

SACLA の高速差動 CT システムの非線形応答の抑制

SUPPRESSION OF NONLINEAR-RESPONSE IN DIFFERENTIAL-CT SYSTEM FOR SACLA

松原伸一^{#,A)}, 前坂比呂和^{B)}, 大島隆^{B)}, 安積隆夫^{B)}, 大竹雄次^{B)}
Shinichi Matsubara^{#,A)}, Hirokazu Maesaka^{B)}, Takashi Ohshima^{B)}, Takao Asaka^{B)} and Yuji Otake^{B)}

^{A)} Japan Synchrotron Radiation Research Institute

^{B)} RIKEN SPring-8 Center

Abstract

A differential current-transformer (CT) system was developed to measure an electron charge without substantial noise coming from a klystron power source in the x-ray free electron laser, SACLA. At a place downstream of the third bunch-compressor (BC3) in SACLA, nonlinearity was found in a measured electron-charge value with the differential-CT system. The reason for this uncertainty was confirmed to be the nonlinear response of a preamplifier in the CT system due to a short pulse duration of 400 ps. Therefore, a 15 dB attenuator or a 30m-long coaxial cable as a low pass filter was inserted before the preamplifier input. The linearity of the differential-CT system was improved to be about 10% for the attenuator case, which is an allowable error in the operation monitoring of SACLA. The linearity for the coaxial cable case was 4%, which is sufficient accuracy to estimate the accelerated electron-charge.

1. はじめに

X線自由電子レーザー (XFEL) 施設 SACLA^[1] のために、クライストロンなどからのノイズを抑制しつつ電荷量をモニターする高速差動 Current Transformer (CT) システムを開発した^[2]。そして、SACLA の加速器に沿って、30 台の CT システムが設置され、電子銃からの出射から、ビームダンプへの入射までの電荷量のモニターを既に 3 年以上行っている。CT の設置箇所を Figure 1 に示す。

マシンの調整、確認に用いる常時電流モニターとして、10%程度の精度を設定した。これは、SASE-XFEL には自然変動があり、SACLA では 10% rms 程度の電子ビームふらつきを許容して設計されているからである^[3]。また、XFEL を発振させてゲイン長などの自己増幅の特性を推定するためには、アンジュレータに入射する電子ビームのピーク電流 (目標 3kA 以上) を正確にモニターする必要あり、5% 以内の測定精度が求められる。

更にこの差動 CT を用いて、加速器上流部におけるバンチ長、ビーム到達時間の測定も目指している。SACLA では、熱電子銃からの電子ビームはビームチョッパーによって 1 ns に切り出され、入射部における速度変調バンチングと 3 段によるシケイン・バンチコンプレッサー (BC1-3) により数 10 fs まで圧縮される。同時に分散部スリットなどにより不要な電荷が削られ、電荷量は 1 nC から 0.3 nC 程度に削減される。ここで特に、入射部の僅かなバンチ長やピーク電流の変動が、X 線レーザー発振の特性に大きく影響を与える。このため、利用運転において

は非破壊で入射部の初期バンチ長とピーク電流を常にモニターすることが重要であった。そのため、差動 CT は高速な信号を出力できるようにした。

しかしながら、SACLA の運転が開始されて、測定する電荷量が、この CT システム毎で 20%以上異なり、正確に測定できていないことが疑われた。この問題は、SACLA のバンチ長が数 10 fs に圧縮される最終段の BC3 の下流で現れた。

そこで、この問題に対して対策を行った。本稿において、問題の詳細、対策、結果について報告する。

2. 差動 CT システムの概要と問題

2.1 差動 CT の構成

SACLA の高速差動 CT を SACLA へ設置した様子を Figure 2 に示す。本 CT には、高周波でも使うことのできるファインメットコアを用いている。このフェライトコアに、4 つのピックアップコイルを一巻きして、4 つの信号を出力する。4 つの出力ポートは、ビーム軸を中心に左右と上下に対向するように配置をし、それぞれが対をなす (Figure 3 参照)。この 2 対のポート内で、それぞれの出力信号が正と負の信号を出力されるようにしている。この符号の違う対の信号で差動信号を形成している。

この CT 本体から出力される信号は、2 段の増幅回路を通して、VME の波形記憶 AD ボード (238MSPS) によって読み取られる。差動 CT システムの構成を Figure 3 に示す。CT からの差動信号は、1.5 ~ 2.5 m の SMA ケーブルにより、最初のプリアンプに入力される。このプリアンプは、差動 CT 本体とともに SACLA の収納部内に設置している。

[#] matsubara@spring8.or.jp

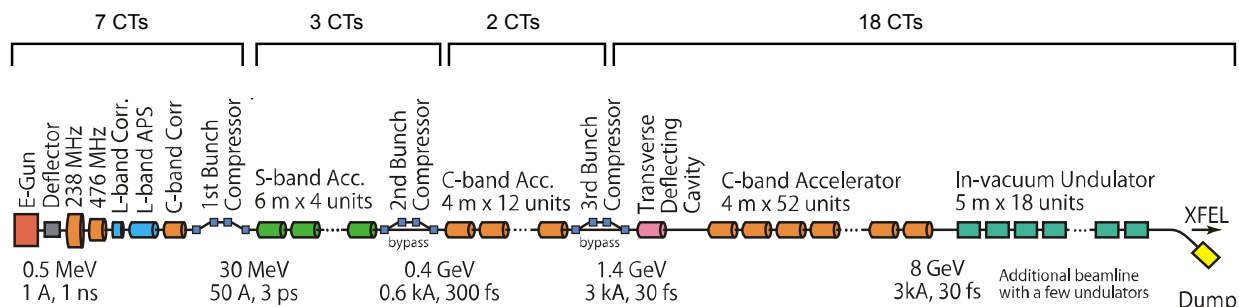


Figure 1: Schematic layout of the XFEL facility and the number of differential-CTs for each section.

プリアンプ回路は対を成すポートの信号を差し引いてコモンモードノイズを除去している。CT の信号は、プリアンプを通ったあと、クライストロンギャラリーに設置された後段のメインアンプまで運ぶ。伝送路も差動信号で伝送することにより、外部環境からのコモンモードノイズを低減している。

また、本 CT から信号は、400 ps 幅と高速な信号のため AD ボードでそのまま読み取ることはできない。そこで、この 2 段のアンプ回路によって、信号パルス幅を広げている。プリアンプ後で 15 ns、メインアンプ後で 50 ns までパルス幅を広げることにより、AD ボードによって信号を読み取ることを可能にしている。電荷量の測定値は、直交する 2 対の差動信号の波高値を足し合わせたものから換算値を乗じて算出している。

特に、入射部上流に設置した 2 台の CT は、アンプ回路を介さない生信号もクライストロンギャラリーに伝送している。この信号を、12 GHz 帯域 (Agilent 社) の高速オシロスコープで測定することによりサブ・ナノ秒域の電子ビームバンチ形状と到達時間を測定している。

とはほぼ等しい。バンチ長が数 10 fs と短い SACLA の BC3 より下流では、CT からの信号が立ち上がり 200 ps (Figure 5 a) と速く帯域が広いので、プリアンプ内

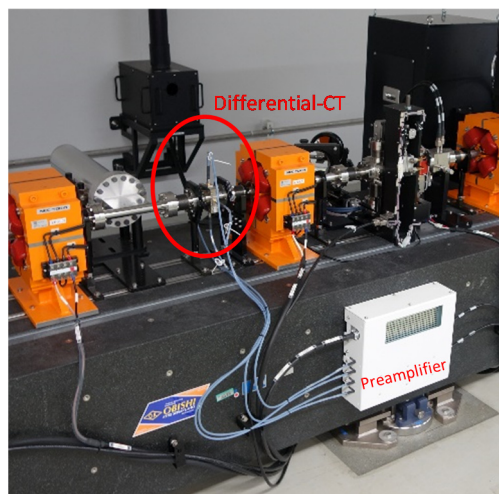


Figure 2: Photograph of the installed differential CT of SACLA.

2.2 差動 CT の非線形出力

SACLA の運転が始まり、レーザー発振が確認された頃、アンジュレータに入射する電子ビームのピーク電流を見積もる CT の測定値が小さいのではないかと疑義が生じた。そこで、ビーム電流に比例すると考えられる RF-BPM の基準空洞からの信号強度と CT の測定値を比較した。BC1 の上流のビームコリメータの開口調整により電荷量を変えて、それぞれの信号強度を測定した。測定結果の 1 例を Figure 4 に示す。差動 CT システムの CT2 と CT3 は測定した 0.2 nC の電荷量付近で、差動 CT と RF-BPM の出力特性比が変化するのが確認できる。

BC2 までの加速器上流の差動 CT システムでは、大きな屈曲はなく、電荷量に対して線形に反応している。Figure 4 の CT1 は、BC2 と BC3 の間に設置したシステムの出特性である。このシステムでは、0.3 nC 近傍で最大 14% の直線性誤差が確認できるが、運転モニターには許容できる誤差精度である。

差動 CT システムの初期の調整・確認を行った SCSS 試験加速器と、SACLA の BC2 までの電子バンチ長と SCSS 試験加速器のバンチ長は 100 fs 程度

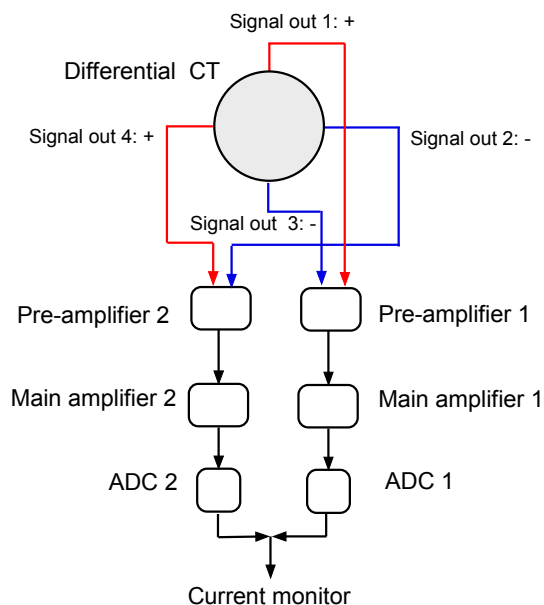


Figure 3: Configuration of the differential CT system for SACLA.

う。そこで、差動 CT とプリアンプ間にローパスフィルターを挿入して、プリアンプへの入力信号の高周波成分を抑制することにより、プリアンプの非線形性を抑制できると考えた。

市販のローパスフィルター(Mini-Circuits 社, SLP-300 など)を用いて試験を行ったが、カットオフが急峻なため大きなリングングが現れた(Figure 5 c)。このリングングの位相がフィルター個体により違くと、バンチ長変化により CT 信号の出力が変化した際に、差動 CT 信号のシステムの出力特性が再び変わることが想定されたため、カットオフが緩やかなローパスフィルターを求めた。

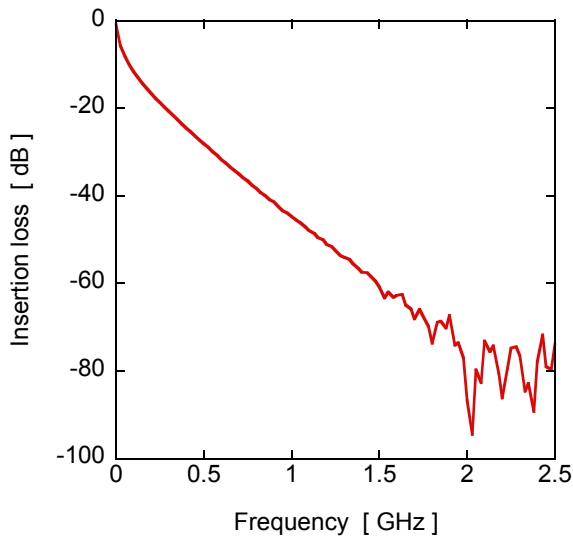


Figure 7: Insertion loss of the coaxial-cable filter with 30 m long.

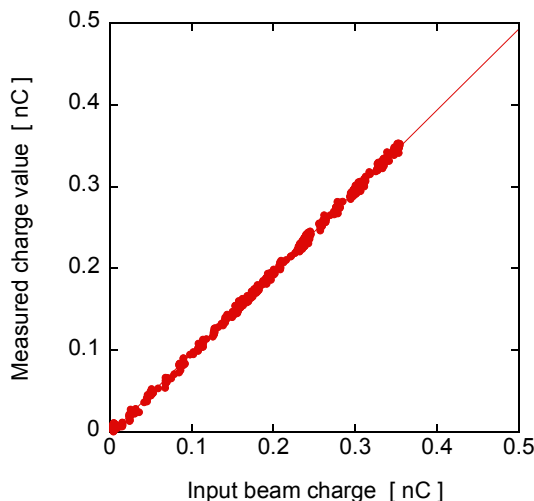


Figure 8: Measured charge-value by the differential-CT system with the coaxial-cable filter.

このローパスフィルターとして、直径 1 mm の同軸ケーブルを用いた。この同軸ケーブルフィルター(ケーブル長 30 m)の挿入損失を Figure 7、フィルター透過後の波形を Figure 6 (b)に示す。このフィルターを通したあとの波形は、パルス幅 3 ns になり、信号の立ち下がりも滑らかでリングングもなかった。このフィルターを挿入した差動 CT システムの入出力特性を Figure 8 に示す。

このフィルターを挿入することにより、差動 CT システムの誤差を 4%にすることができた。

4. まとめ

SACLA のために高速差動 CT システムを開発し、30 台をインストールし、使用を開始した。しかしながら、BC3 下流において、本差動 CT システム毎に測定される電荷量がばらついている問題が判明した。これは、BC3 において電子ビームのバンチ長が数 10 fs と短く圧縮されるため、本高速差動 CT からのパルス信号の立ち上がりが速くなり、後段のプリアンプの増幅率が非線形になったと本稿の結果から推定される。そこで、プリアンプ前に 15 dB のアテネータを挿入することで、プリアンプの非線形性が 10% 程度となる入力信号領域で使用するようにした。しかし、この対策だけでは SACLA のピーク電流を見積もるのに十分な線形性には至っていない。これに対しては、カットオフの緩やかなローパスフィルターとなる 30 m の同軸ケーブルをプリアンプ前に挿入した。この対策により、高周波成分が抑制され、プリアンプの入出力特性を線形にすることができた。そして、ファラデーカップで校正することで、測定される電荷量の確度を 4%にすることができた。

参考文献

- [1] T. Ishikawa, et al., "A compact X-ray free-electron laser emitting in the sub-ångström region", Nature Photonics (2012) doi:10.1038/nphoton.2012.141.
- [2] 松原伸一,他 " SACLA 用の高速差動 CT の特性 ", 第 8 回加速器学会年会プロシーディングス, 2010.
- [3] 松原伸一,他 " XFEL/SPring-8 のバンチ圧縮性能に及ぼす RF 機器変動の影響評価", 第 4 回加速器学会年会プロシーディングス, 2007.
- [4] 安積隆夫, 他, "荷量精密測定のための可動式ファラデーカップの開発", in these proceedings.
- [5] H. Ego, et al., "Development of High Gradient Transverse C-band Deflecting Structure for the Diagnosis of Temporal Bunch Structure in the XFEL/Spring-8 "SACLA"", Proceedings of the 8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan.