

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

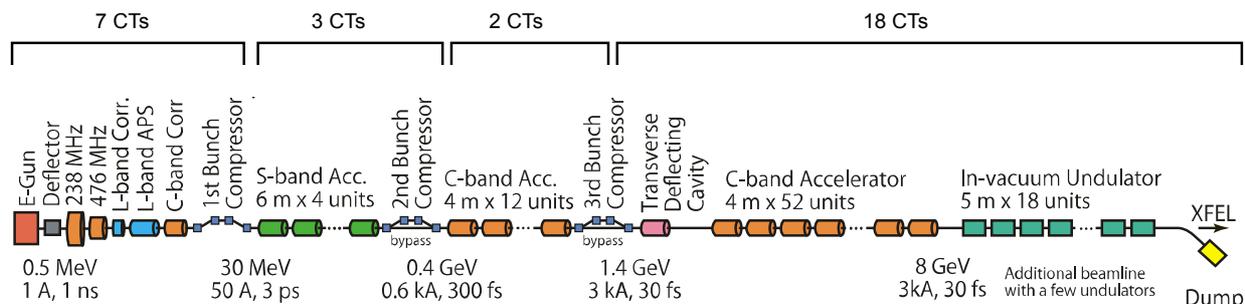


Figure 1: Schematic layout of the XFEL facility and the number of differential-CTs for each section.

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からの信号は、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

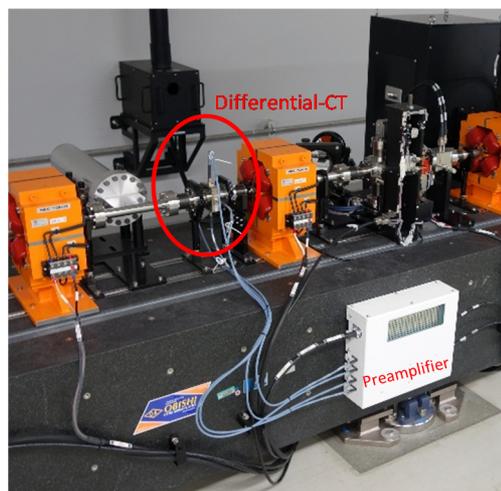


Figure 2: Photograph of the installed differential CT of SACLA.

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応答している。Figure 4のCT1は、BC2とBC3の間に設置したシステムの出力特性である。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

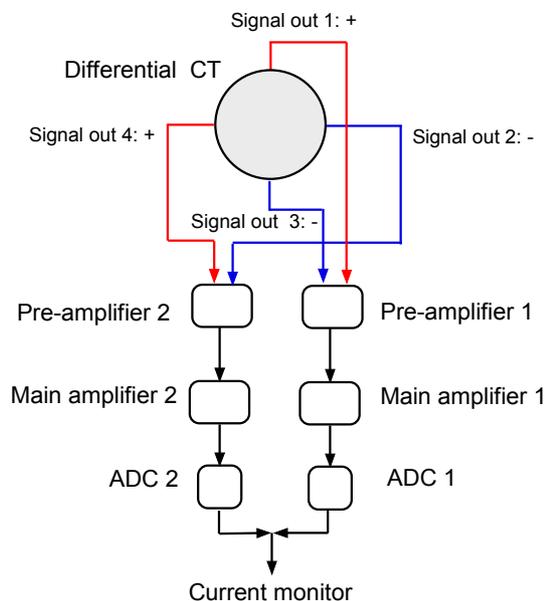


Figure 3: Configuration of the differential CT system for SACLA.

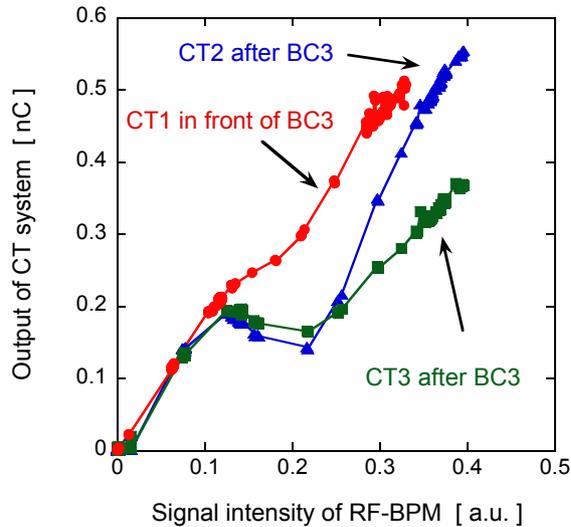


Figure 4: Measured charge values by the differential-CT systems in SACLA. The figure is comparison among CT signal outputs and output signal intensities from the RF-BPM. CT1 is installed in front of the BC3. CT2 and CT3 are installed in downstream of the BC3.

で信号の分散関係が崩れ、出力特性が非線形になると考えられる。

3. 線形応答のための対策

3.1 アテネータによる入力信号の制限

最初の対策として、プリアンプの入力前段にアテネータを挿入して、プリアンプへの入力信号の強度が特性の屈曲点が現れるよりも小さくすることにした。BC3 より下流での電荷量は 0.3 nC 程度で運転されるため、挿入するアテネータ値を 15 dB とした。また、プリアンプの出力に非線形応答性が現れたため、屈曲点以前のプリアンプゲインの値自身も、SCSS 試験加速器で校正した値で良いかの疑義が生じた。そこで、BC3 下流 (RFDEF セクション) に Faraday cup を設置し^[4]、高速差動 CT システムの健全性と校正値を確認した。この測定結果を、Figure 5 に示す。

Faraday cup による測定により、校正値が 12% 低くなっていることがわかった。また、電荷量に対する非線形性が確認できる。この測定の 50 ~ 400 pC の範囲では、直線性誤差が 10% であり、SACLA の運転モニターに使用できる精度であった。そこで、15 dB のアテネータの挿入と校正値の修正を行い、SACLA の CT システムとして運用を行うことにした。この 15 dB のアテネータを挿入する対処は、BC3 下流の CT 17 台について行っている。

3.2 ローパスフィルターの検討

上述の対応により、SACLA の CT システムは運用しているが、BC3 直下のピーク電流値を見積も

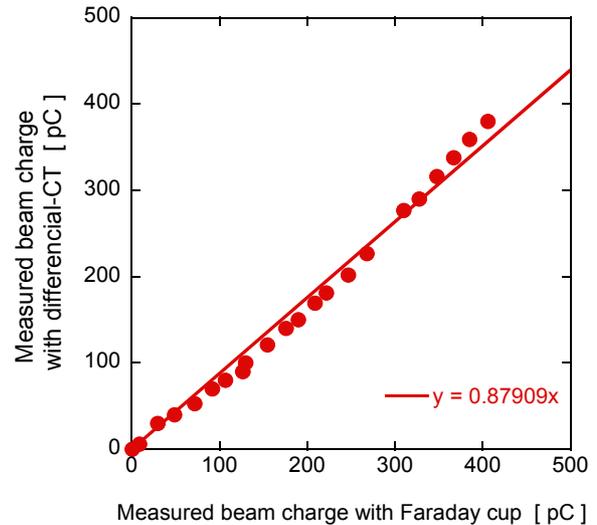


Figure 5: Comparison between measured charge-values by the differential-CT system with a 15 dB attenuator and the Faraday cup at the RFDEF section in SACLA.

るための CT においては、5%の精度が求められる。ピーク電流は、BC3 下流において、RF-deflector (RFDEF) ^[5]とスクリーンモニタ(SCM) の組み合わせにより測定した電子バンチ長と差動 CT によるバンチ電荷量から算出する。このため、RFDEF セクションに設置した CT システム 1 台の測定精度は重要であり、精度の向上を試みた。

アテネータの挿入による対応では、XFEL 運転に使用する 0.15 ~ 0.3 nC の電荷量の領域で誤差が大きい。測定値が実際より最大 10%低く出力されてしま

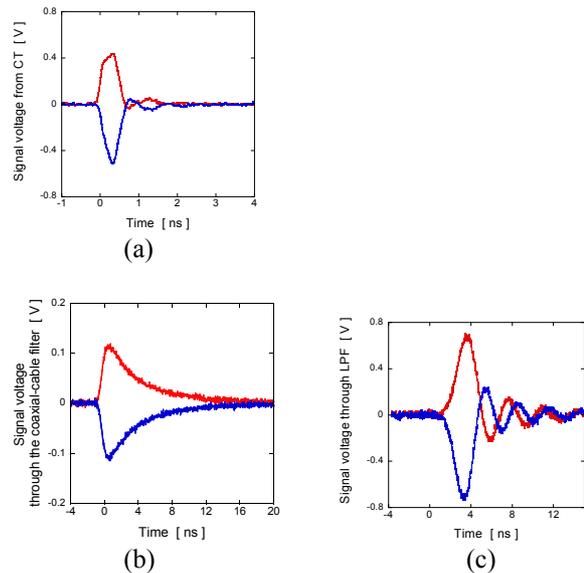


Figure 6: Input signals to the differential-CT preamplifier. (a) Original output signals of the differential-CT. (b) Output signals through the coaxial-cable filters with 30 m long. (c) Output signals through the LPF (SLP-300).

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。

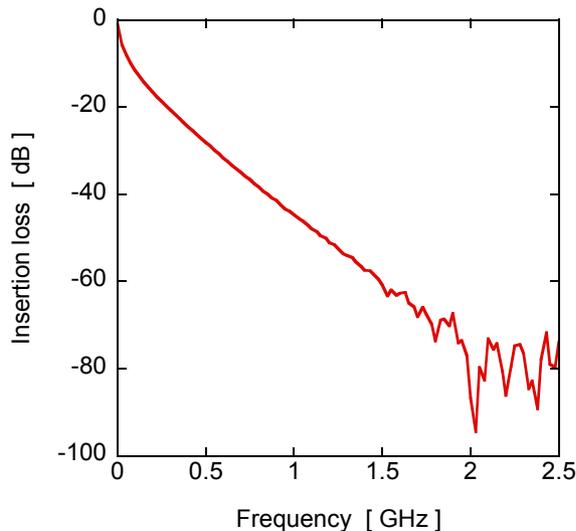


Figure 7: Insertion loss of the coaxial-cable filter with 30 m long.

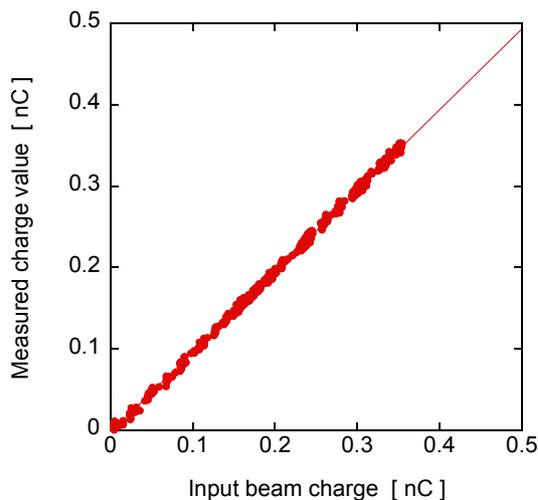


Figure 8: Measured charge-value by the differential-CT system with the coaxial-cable filter.

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*.