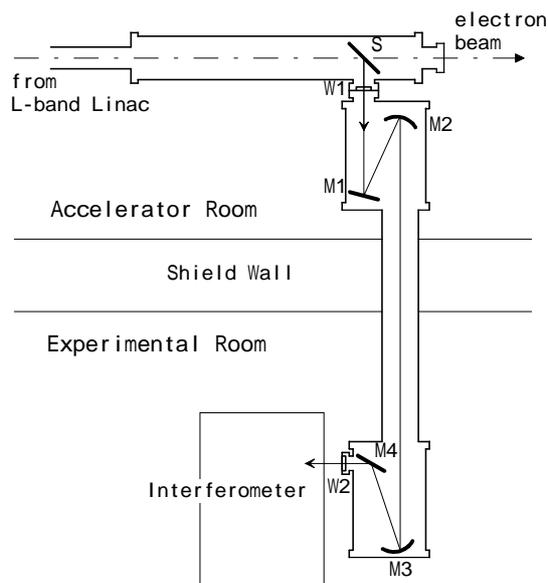


図3：実験装置の模式図。S:アルミ箔、W1:真空窓(50 μm厚カプトン)、M1,M4:平面鏡、M2,M3:球面鏡、W2:真空窓(0.3mm厚ポリエチレン)。

スプリッターに近い位置に置かれているが、今回の実験ではわずかなバンチ間隔のずれを観測するために、20個離れたバンチとの間の間隔を測定できるように、通常の固定鏡位置から2.3 m(光路差では4.6 m)離れた位置MF4'に固定鏡を設置した。これにより、あるバンチと、そこから21個目のバンチとの間の可干渉性を測定し、相互相関インターフェログラムを得ることができる。

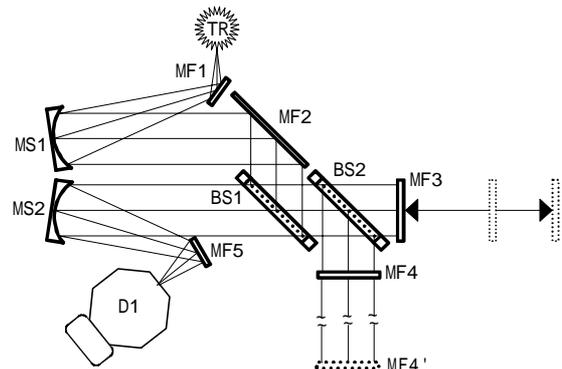


図4：フーリエ干渉分光計の模式図。MF1,MF2,MF5:平面鏡、MF3:移動鏡、MF4,MF4':固定鏡、BS1,BS2:ワイヤーグリッドビームスプリッター、MS1,MS2:球面鏡、D1:InSbホットエレクトロンボロメータ

干渉計を通った光はInSbホットエレクトロンボロメータで検出された。この検出器の応答速度は約350 nsecであり、4 μsecの電子ビームのマクロパルス幅よりも速い。検出器からの出力は、ボックスカー積分器(高速ゲート積分器)を通すことにより、あるゲート幅の部分だけをサンプリングして取り出すことが可能である。図5に、電子ビームのパルス波形、検出器の出力波形、ボックスカー積分器のゲート波形を示す。電子ビームのマクロパルスはCurrent Transformer (CT)で測定した。ボックスカー積分器のゲート幅は200 nsecに固定し、4 μsecのマクロパルス幅にわたってスキャンした。

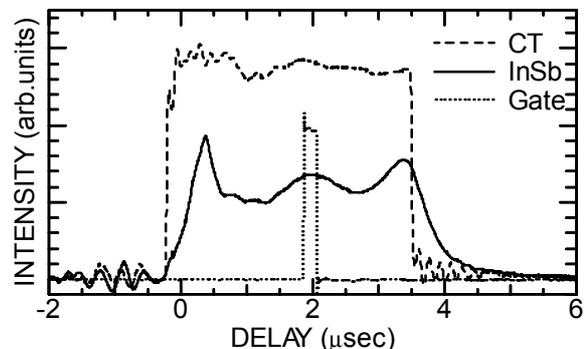


図5：パルス波形。実線：検出器の出力波形、破線：電子ビームのマクロパルス、点線：ボックスカー積分器のゲート波形。

4. 実験結果

固定鏡を通常的位置から2.3 m 離れたMF4'に置き4.6 m の光路差をつけ、21番目のバンチから放射される波束との間の干渉をとったインターフェログラムを図6に示す。図中のdelayの数値は、4 μ secのマクロパルスのうちどの部分を測定したかを表している。固定鏡を μ m のオーダーまで厳密に設置することは行わなかったため、横軸の光路差は相対値のみが意味を持つ。この図を見てわかるように、あるバンチとそこから21番目のバンチからの波束が全く重なり合う位置、つまり干渉図形の最小となる位置は、マクロパルス中で場所によって異なっている。すなわち、マクロパルス中の場所によってバンチ間隔が異なっているという結果を示している。なお、固定鏡MF4を通常的位置に置いたときの自己相関インターフェログラムでは、このようなずれは観測されなかったため、ステッピングモーターの送り誤差によるものではない。

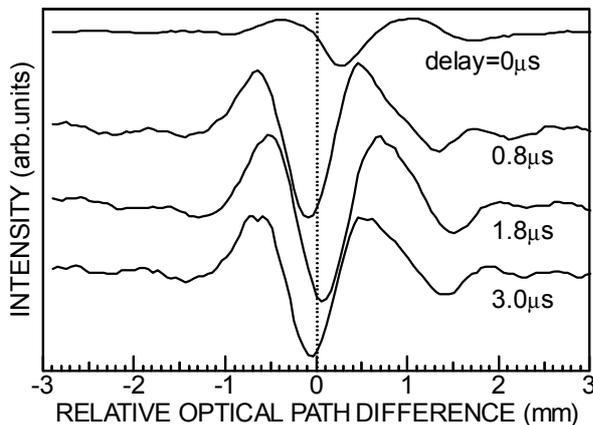


図6：21番目のバンチとの間の相互相関インターフェログラム。Delayの数値はマクロパルス中のゲートの位置を示す。

図6はいくつかの代表的なdelay位置でのインターフェログラムを示したが、4 μ secのマクロパルス全体にわたり、200 nsecのゲート幅で200 nsecごとにインターフェログラムを測定した。結果をまとめたのが図7である。横軸はマクロパルス中の位置、縦軸は、インターフェログラムが最小になる光路差を相対値で示している。今回の実験配置では、縦軸の数値が大きいほどバンチ間隔が短く、数値が小さいほどバンチ間隔が長いということを意味する。バンチ間隔のずれは約2 μ secの周期で振動しており、マクロパルスの最初の部分で特にバンチ間隔のずれが大きく、バンチ間隔が短くなっていることがわかる。マクロパルス中で最も短い時と最も長い時の差は約0.36 mmであり、これは20バンチ分離れた距離のずれであるから、実際のバンチ間隔のずれに換算するとその20分の1、つまり18 μ m、時間にし

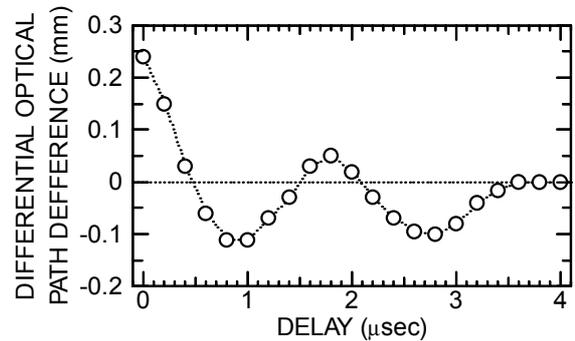


図7：マクロパルス中のバンチ間隔のゆらぎ。縦軸はバンチ間隔20個分の距離のずれであり、数値が大きいほどバンチ間隔が短い。

て60 fsecのバンチ間隔のゆらぎを観測したことになる。加速周波数の1.3 GHzで決まるバンチ間隔は770 psecであるので、今回測定されたバンチ間隔のずれの量は0.01%に相当し、非常に高分解能であることがわかる。

5. 結論

本研究では、コヒーレント遷移放射、フーリエ変換干渉分光計、高速検出器、ボックスカー積分器の組み合わせを用いて、バンチ間隔を精密に測定する手法を開発した。これにより、コヒーレント遷移放射を用いることで、バンチ内の電子分布、電子ビームのエミッタンス、バンチ間隔などの情報を総合的に解析できるようになった。コヒーレントな放射は、ビーム診断において高分解能の解析を可能にする強力なツールである。

参考文献

- [1] T.Nakazato, et al., "Observation of coherent synchrotron radiation", Phys. Rev. Lett. **63**, 1245 (1989).
- [2] コヒーレントな放射の総合的な解説としては、池澤幹彦, 日本物理学会誌 **49**, 208 (1994)、同 **53**, 842 (1998)などがある。
- [3] Y. Shibata, et al., "Diagnostics of electron beam of a linear accelerator by coherent transition radiation", Phys. Rev. E **50**, 1479 (1994).
- [4] Y. Shibata, et al., "Broadband free electron laser by the use of prebunched electron beam", Phys. Rev. Lett. **78**, 2740 (1997).
- [5] Y. Shibata, et al., "Observation of Interference between Coherent Synchrotron Radiation from Periodic Bunches", Phys. Rev. A **44**, R3445 (1991).
- [6] T. Takahashi, et al., "Utilization of coherent transition radiation from a linear accelerator as a source of millimeter-wave spectroscopy", Rev. Sci. Instrum. **69**, 3770 (1998).