

RF MONITOR UNIT FOR SIMULTANEOUS INJECTION

Hiroaki Katagiri #, Dai Arakawa, Toshihoro Matsumoto, Takako Miura, Shinichiro Michizono, Yoshiharu Yano
High Energy Accelerator Research Organization
1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

Abstract

In simultaneous injection at KEK injector linac, phase and timing of RF pulse are controlled at 50Hz. Data taking and recognition of beam mode in 50 Hz are required for RF monitoring system. The RF monitor unit consists of analog I/Q demodulator, ADC/DAC board and FPGA board are developed for simultaneous injection. The event receiver and SiTCP were newly installed in FPGA. The event receiver receives event code in order to recognize beam mode. SiTCP transmits acquired data to EPICS IOC at 50 Hz via Gigabit Ethernet.

同時入射に対応した RF モニタユニットの開発

1. はじめに

KEK 電子陽電子入射器では 2009 年に、PF リング、KEKB e^+/e^- リングへの同時入射運転を開始した。同時入射では 50Hz のパルス毎に RF の位相やタイミングの設定値が変化するため、RF モニタでは 50Hz で取りこぼし無くデータを取得し、さらにビームモードごとに振り分ける必要がある。現在運用中の VXI をベースとした RF モニタ^[1]は、KEKB 加速器建設時に導入されたもので、デジタイザの能力に制限があり 50Hz でのデータ取得ができない。VXI は規格自体が終息に向かっており、ビームモードの識別に必要な機能の拡張が難しい。さらにハードウェアや OS 及びソフトウェアの保守も困難な状況である。これらの要因から、同時入射の要求に完全には対応できないため、新たにアナログ I/Q 検出器、ADC/DAC ボード、FPGA ボードを組み合わせた RF モニタユニットを開発した。その詳細と、電子入射器での動作試験について報告する。

2. RF モニタの構成

RF モニタユニットは、電子入射器に順次導入を進めている小型励振器がベースとなっている^[2]。アナログ I/Q 変調器及び I/Q 検出器、FPGA ボード、ADC/DAC ボードで構成され、パルス毎の振幅/位相制御を可能とし、設定精度も向上させている。FPGA ボードは Xilinx 社の Virtex6 を搭載した ML605 評価ボードを使用、ADC/DAC ボードには ADC と DAC を各 12 チャンネル搭載し、FPGA ボードとは FMC コネクタを介し接続される。ADC と DAC は排他使用となり、計 12 チャンネルを FPGA に接続することができる。RF モニタユニットでは I/Q 変調器を 4 台搭載し、各々の I/Q 出力を 8 つの ADC で捕捉することで 4 系統の RF 信号の同時計測を可能としている。I/Q 検出器の出力特性を FPGA 内で補正するほか、振幅/位相への換算値を DAC から出力する機能も持ち、オシロスコープを接続すればパルス波形の観測が可能である。

上記のハードウェアを基に、同時入射への対応と

して、次章で述べる SiTCP を FPGA に組み込み、ギガビットイーサネットにてデータを転送する機能を追加した。外部に置く EPICS の IOC となる計算機にて、ADC 最大 12 チャンネル分のデータを 50Hz で取りこぼし無く取得することが可能である。

また、ビームモードの識別については、入射器のイベントタイミングシステムで配信されるイベントコードを、ML605 ボードの SFP 光トランシーバで受信、FPGA に組み込んだイベントレシーバ回路で検出することで、ハードウェアでの処理を実現した。詳細は 4 章で述べる。

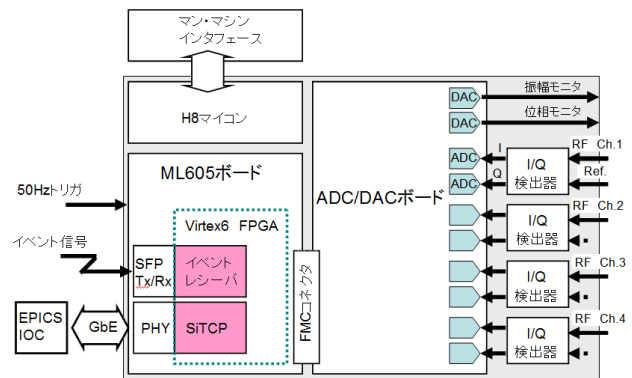


図 1 : RF モニタのブロック図

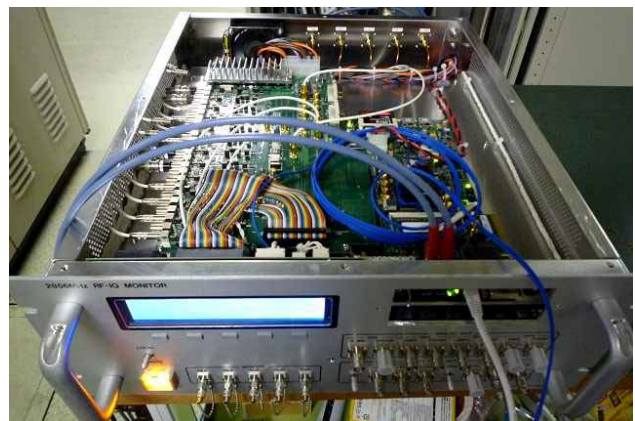


図 2 : RF モニタユニット外観

#hiroaki.katagiri@kek.jp

3. SiTCP とデータ転送回路の組み込み

SiTCP は物理実験用の測定器をイーサネットに接続する目的で開発された、FPGA 組み込み回路である^[3]。通信は完全にハードウェアで処理されるため、CPU を用いるのと比較し回路規模は小さくて済む。この SiTCP を ML605 に組み込み、外部 PC とギガビットイーサネットでデータ転送を行う。ADC が捕捉したデータは FIFO を介して SiTCP に転送される。FIFO の容量は ADC1 チャンネル当たり 16 ビット幅、2048 ワードで全 12 チャンネル分確保している。2048 ワードの前半分に、ビーム加速に寄与する加速モード (ACC) タイミングのデータ、後半分がエネルギー調整で使用される待機モード (STB) タイミングのデータが格納されている。ACC と STB の時間差は約 57 μ秒ある。外部トリガを検出後、即時 ACC モードのデータ補足を開始、STB モードの捕捉はクロックカウンタにより設定時間まで待った後、開始する。このタイミングチャートを図 3 に示す。なお、待ち時間を設定するレジスタは、SiTCP のスローコントロール機能を使用し、外部から UDP で接続することで変更可能である。

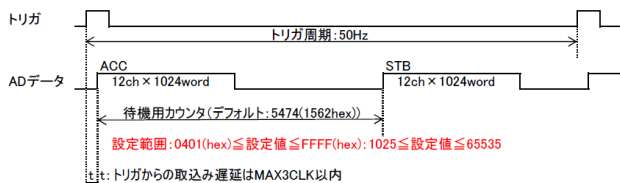


図 3 : データ捕捉のタイミングチャート

FIFO に格納されたデータは、TCP の接続が確立し SiTCP が送信可能な状態で状態であれば、送信バッファに転送され、TCP ホストへの送信が開始される。FIFO が空になり次の外部トリガを検出するとデータの補足を開始、一連の動作を繰り返す (図 4)。ホストへ転送されるデータには、確実に 50Hz で捕捉できているか確認するためのヘッダが挿入される。その内容は、1) ADC チャンネル番号、2) 外部トリガのカウント値、3) イベントコード、である。ホスト側では、カウンタ値を参照して取りこぼしが無いか確認できる。イベントコードを参照し、取得したデータをビームモード毎に振り分けることが可能である。

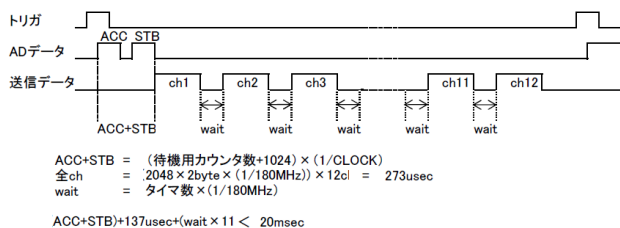


図 4 : データ転送のタイミングチャート

SiTCP を ML605 に実装する上でいくつかの制約があった。そのうちのひとつが MAC アドレスの設定方法で、SiTCP は 3 線式のシリアル EEPROM に

MAC アドレスを含むネットワークパラメータを格納することを前提に設計されているが、ML605 では 2 線式の ROM が用いられている。現状では、ROM からのアドレス設定は行わず、デフォルトの MAC アドレス及び IP アドレスが割り当てられるモードで使用している。今回の使用形態では、汎用的な LAN に接続するのではなく、測定器とホスト間の 1 対 1 の接続でデータ転送用のバスとしてイーサネットを用いるため、このような動作で許容されるが、複数のモニタユニットを接続する場合にはアドレスの重複が起こるので対策が必要となる。

4. イベントレシーバの組み込み

電子入射器ではビームモードとタイミング信号はイベントジェネレータ (EVG) とイベントレシーバ (EVR) とで構成されるイベントタイミングシステムが管理している^[4]。EVG はビーム繰り返し情報を基にイベントコードを生成し EVR に配信する。RF モニタにおけるビームモードの識別は EPICS を経由してソフトウェア上で行うことも検討したが、ML605 は SFP コネクタを装備しており、光トランシーバを装着すればイベント信号を取り込むことは可能である。そこで EVR と同等の機能を FPGA に組み込み、ハードウェアでビームモードの識別が可能か試験した。イベントコードは、高速シリアル通信の protocols である 8B/10B でエンコードされている。そこで、Xilinx の Virtex6 FPGA GTX トランシーバ^[5]による高速シリアル通信インターフェースを組み込むことにした。回路設計は CoreGenerator を使用し、8B/10B デコーダ、ビットアライメント、リファレンスクロックなどのパラメータを設定している (図 5)。

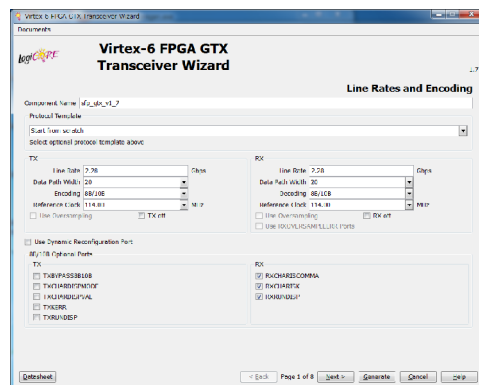


図 5 : GTX トランシーバの設定ウィザード

GTX トランシーバが受信したデータを SiTCP から PC に転送、動作確認を行った。EVG から EVR に配信されるデータを観測するのは電子入射器では初めてのことである。まず、114MHz のリファレンスクロック周期毎に受信されるデータの、ほぼ 2 周期毎に 8B/10B のビットアライメントに用いられる K コードが挿入されていることが判明した。さらに、ユーザーが設定したコードだけでなく、システムが自動的に追加していると思われるコードも観測された。ここでデータの受信自体は正常に行われている

と判断し、ビームモード識別に必要なイベントコードのみを抽出する回路を作成した。GTX トランシーバは 114MHz の繰り返しでデータを受信するが、実際にタイミング制御に関係するイベントコードは 50Hz でしか送られてこない。ビームモードには、4 リング (KEKB e⁻、KEKB e⁺、PF、PF-AR) への通常入射のほか、ビーム入射無しのタイミングを表す No Injection、さらにマシンスタディ用のコードが数種類ある。さらに表 1 に示したように 1 つのビームモードに対して複数のイベントコードが用意されている。今回は各ビームモードのダブルパルス 1st (ACC タイミング) を示すコードを抽出することにした。対象となるコードを検出したら、次の 50Hz トリガまで保持する。抽出したイベントコードを SiTCP で転送、検証した結果、EVG で設定した入射パターンと一致していることが確認された。

表 1 : イベントコードの例

KEKB e ⁺ (41~50) kbp	
41 準備イベント (42の1パルス前に発生)	出力ポート DELAY 設定 (ACC/STB)
42 ダブルパルス 1st. KLY HV	
43 ダブルパルス 2nd	
44 Main G7 Level 信号に使用	DELAY を大きく調整するために使用
45 SHB HV	
46 RF Gun 用	
PF (51~60) pfe	
51 準備イベント (52の1パルス前に発生)	出力ポート DELAY 設定 (ACC/STB)
52 ダブルパルス 1st. KLY HV	
53 ダブルパルス 2nd	
54 Main G7 Level 信号に使用	DELAY を大きく調整するために使用
55 SHB HV	
56 RF Gun 用	

5. 動作試験

SiTCP とイベントレシーバを組み込んだ RF モニタユニット及びデータ取得/保存用の Linux ワークステーションを電子入射器クライストロン室に設置、RF 信号を入力し動作確認を行った。図 6 が得られた I/Q 成分のパルス波形で、2048 ワードのデータの前半分が ACC モードのパルス、後半部分が STB モードのパルスである。50Hz で取りこぼし無くデータ取得でき、イベントジェネレータで設定したビームモード、ビーム繰り返しに対応したイベントコードを正確に読み取れていることを確認した。図 7 は、振幅/位相に変換したパルス波形である。

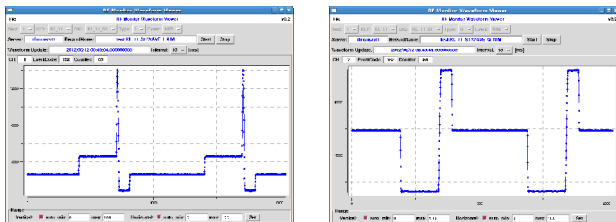


図 6 : クライストロン入力の I/Q 成分

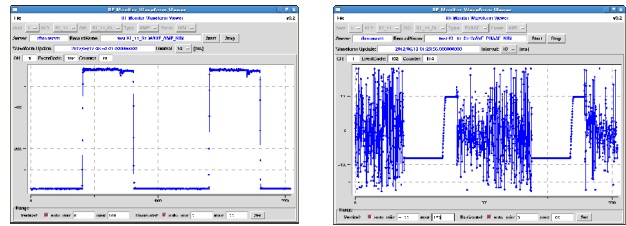


図 7 : クライストロン入力の振幅/位相

次に約 1 週間連続してデータを取得、測定精度および安定度の検証を行った。精度は振幅が 0.3% rms、位相 0.3 度 rms 程度であり、パルス内で平均化することで 0.2%、0.2 度程度に向上はすることも確認できた。この値は 14 ビット分解能の ADC の仕様から予測した値よりも悪い結果ではあるが、RF モニタの仕様としてはパルス内の平均値として 0.3%、0.3 度程度であり、現状でも仕様は満たしている。

既存の VXI 系での測定精度はトレンドデータの解析から、振幅 0.15% rms、位相 0.2 度 rms 程度である。VXI 系では 2 チャンネル入力、8 ビット分解能、最大 1GHz サンプリングのデジタイザにて、パワーセンサ及び位相検出器の出力をサンプリングし、RF の振幅、位相を算出している。位相検出器は 10mV/度で最大 7.2V 出力であるが、電圧レンジを約 400mV に設定し DC オフセット付き計測を行うことで実効的な分解能を向上させている。パワーセンサ出力についても同様である。VXI 系で測定している RF 信号とはソースが異なるため単純に比較はできないが、精度としては若干劣っている。これは、VXI 系では高速サンプリングによる平均化がなされているためと考えられる。次に測定系の S/N を検証するため、

- 1) 2856MHz リファレンス CW を I/Q 検出器に入力
- 2) RF 入力端子を 50 終端
- 3) ADC 入力部を 50 終端

と条件を変えてデータを取得した。結果に明確な差は無いことから ADC で制限されていると思われ、ボードを RF モニタ筐体に組み込む際の接地方法を適切に処理することで改善の余地があると思込んでいる。

6. まとめ

RF モニタユニットに SiTCP とイベントレシーバを組み込み、同時入射で求められている 50Hz でのデータ取得とビームモードの識別が可能であることを確認した。測定精度は、これまでの VXI による測定より若干劣るが、RF モニタに求められている仕様は満たしている。今後は、RF モニタ内におけるボードの接地方法等の改善や測定の平均化等により精度向上を図りたい。さらに、別の用途のために開発中の FPGA ボード及び FMC コネクタで接続される ADC ボードの流用も含め、実用化に向けて開発を続ける。

参考文献

- [1] H. Katagiri, et al., “RF Monitoring System in the Injector Linac”, Proceedings of the 7th international conference on accelerator and large experimental physics control systems, ICALEPCS’99, Trieste, Italy, 1999, pp. 69-71
- [2] Y. Yano, et al., “Development of Compact klystron Drive System and RF Monitor”, Proceedings 8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Tsukuba, August 1-3, 2011
- [3] <http://e-sys.kek.jp/tech/sitcp/>
- [4] 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
- [5] http://japan.xilinx.com/support/documentation/user_guides/j_ug366.pdf