

SuperKEKB 入射器の RF モニタシステムによる RF 源診断

RF SOURCE DIAGNOSIS USING RF MONITOR SYSTEM IN SuperKEKB INJECTOR LINAC

片桐広明[#], 明本光生, 荒川 大, チュウ フェン, 松本利広, 三浦孝子, 矢野喜治

Hiroaki Katagiri [#], Mitsuo Akemoto, Dai Arakawa, Feng Qiu, Toshihiro Matsumoto, Takako Miura, Yoshiharu Yano
High Energy Accelerator Research Organization

Abstract

A new RF monitor system for the SuperKEKB project has been developed at the KEK injector linac. The RF monitor unit, which consists of an analog I/Q demodulator, ADC/DAC board, and FPGA board, achieves 50-Hz data acquisition and beam mode identification. Originally, the data acquired by the RF monitor unit are the I/Q components of a monitor signal. EPICS-IOC provides the data converted to amplitude and phase. An amplitude waveform and a phase waveform are monitored constantly. When abnormality occurred, the program which archives data has been developed.

1. はじめに

高エネルギー加速器研究機構 (KEK) 電子陽電子入射器では SuperKEKB 計画のためのアップグレードの一つとして、RF モニタシステムを更新した[1]。中心となるのは、アナログ I/Q 検出器、ADC/DAC ボード、FPGA ボード等から構成される RF モニタユニットである。入射器では 2009 年から複数リングへの同時入射運転[2]を行っており、ビームモードやタイミングを統括するイベントタイミングシステム[3]への対応が必須であった。RF モニタユニットでは FPGA にイベントレシーバを組み込み、イベントタイミングシステムから配信されるイベント信号を直接受信することで、ビームモードの識別を実現した。

大電力クライストロン用の RF モニタユニット約 60 台を導入した後、イベントレシーバの誤動作やノイズの影響と思われる測定精度の悪化が見られ、対策を施した。さらに、ダンピングリング入射路用及び出射路用、サブハーモニックバンチャー用 (114MHz 及び 571MHz) のモニタユニットも導入した。

これまでに主要なハードウェアの整備を終え、定常的なデータテキングを行うことで、入射器の安定したビーム運転に寄与してきた。現在、異常時の原因究明に役立つ目的で、セーフティーインターロックによる大電力 RF 源のトリップや、クライストロン出力のパルス欠けなど、突発的に発生する現象を検知し、波形データを自動的に保存するプログラムを開発、試験的に運用している。RF モニタシステムの運用状況について、ソフトウェアの整備を中心に報告する。

2. RF モニタシステムの概要

Figure 1 に RF モニタシステムのブロック図を示す。約 60 台ある大電力クライストロン毎に設置された RF モニタユニットが、クライストロン出力進行波 (KLY Pf)、SLED 出力進行波 (SLED Pf) 及び反射波 (SLED Pb)、加速管透過波 (ACC out) の 4 系統の信号を常時測定する。

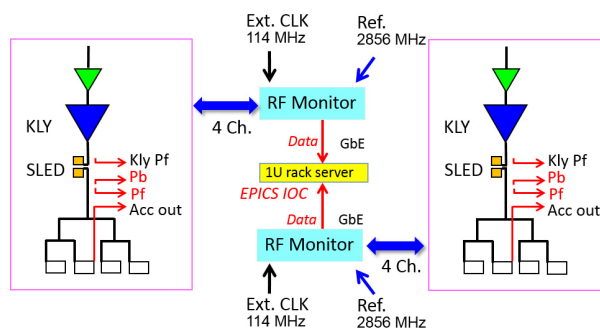


Figure 1: Block diagram of RF monitor system.

RF モニタユニットが捕捉した波形データは、EPICS IOCとなるサーバー計算機により収集される。3章で述べる、異常時に自動的に波形データを保存するプログラムは、サーバー計算機上で動作している

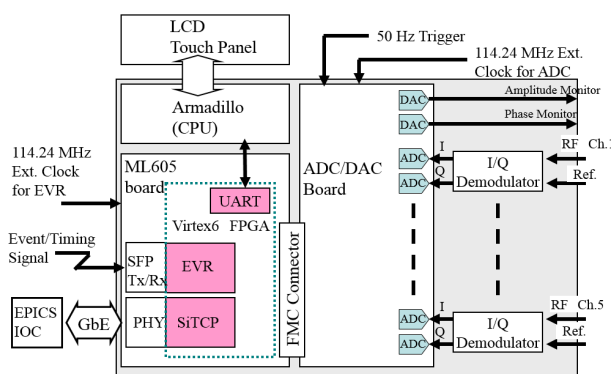


Figure 2: Block diagram of RF monitor unit.

Figure 2 は RF モニタユニットの概略図である。アナログ I/Q 検出器によりベースバンドに変換された I/Q 信号を ADC でサンプリングする。FPGA に組み込まれたイベントレシーバは、ビームモードを識別するためのイベントコードや、Shot ID とよばれるパルス識別用コードを受信する。ADC が捕捉した波形データはイベントコード・Shot ID と関連付けられた後 GbE インターフェースを介して

[#]hiroaki.katagiri@kek.jp

サーバー計算機に転送される。EVR の誤動作は、Xilinx社製の高速シリアルインターフェースであるGTXに供給するリファレンスクロックの位相ノイズが制限値を超えているのが原因であった。クロックソースを変更することで誤動作は改善した。

サブハーモニックバンチャー(SHB)用のモニタユニットは、Sバンド(2856 MHz)用を基に、I/Q 検出器を 114 MHz 用及び 571 MHz 用に置き換える方法で作成した。ADC/DAC ボード、FPGA ボード等、その他のハードウェアはそのまま流用している。パルス幅が最大 80 μ 秒程度と、S バンドユニットと比較して大きいため、ADC で捕捉したデータを 1/16 に間引くことにより同じメモリ長に収まるよう FPGA 回路を変更した。

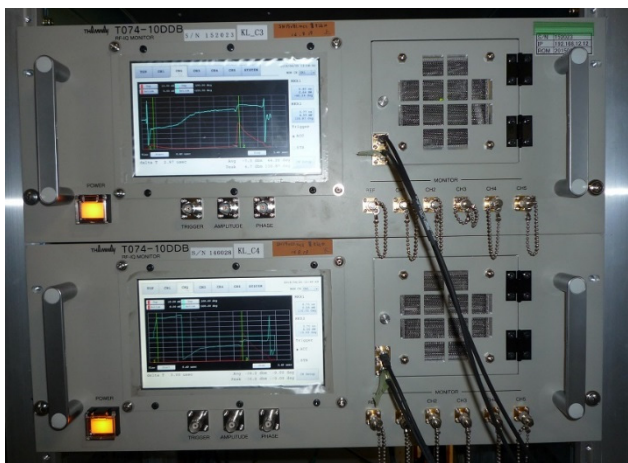


Figure 3: Front panel of RF monitor unit.

Figure 3 は RF モニタユニットの前面パネルである。簡易的に波形表示が可能な、タッチパネルつきディスプレイが設けられている。ノイズの影響と思われる測定精度の悪化は、大電力クライストロンをドライブするための RF 電力を供給する経路から RF の漏れがあることが一つの原因であった[4]。この RF 漏れ自体を抑える対策を施し、さらにモニタユニット筐体の開口部(冷却用の吸気孔と排気孔)に金属メッシュを取り付けることで電磁シールドを強化した。

3. アプリケーションソフト

3.1 Waveform Viewer

Waveform Viewer は、RF モニタシステムが取得した振幅・位相波形をリアルタイム表示するソフトウェアである。Figure 4 は KL_B1 ユニットの SLED 出力進行波を表示している。上が振幅波形、下が位相波形である。プルダウンメニューから、ユニット番号、信号種類、ビームモードを選択することができる。さらに、振幅・位相とも、ピーク値・平均値を計算するためのゲートを設定することができる。Figure 3 の SLED の例では、通常振幅ピーク直後の 10 点をカバーするようゲートを設定している。EPICS IOC は設定されたゲート範囲内でのピーク値・平均値を求め、アーカイブに蓄積する。蓄積されたデータは、次節で述べる CSS Archive Viewer によりトレンドグラフとして閲覧することができる。

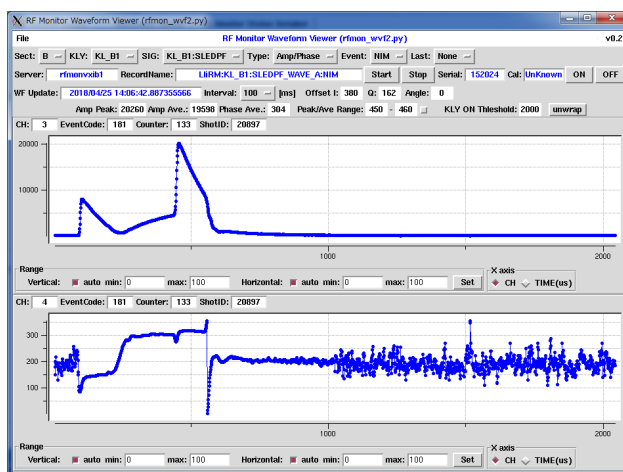


Figure 4: Waveform Viewer.

3.2 CSS Archive Viewer

CSS Archive Viewer は蓄積された様々なデータをトレンドグラフ表示する汎用的なソフトウェアである。Figure 5 は KL_34 ユニットのクライストロン出力進行波の位相を約 8 時間の時間軸で表示している。上から KBE(KEKBe-)、KBP(KEKBe+)、NIM(No Injection)の各ビームモード毎に測定値をプロットしている。KBE、KBP のステップ状の変化は、オペレータが位相調整した箇所である。Fig.5 で表示している期間、NIM モードの位相設定は変えておらず、測定値も一定の値を示している。これにより、RF モニタユニットに組み込まれた EVR が正確にイベントコードを受信し、ビームモードの識別がなされていることが確認できる。

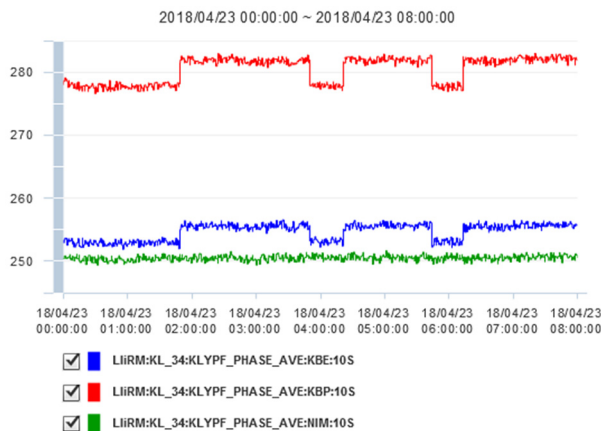


Figure 5: CSS Archive Viewer.

3.3 ラスト波形の蓄積

大電力クライストロンやパルス電源の不調時の原因調査や、立体回路・加速管での放電箇所を特定するため、オシロスコープなどの測定器をセットし、異常が発生した際のパルス波形を捕捉することがある。現行の RF モニタシステムを導入したことで、大電力クライストロン1台毎に設置された RF モニタユニットにより 4 系統の信号の常時監視が可能となったため、異常時の波形データを自動的に保存するソフトウェアを開発した。

これはサーバー計算機上で動作するもので、リングバッファに最新から数周期前までの波形データを常時保持し、セーフティーインターロックの作動によるパルス電源のトリップを検出した際に一括して保存するものである。Figure 6 は VSWR インターロックでトリップする直前と 1 周期前の波形である。SLED への反射波形 (SLED PB) のピークが増大しており、加速管からの反射があったことが伺われる。保存するデータは図に示した画像データのほか波形のデジタル生データも選択することが出来る。ただしデータ容量が大きく、トリップ頻度が高くなるとストレージを圧迫することから、運用方法を検討する必要がある。

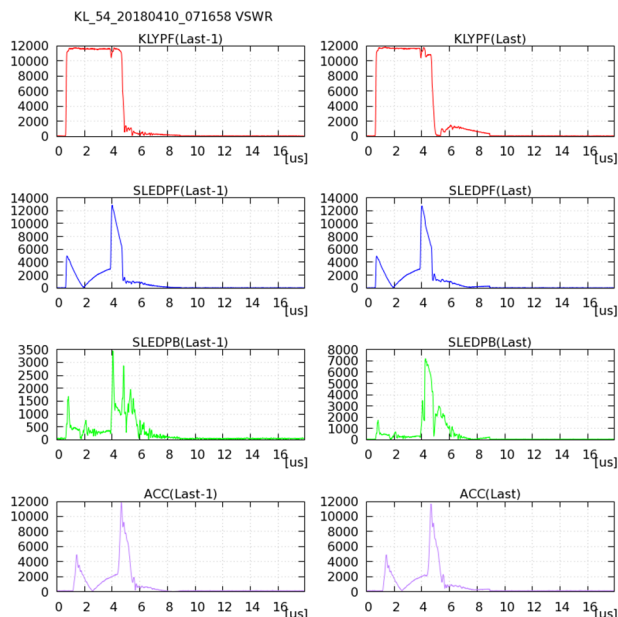


Figure 6: Archived last waveform.

3.4 パルス欠け検出

大電力クライストロンの高周波パルス幅が、所定の値よりも短くなる現象を「パルス欠け」[5]と呼んでいる。これまでの調査で、電子陽電子入射器の S バンド大電力クライストロンでは、1 時間に数回のパルス欠けが発生していることが判明している。ただし、パルス電源がトリップする訳ではなく、ビーム運転への明確な影響も見られないため、抜本的な対策は採られていなかった。今後の SuperKEKB の運転では、パルス欠けが要因で起こるビームエネルギー変動により、リングでビームアポートが発生する恐れがあることから、パルス欠けを検出してビームを停止することが可能か検討している。

パルス欠けの検出は、専用の検出器をパルス電源にセットするか、クライストロンのドライバ機能を統合した小型励振器[6]に組み込まれた機能を使用する必要がある。しかし大電力クライストロン全数を常時監視することはできないため、RF モニタシステムによるパルス欠け検出プログラムを開発した。Figure 7 は検出されたパルス欠けの例である。Figure 6 のケースと異なり、SLED PB のピーク値は変わらないことから、反射の影響ではなく、クライストロン出力進行波 (KLY PF) のパルス幅自体が短くなっていることが分かる。

プログラムの動作としては、リングバッファに数周期分の波形データを保持するのはラスト波形蓄積と同様であるが、保存するタイミングは波形の変化を検知して判断しなければならない。小型励振器では、クライストロン入力パルスと出力パルスの両方を測定しており、パルス幅の差は容易に検出することができる。RF モニタユニットではクライストロン出力しか測定していないため、欠けの検出アルゴリズムは複雑になる。検出精度を高めつつ CPU 負荷や演算時間が過度に大きくならないよう、アルゴリズムの改善を進めている。

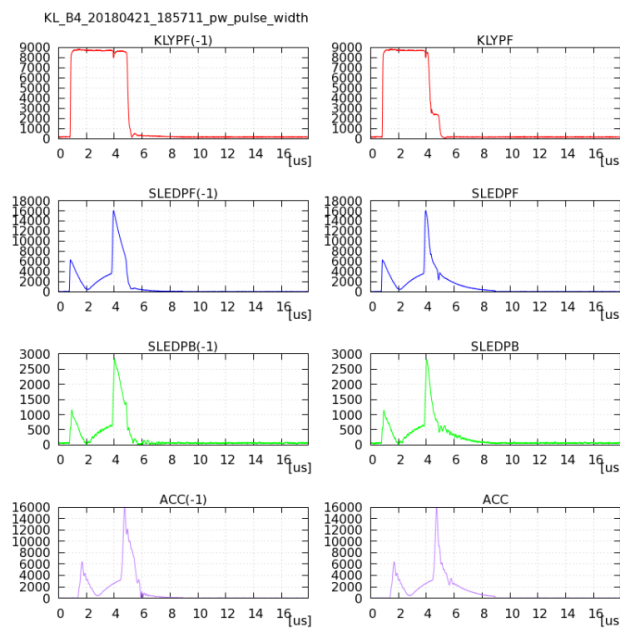


Figure 7: Archived pulse-shortening waveform.

4. ビーム誘起波測定

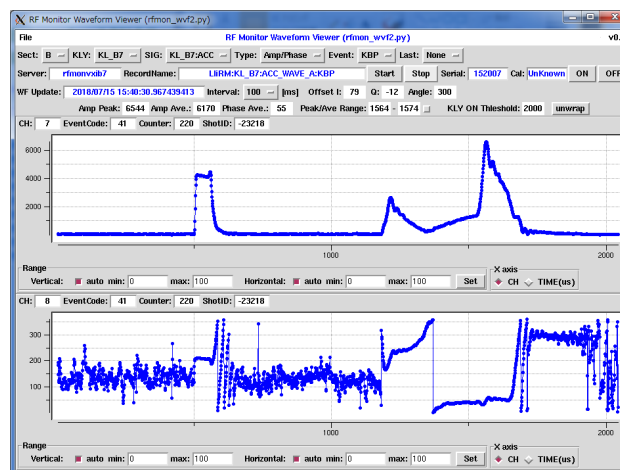


Figure 8: Detected beam-induced wave.

ビーム加速中に大電力クライストロンを待機 (STB) モードに設定すると、加速管透過波出力ポートではビーム誘起波と大電力 RF パルスが時間的に分離した状態で観測される[7]。このビーム誘起波の位相を RF モニタユニットで直接測定することで、位相調整やビーム調整に利用することを検討している。RF モニタユニットの入力段

には通常 20~30 dB の固定減衰器が挿入されているが、ビーム誘起波を測定するには減衰量が大きすぎるため、高速に ON/OFF 可能な減衰器に置き換えた。ON/OFF 制御はハードウェアで行っており、ビームトリガとパルス電源の高圧トリガとの時間差を判断して誘起波が観測されるタイミングでのみ減衰器を OFF する。

Figure 8 は検出された KBP モードのビーム誘起波を Waveform Viewer で表示した例である。表示領域の前半が加速 (ACC) タイミングでビーム誘起波が、後半が STB タイミングで大電力 RF が観測されている。ACC と STB は実際には 100 μ 秒の時間差がある。クレスト位相に調整した状態では、ビームと大電力 RF の位相差は概ね 180 度に観測されている。ON/OFF 減衰器と制御モジュールは 2 箇所ユニットに試験的に導入した段階であり、必要に応じて増設していく予定である。また、ビームモードによっては誘起波電力が Fig. 8 の例よりも低いいため、STB モードで誘起波を増幅することで測定制度を向上させる仕組みを検討している。

5 まとめ

SuperKEKB に向け、RF モニタシステムの更新を行った。RF モニタユニットの導入後、イベントレシーバの誤動作やノイズの影響による測定精度の悪化が見られたが、個別に対処してシステムの安定性を向上させた。運用面では、定常的なデータテーキングだけでなく、パルス電源のトリップやパルス欠けのように突発的に起こる現象を検出し、自動的にデータ保存するプログラムの開発し、トラブル時の対処や保守作業の効率化、省力化を進めていく。ビーム誘起波測定については、ビームコミッションへの利用が期待されており、測定精度の向上を図りつつ、より多くのユニットに導入を進めていく予定である。

参考文献

- [1] H. Katagiri *et al.*, “RF Monitor System for SuperKEKB Injector Linac”, Proceedings of the IPAC18, Vancouver, BC, Canada, Apr. 29 – May 4, 2018, WEPAK016.
- [2] M. Satoh *et al.*, “Simultaneous Top-up Injection for Three Different Rings in KEK injector Linac”, in Proc. IPAC’10, Kyoto, Japan, May 23-28, 2010, THPD006, pp. 4287-4289.
- [3] T. Kudou, *et al.*, “The Event Timing System in KEK Linac”, Proceedings 7th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Himeji, August 4-6, 2010.
- [4] Y. Yano *et al.*, “Noise Counterplan of SuperKEKB Injector Linac”, in these proceedings, THP008.
- [5] T. Miura, *et al.*, “LLRF Control Unit for SuperKEKB Injector Linac”, Proceedings of the IPAC18, Vancouver, BC, Canada, Apr. 29 – May 4, 2018, WEPAK018.
- [6] M. Yoshida, *et al.*, “Study on Klystron RF Pulse Shortening and Development of Waveform Diagnostic FPGA Board”, Proceedings of the 2nd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, July 20-22, 2005, Tosu, Japan, 20P030.
- [7] H. Hanaki *et al.*, “Phase Control System of the KEK 2.5 GeV Electron Linac”, in Proc. 1986 International Linac Conference, Stanford, California, USA, pp. 481-483.