

## SuperKEKB 入射器用高周波モニターシステムの現状

### PRESENT STATUS OF RF MONITOR SYSTEM FOR SuperKEKB INJECTOR LINAC

片桐 広明<sup>#</sup>, 明本 光生, 荒川 大, チュウ フェン, 松本 利広, 三浦 孝子, 道園 真一郎, 矢野 喜治  
Hiroaki Katagiri<sup>#</sup>, Mitsuo Akemoto, Dai Arakawa, Feng Qiu, Toshihiro Matsumoto, Takako Miura, Shinichiro Michizono,  
Yoshiharu Yano

High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

#### Abstract

New RF monitor system for simultaneous injection has been installed at the SuperKEKB injector linac. The event receiver circuit included in RF monitor unit malfunctioned because of phase noise of a reference clock. This problem was improved by changing the clock source. In some region of the linac, amplitude and phase measurement accuracy has deteriorated because of noise of a 2856MHz reference signal.

#### 1. はじめに

高エネルギー加速器研究機構の電子陽電子入射器<sup>[1]</sup>では、複数リングへの同時入射運転に対応可能な高周波モニターシステムの導入を進めている<sup>[1]</sup>。システムを中心となる RF モニターユニットは、アナログ IQ 検出器、ADC ボード、FPGA ボード等で構成される。FPGA にはイベントレシーバ回路(EVR)が組み込まれ、入射器のビームモードやタイミングの制御に使用されるイベントコードを受信することで、ビームモードの識別を可能としている。当初、2014 年 9 月より運用する予定であったが、モニターユニット量産機を現場に設置して動作確認したところ、イベントコードを正確に受信できない現象が発生した。調査の結果、EVR を駆動するクロック信号の位相ノイズが、要求値を満たしていなかったことが判明し、クロック源の変更などの対策を施した。

2015 年 5 月に入射器の大電力クライストロン全数運転に合わせ約 60 台のモニターユニット運用を開始し、入射器運転状態においてユニット全数の振幅・位相測定安定度を検証した。結果、特定のセクターで一律に測定値の偏差が大きかった。測定の基準となる 2856MHz のリファレンス信号に、クライストロン用パルス電源の影響と思われるノイズが乗っていることが原因と見られる。高周波モニターシステムの運用を開始するまでに発生した問題点とその対策について報告する。

#### 2. EVR 用クロックの改善

同時入射運転では、ビーム加速用高周波電力の振幅・位相及びタイミングを 50Hz のパルス毎に制御するため、RF モニターには取得したデータとビームモードごとに振り分けることが求められる。RF モニターユニットの FPGA には Xilinx Virtex6 を搭載した ML605 ボードを使用しており、SFP スロットに光トランシーバを装着することでイベント信号の取り込みが可能であったことから、FPGA に組み込む

EVR を独自に開発することにした。まず、Virtex6 に内蔵された Virtex-6 FPGA GTX トランシーバ<sup>[2]</sup>を用いて FPGA ボード単体で動作する回路を作成、実際にイベント信号を受信してデータのフォーマット等を解析した。次にモニターユニット試作機に EVR を組み込み、設置場所である入射器クライストロンギャラリーで動作確認しながら量産機に組み込む回路の開発を行ってきた。2014 年 8 月に量産機の初回製造分 35 台が納入され同年秋からの運転に導入する予定であったが、現場に設置したのちにイベントコードを正確に検出できない現象が頻発した。原因を調査する中で GTX トランシーバには、ユーザーガイドには記載されていないが、Table 1 のようなリファレンスクロックの位相ノイズに制限があることが分かった<sup>[3]</sup>。

Table 1: Reference Clock Frequency vs. Phase Noise Limit

Ref Clk Freq. [MHz]	Phase Noise Limits in dBc/Hz:						
	10k Hz	100k Hz	1M Hz	10M Hz	20M Hz	30M Hz	40M Hz
100	-126	-128	-130	-135	-136	-140	-144
125	-121	-132	-131	-136	-138	-141	-144
156.25	-119	-130	-130	-135	-136	-140	-143
250	-113	-126	-131	-134	-135	-135	-146
312.5	-110	-125	-132	-135	-135	-135	-135

Figure 1 は入射器のビームモードやタイミングなどを制御するイベントタイミングシステム<sup>[4]</sup>から供給される 114.24MHz のリファレンスクロックの位相ノイズ測定結果である。イベントタイミングシステムのハードウェアは、入射器を長さ方向に 8 つに分割した「セクター」と呼ばれる区域毎に設置されており、複数個所で測定を行っている。図中の黒点は Table 1 から 100MHz での位相ノイズ制限値をプロットしたものであり、測定結果が GTX の仕様を満たしていないことが判明した。

<sup>#</sup>hiroaki.katagiri@kek.jp

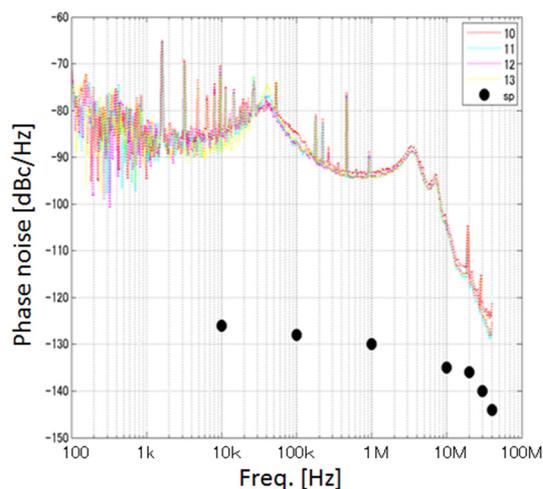


Figure 1: Phase noise of 114.24MHz clock delivered from event-timing system.

イベントタイミングシステムのリファレンスクロックに代わり、GTX の仕様を満たすクロック源を検討した結果、入射器のタイミング制御などの目的で各セクターの副制御室分配していた 571.2MHz を 5 分周した 114.24MHz を使用することにした。Figure 2 はその際の測定結果で、凡例の 32 (青実線) が分周器の LVPECL 出力 (114.24MHz) である。34,36 (黄、緑) は RF モニターユニットが設置された計測ラックまで伝送した信号である。Figure 1 と同様にプロット GTX の仕様 (黒点) と比較すると 10kHz 以下では制限値を僅かに超えているが、概ね許容範囲と判断した。

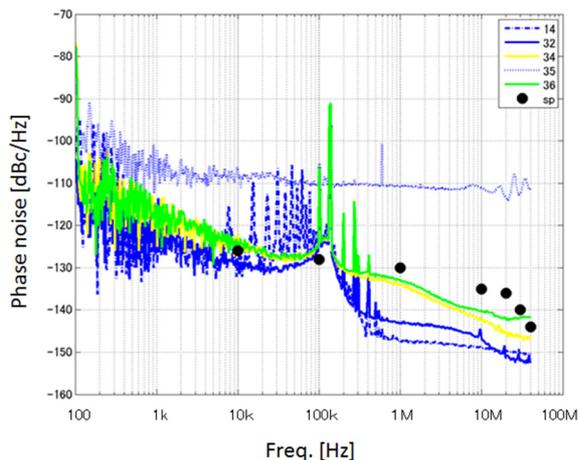


Figure 2: Phase noise of 114.24 MHz clock which is divided from 571.2 MHz signal.

なお副制御室から計測ラックの間は最長で 60 m 程度のケーブル長があることを考慮して CML 規格で伝送し、ラック内で LVDS に変換して RF モニターユニットに入力する形を採っている。これらのレベル変換器や同軸ケーブルなどは、イベントタイミングシステムからのクロックを分配するために用意し

たものを流用している。今回の測定で、114.24MHz クロックが RF モニターユニット内の LDVS バッファを経由すると位相ノイズが悪化することも判明した (Figure 2 の凡例 35、青点線)。周辺回路に原因があると推測されるがハードウェアの改修等は施さず、バッファを介さずに LVDS を直接 FPGA ボードに入力し、この問題を回避することにした (Figure 3)。



Figure 3: 114.24MHz clock signal input to FPGA.

### 3. システムの構成

2015 年 2 月に RF モニターユニット追加分 35 台が納入され、大電力クライストロン全数分、約 60 台分のモニターユニットを運用できる体制が整った。RF モニターユニットは 5 チャンネルの入力信号の同時計測が可能であり、大電力クライストロン、SLED (進行波及び反射波)、加速管出力の各モニター信号が接続される。さらに、次章で述べる測定安定度評価の目的で、計測ラック内で分岐した 2856 MHz リファレンス信号 (CW) も入力している (Figure 4)。Figure 5 はシステムの主要部を収納する 19 インチラックの写真である。2 台の RF モニターユニット、EPICS IOC となるラックマウントサーバー、クロック分配用の NIM モジュールなどが設置されている。

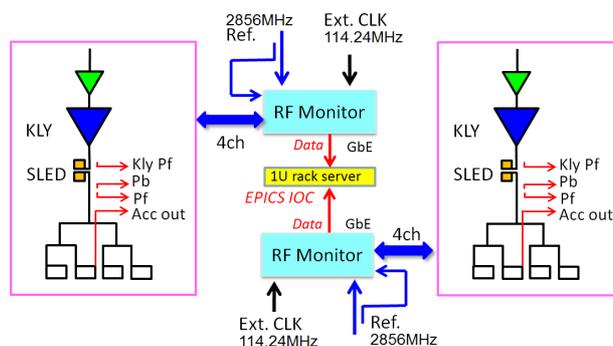


Figure 4: Block diagram of RF monitor system.



Figure 5: Layout of RF monitor rack.

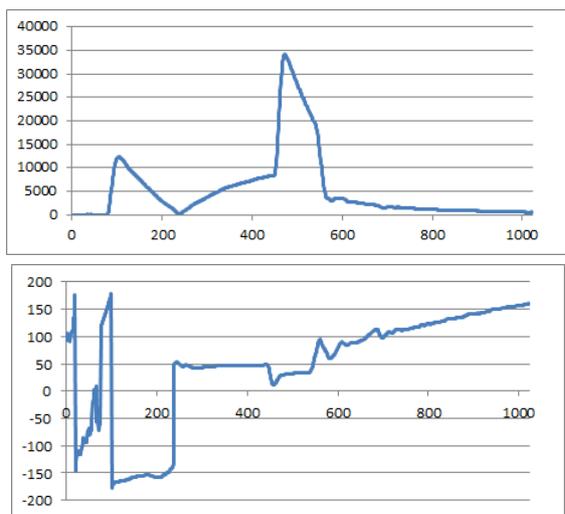


Figure 6: Sample of amplitude/phase waveform.

Figure 6 は RF モニターユニットが取得した SLED 出力進行波の測定結果である。

#### 4. 測定安定度評価

クライストロンギャラリーにおいて、大電力クライストロン運転時の環境下での安定度を評価するため、リファレンス信号入力チャンネルの波形データを取得し、パルス測定範囲内（加速モード、待機モード合わせて約  $18\mu$  秒）での振幅・位相測定安定度を算出した。その結果、特定のセクターを除いて振幅安定度  $0.2\%$ rms 以下、位相安定度  $0.1$  度 rms 以下であった。A,B,C,1,2,3,4,5 と 8 分割されたセクターのうち上流から 2 番目の B セクターでは、振幅安定度が  $0.6\%$ rms 前後と、目立って悪い結果となり、振幅波形をプロットすると、B セクター内の 8 台のモニターユニット全数で Figure 7a のように加速モードタイミングにノイズが乗った状態であることが分

かった。リファレンス信号をピークパワーセンサで観測しても同様のノイズが確認された。入射器の全クライストロン高圧 OFF した状態では Figure 7b のようにノイズは治まっており、安定度は他のセクターとほぼ同じ結果となったことから、パルス電源高圧が影響していると考えられる。特に影響の大きいパルス電源は特定されているが、対策については今後検討する必要がある。

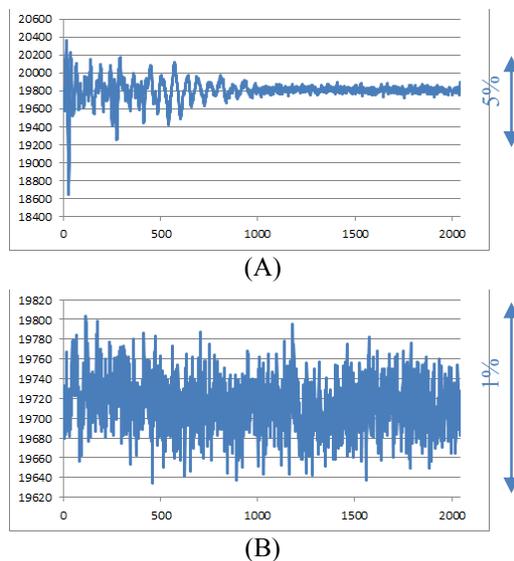


Figure 7: Influence of noise by pulsed modulator.

パルス測定領域内での安定度のほか、測定値を EPICS アーカイブに登録し、長時間運用時の履歴についても調査した。Figure 8a は入射器最上流部、A セクターで測定したリファレンス信号の振幅（赤）・位相（青）の履歴で、48 時間分のデータを表示している。パルス内の一定区域のデータを平均化しており、位相測定では  $0.1$  度未満の変化も十分に検出可能な分解能があることがわかる。振幅・位相ともに約 1 時間弱の周期的な変動がみられた。途中に周期的変動が収まっている時間帯があるが、これは入射器上流部（A~2セクター）のクライストロンを停止している期間である。周期的変動は特に位相の方に顕著に表れており、変動幅は  $0.2$  度弱である。次に位相変動の温度依存性を確認するため、RF モニターユニットを設置している計測ラック内の温度測定値（Figure 8b）と比較すると、温度と位相測定値に明確な関連性があることが分かった。ただし、リファレンス信号はモニターユニットの直前で分岐し LO 及び TEST ポートに接続していることから、実際に  $0.2$  度の変化があるとは考えづらく、IQ 検出器や ADC を含めた測定系の温度特性によるものと思われる。例として挙げた A セクター最上流部には他の区域とは独立した空調設備があり、その ON/OFF 制御と連動した温度変化が特に大きい。他の場所では、Figure 8 ほど明確な変動は確認されていない。

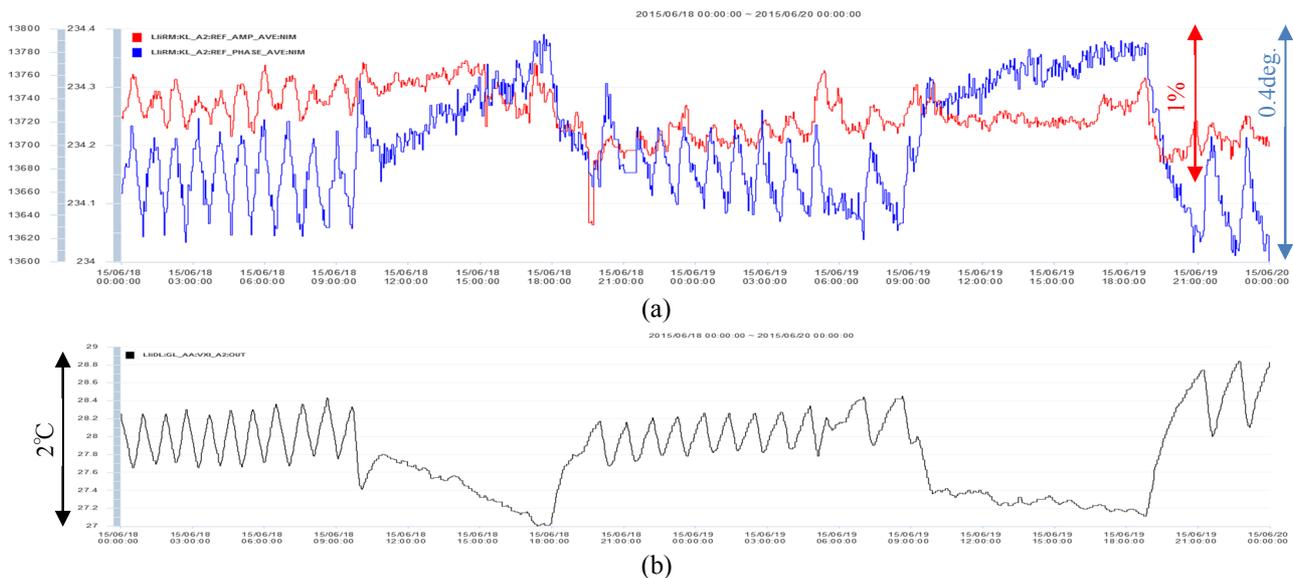


Figure 8: Correlation between a result of measurement and the temperature.

## 5. まとめ

RF モニターユニットに組み込んだ EVR の不具合は、リファレンスクロックの位相ノイズが回路の要求値を満たしていなかったことが原因であり、クロックの供給源を入射器のタイミング制御に用いていた 571.2MHz から 5 分周した 114.24MHz とすることで解決した。571.2MHz のドライバ系が今後継続して保守される予定が無いこと、クロック分周に使用しているハードウェアも暫定的な構成であることから、長期的に安定した運用が難しい。571.2MHz の伝送ラインを流用しドライバを 114.24MHz に入れ替え、EVR に 114.24MHz クロックを直接供給することを検討している。

B セクターで確認された 2856MHz リファレンスラインのノイズについては、大電力クライストロン用パルス電源ノイズが混入しており、特に影響が大きいユニットも特定されている。ノイズの混入経路は未だ明らかになっておらず、2015 年後期の運転が開始されてから引き続き調査、対策を行う予定である。

## 参考文献

- [1] Xiangyu Zhou et al., “Present Status of the KEK Electron/Positron Injector Linac”, Proceedings of this Meeting.
- [2] H.katagiri, et al., RF Monitor System for SuperKEKB Injector Linac, Proceedings 8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Aomori, August 9-11, 2014.
- [3] [http://japan.xilinx.com/support/documentation/user\\_guides/j\\_ug366.pdf](http://japan.xilinx.com/support/documentation/user_guides/j_ug366.pdf)
- [4] <http://japan.xilinx.com/support/answers/38506.html>
- [5] 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.