

## 高精度低雑音オフセットアンプの開発

### DEVELOPMENT OF LOW NOISE AND LOW DRIFT OFFSET AMPLIFIER

中澤 伸侯<sup>#A)</sup>, 近藤 力<sup>B)</sup>, 稲垣 隆宏<sup>C)</sup>, 寺田 達矢<sup>D)</sup>  
Shingo Nakazawa<sup>#A)</sup>, Chikara Kondo<sup>C)</sup>, Takahiro Inagaki<sup>B)</sup>, Tatsuya Terada<sup>D)</sup>

<sup>A)</sup>SPRING-8 Service Co., Ltd.

<sup>B)</sup>RIKEN SPRING-8 Center/JASRI

<sup>C)</sup>RIKEN SPRING-8 Center

<sup>D)</sup>TSUJI ELECTRONICS CO., LTD.

#### Abstract

In the X-ray free electron laser (XFEL) facility SACLA, pulse-driven power supplies operating at a cycle of up to 60 Hz, such as a klystron modulator or a kicker magnet power supply, are used. Since the XFEL performance is quite sensitive to the fluctuation of the RF and magnetic field, these power supplies should have high stability of several tens ppm. To measure the stability of the pulse waveform with high precision of less than 10 ppm (p-p), we developed a low noise offset amplifier circuit. This circuit achieves an offset function of  $\pm 10$  V required for pulse power supply measurement, a noise level of  $50 \mu\text{Vp-p}$  (0.1 to 10 kHz) or less, stability of 5 ppm / 12 Hour, and 5 ppm / K or less.

#### 1. はじめに

X線自由電子レーザー施設 SACLA では、クライストロンモジュレータ電源やキッカー電磁石電源等、最大 60 Hz の周期で動作するパルス駆動の電源が用いられている。これらの電源には XFEL の強度安定化のため、数十 ppm 以下の高い出力安定性が求められる。しかし、数ミリ秒のパルス波形の一部を ppm オーダーの高精度で測定する事は容易ではない。このような測定を、迅速かつ容易に行うことを目的とし、低雑音の差動増幅回路および、高精度の電圧オフセット機能を備えたオフセットアンプの開発を行った。このオフセットアンプは、10 V の信号を 10 ppm の精度で測定するために必要な、ノイズレベル  $50 \mu\text{Vp-p}$ (0.1-10 kHz)以下、オフセット電圧安定度 5 ppm/12 Hour 以内を達成している。これを実現するために必要となった、低雑音回路技術および電源回路技術について報告する。

#### 2. パルス波形の高精度測定

パルス波形の安定度測定では、パルスのピーク部の波形変動を測定する。これにはパルスに同期した波形収集を行えるオシロスコープなどを用いるが、一般的なオシロスコープのダイナミックレンジは、12 bit 程度で、この測定精度は 250 ppm 程であり、数十 ppm の精度での測定は不可能である。そのため、パルス信号にオフセット電圧を加え、波形ピーク部の電圧を 0 V 程度になるようにし、オシロスコープの測定レンジを拡大することで、高精度測定を行っている[1]。これまでは、オフセット回路として TELEDYNE LECROY 社製 DA1855A 差動アンプ[2]および、電池式オフセットアンプ TKB-10x を使用してきた。DA1855A は広帯域かつ可変式の帯域制限機能を備えており、デジタル制御オフセット電圧源を

<sup>#</sup> nakazawa@ses-spring8.co.jp

内蔵している等、高性能で使いやすいが、1/f ノイズおよびドリフトが大きく、数十 ppm 以下の高精度測定は困難である。TKB-10x は、SACLA キッカー用パルス電源の開発に際し、武部らが設計したものである[3]。単三電池 20 本で動作しており、パルス駆動電源の高精度測定が可能となる低ノイズを実現しているが、オフセット電圧の操作に多回転ポテンショメータを使用しているため、振動や衝撃によって値が飛ぶ事、出力が反転するため換算が面倒な事等の問題があった。また、自作回路のため予備回路が無い状況であった。今回、我々は電池式オフセットアンプと同等の低ノイズかつ安定した電圧源を持ち、デジタル制御による利便性を備えたオフセットアンプを開発した。

#### 3. 高精度オフセットアンプの概要

Table 1 にオフセットアンプに要求される性能を示す。本オフセットアンプ回路は、特に直流に近い低周波領域で低ノイズである事が重要となる。

測定対象信号のレベルが 10 V の場合、10 ppm は  $100 \mu\text{V}$  となる。この精度の測定を行うための、オフ

Table 1: Specifications of Offset Amplifier

Input Circuit	Differential input, DC-coupling.
Input voltage	$\pm 10$ V
Cutoff frequency of lowpass filter	1 kHz, 10 kHz, 100 kHz (selectable)
Offset range	-10 V to +10 V
Offset voltage stability	5 ppm of 10 V
Equivalent Input noise	$50 \mu\text{Vp-p}$ (0.1-10 kHz)
Gain	x10

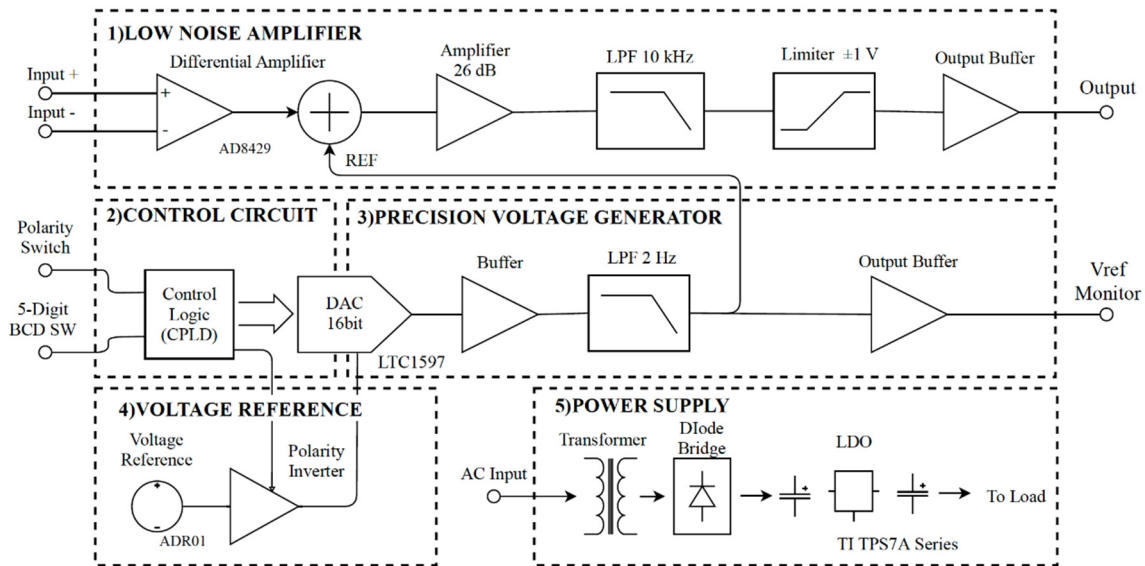


Figure 1: Block diagram of offset amplifier.

セットアンプのノイズレベルは信号レベルに対して-6dB 下の  $50 \mu\text{Vp-p}$  以下であることが求められる。信号オフセット用電圧源についても、10 ppm 精度の測定を実現するためには、5 ppm 以下の安定度が必要である。また、この電圧は原信号に加算されるため、低ノイズであることが要求される。

Figure 1 に本オフセットアンプのブロック図を示す。各ブロックの詳細を以下に列挙する。

1) 低ノイズ増幅回路(Low Noise Amplifier)  
加速器の周辺では、大電力のパルス電源を多数駆動している事から非常に強いノイズが発生している。コモンモードノイズ対策として入力部に計装アンプである、AD8429 を採用している。また、測定に使用する高感度の計測器を保護するため、出力振幅を制限する回路を搭載している。ゲインおよびフィルタ帯域はジャンパーピンによって変更可能である。

2) 制御回路(Control Circuit)  
オフセット電圧の設定は、フロントパネルのサムロータリスイッチの値を CPLD (Complex Programmable Logic Device)により、16 bit バイナリへ変換して、DAC IC に送信する。このとき、デジタル回路のクロックに起因するノイズを防ぐために、CPLD が設定値変更時のみ動作する非同期ロジック処理とし、測定時はデジタルノイズを発生させないようにしている。

3) 高精度電圧発生回路 (Precision Voltage Generator)  
16 bit 乗算型 DAC (LTC1597)を使用し、低ノイズかつ高精度のオフセット電圧を供給する。

4) 基準電圧発生回路 (Voltage Reference)  
高精度基準電圧 IC (ADR-01)および、極性反転回路で構成している。極性反転回路は制御回路からの指示により基準電圧の極性を反転し、DAC へ供給する。

5) 電源回路(Power Supply)

絶縁トランスおよび、低ノイズ LDO(low-dropout linear voltage regulator) を使い、AC 100 V から  $\text{DC} \pm 15 \text{ V}$ 、3.3 V を生成する、低ノイズリニア電源を構成している。

Figure 2 に、製作したオフセットアンプ(T3974)の内部を示す。左側が電源部、右側中央が増幅回路等を搭載したメイン基盤である。右下部は LM399 基準電圧発生回路である。これについては 4.2 項で説明を行う。



Figure 2: Inside of the developed offset amplifier. The left side is the power supply section, the right center is the low noise amplification circuit, the lower right is the reference voltage circuit.

#### 4. ノイズの抑制

開発を進めていく上で、数々のノイズ要因が見つかり、それらの抑制を行った。中でも高精度を得るために重要であった次の 2 点の問題について説明する。

#### 4.1 出力へのハムノイズの混入

ノイズフロア測定時に、出力信号に AC リップルが確認された。これは電源回路の絶縁トランスからの漏洩磁場が、周辺回路に回り込む事が原因であった。当初、対策としてファインメットシート等での遮蔽を試みたが、効果は限定的であった。このため、トランスからの漏洩磁束を低減すべく、当初使用していた 9 VA EI コア以外に、50 VA トロイダルコア、50VA R コア[4]と構造の異なるトランスの漏洩磁束の比較評価を行った。測定の様子を Fig. 3 に示す。

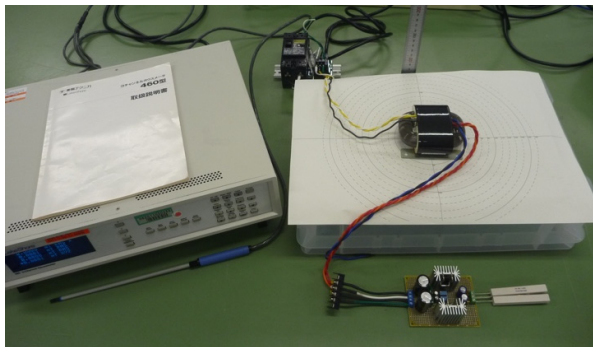


Figure 3: Measurement of transformer leakage flux. Lakeshore 460 with 3-axis Hall Probe.

測定は、負荷としてリニア電源回路を接続し、コア周辺の AC 磁場をガウスメーター(Lakeshore 460 3-channel gauss meter)にて、中心より半径 100 mm, 垂直 100 mm の最大値を測定した。

結果は、大きな値を示した順に、EI コア:18.5  $\mu\text{T}$ (垂直)、トロイダルコア:8.5  $\mu\text{T}$ (垂直)、R コア:0.5  $\mu\text{T}$ (水平)という結果であった。R コアは垂直方向でも 0.4  $\mu\text{T}$  と、EI コアだけでなく一般に低漏洩磁束と言われているトロイダルコアトランスに対しても、今回の測定条件では大幅に漏洩磁束が少ない事が判明した。この結果から、今回はオフセットアンプ回路の電源部のトランスを R コアトランスに交換した。取り付けの際、漏洩磁束による増幅回路への影響を最小化すべく、筐体の背面パネルに垂直に固定を行った。Figure 4 に、対策前の EI コアの場合と、対策後の R コアの場合の AC リップルの大きさを示す。出力に現れていた AC リップルはノイズフロア以下となった

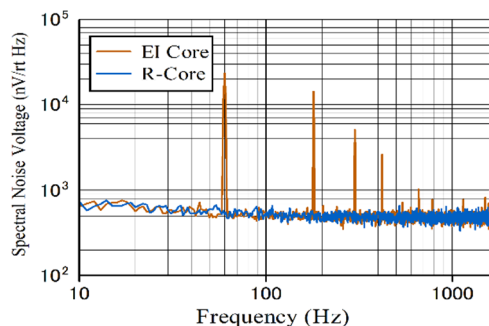


Figure 4: Output noise spectrum using EI-core (red) and R-core (blue) for a power supply circuit.

#### 4.2 高精度電圧発生回路の低周波ノイズ

高精度電圧発生回路の測定を行ったところ、低周波ノイズと長期ドリフトにより、80  $\mu\text{Vp-p}$  以上の変動があることが分かった。この要因を調査した結果、基準電圧 IC に使用した ADR01 と、DAC 後段のフィルタ回路が原因である事が判明した。ADR01 は高精度だがノイズは 0.1-10 Hz において 20  $\mu\text{Vp-p}$  と、若干多めである。また、DAC 後段の Low Pass Filter (LPF) は、ノイズおよびグリッチ対策のために、カットオフ周波数を低くすべく 10 k $\Omega$  の抵抗と 10  $\mu\text{F}$  のコンデンサを用いた反転アクティブフィルタを構成していたが、この回路の熱雑音が 1/f ノイズの発生源となっていた。該当フィルタ回路は効果が見込めない事から、非反転バッファに置き換えた。また、基準電圧源については、低ノイズの LM399 という基準電圧 IC をベースとした回路に置き換えた。

Figure. 5 に、オフセット電圧の 12 時間安定度測定データを、上記の改良前と改良後で示す。

12 時間安定度は 80  $\mu\text{Vp-p}$  から 26  $\mu\text{Vp-p}$  まで改善された。これは、10 V に対して、2.6 ppm という高い安定度を達成している。また、この間の温度変化による影響は 2.1 ppm/K であった。Table 2 に今回検討した基準電圧 IC の安定度とノイズについてまとめている。将来には、より低ノイズかつシンプルな回路にするために、LTC6655 を基準電圧 IC に使用した回路も検討している。

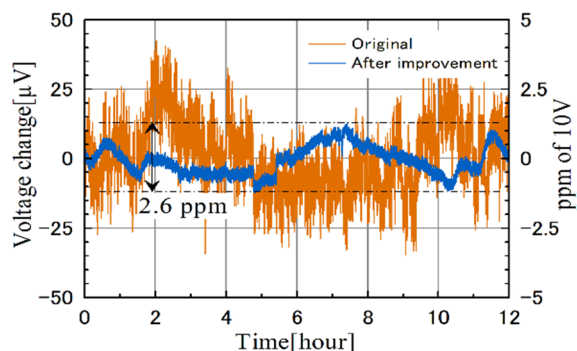


Figure 5: Comparison of stability for 12 hours before and after reference voltage source improvement.

Table 2: List of Typical High Precision Voltage Reference ICs

Reference IC	Temperature Coefficient	Low Frequency Noise (0.1 Hz to 10 Hz)
ADR01	3 ppm/°C	20 $\mu\text{V p-p}$
REF102	2.5 ppm/°C	25 $\mu\text{V p-p}$
LTC6655B-5	2 ppm/°C	0.25 ppm p-p (1.25 $\mu\text{V p-p}$ )
LM399	0.5 ppm/°C (Heater stabilized)	10 $\mu\text{V p-p}$

## 5. 最終的な到達性能

作成したオフセットアンプ(T3974)と、これまで使用してきた各オフセットアンプ(DA1855A, TKB-10x)の入力換算ノイズ電圧密度を Fig. 6 に示す。Table 3 には 0.01 Hz~10 kHz 入力換算ノイズレベルの測定結果を示す。ノイズ特性は、電池式オフセットアンプである TKB-10x に僅かに及ばないものの、入力換算ノイズレベルで 46.7  $\mu$ Vp-p と、目標とした性能を達成している。

実際の使用条件における性能確認を行うため、開発したオフセット回路を用いて、SACLA の高精度 PFN 充電器の充電電圧の安定度測定を行った。測定波形とデータを Fig. 7 に示す。充電器開発の際に取得したデータ[5]と比較し、ほぼ同様の波形と安定度が測定できることを確認した。

## 6. まとめ

高精度パルス駆動電源の出力安定度計測に必要なオフセットアンプ回路の開発を行った。実機での性能確認にて、問題なく測定が行えることを確認した。このオフセットアンプを使用することにより、パルス電源の高精度測定をより容易に行える事が期待される。今後、さらなる低ノイズ化、高安定化を行い、数 ppm オーダーの測定を実現したいと考えている。また、本開発を通じて得られた低雑音回路技術を加速器の電源および測定器開発に生かして行きたい。



Figure 6: Input equivalent noise spectrum of three offset amplifiers, The inputs were terminated by 50  $\Omega$ .

Table 3: Input Equivalent Noise Level

Model	Gain/ Band Width	Noise Level 0.01 – 10 kHz
T3974	20 dB DC-10 kHz	46.7 $\mu$ Vp-p
DA1855A	20 dB DC-100 kHz	63.9 $\mu$ Vp-p
TKB-10x	20 dB(Inverted) DC-10 kHz	33.3 $\mu$ Vp-p

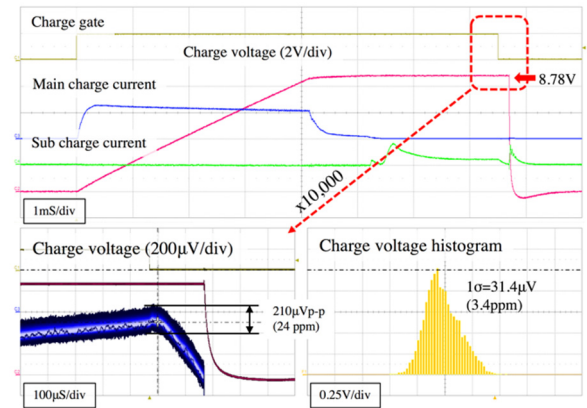


Figure 7: Waveforms of inverter PFN charger at SACLA. The charging voltage is 44 kV. Zoom and offset voltage waveform by T3974 amplifier is shown in the left-under graph. Histogram of the charging voltage at the end of charging is shown in the right-under graph.

## 参考文献

- [1] A. Kawasaki *et al.*, “Development of high voltage capacitor charger for XFEL/SPring-8” (In Japanese), Particle Accelerator Society of Japan, Aug. 2008.
- [2] Lecroy Differential Amplifier DA1855A; <https://teledynelecroy.com/japan/products/diffamps/>
- [3] H.Takebe *et al.*, “HIGH PRECISION PULSE MAGNET POWER SUPPLY DEVELOPMENT FOR SACLA BEAM-LINE SWITCH AND PULSE NMR MEASUREMENT”, (SUOL03), Proceedings of the 11th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan.
- [4] 株式会社フェニックス RAトランス; <http://www.pnxcorp.co.jp/ra/ra.htm>
- [5] C. Kondo *et al.*, “DEVELOPMENT OF HIGH PRECISION PFN CHARGER FOR SACLA- BL1”, Proceedings of the 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan.