

# KEK 電子陽電子入射器の高周波モニタシステムの校正 CALIBRATION OF RF MONITORING SYSTEM IN KEK INJECTOR LINAC

片桐広明<sup>#</sup>, 荒川大, 松本利広, 三浦孝子, 矢野喜治  
Hiroaki Katagiri<sup>#</sup>, Dai Arakawa, Toshihiro Matsumoto, Takako Miura, Yoshiharu Yano  
High Energy Accelerator Research Organization

## Abstract

The RF monitor system at the KEK injector linac constantly monitors the monitor signals of 60 high-power RF sources. The RF monitor unit acquires the IQ signals converted to baseband by the IQ detector using a 14-bit ADC. The measurement results are provided in a 14-bit unsigned integer format, which is inconvenient for linac operators. We are considering to convert from measured integer values to actual RF power. First, the attenuation of the transmission path of the RF monitor signal must be calibrated. Calibration of the installed RF cables was achieved by measuring the reflection coefficient with the S11 of a network analyzer. Next, the input/output characteristics of the RF monitor unit must also be calibrated. The monitor unit was calibrated using a power sensor, and the input/output characteristics were fitted to a quadratic function. The actual input power of the monitor unit can be converted from a 14-bit unsigned integer using a quadratic function.

## 1. はじめに

KEK 電子陽電子入射器の高周波モニタシステム[1]は、約 60 台の大電力高周波源のモニタ信号を常時監視している。システムの中核となる RF モニタユニットは、イベントタイミングシステムと同期して高周波源の振幅・位相を測定する。主なモニタ信号は大電力クライストロン出力、SLED (パルス圧縮器) 出力、加速管透過出力である (Fig. 1)。RF モニタユニットはアナログ IQ 検出器でベースバンドに変換した I,Q 信号を 14 ビット ADC で捕捉する。EPICS の IOC となるサーバー計算機上で I,Q 信号から振幅・位相に変換される。振幅測定値については ADC 分機能に由来する 14 ビット符号なし整数形式で取り扱っている。これは 50 Hz で確実にデータ取得するために演算速度を重視してのことであるが、実際の RF 電力には比例せず、ユーザーにより分かりやすい実電力 (MW) 表示も提供することにした。これには、モニタ信号伝送経路の減衰量の校正、RF モニタユニットの入出力特性の校正が必要となる。本稿では、この 2 点の校正作業について述べる。

## 2. S11 によるケーブル減衰量測定

RF モニタ信号の伝送経路での減衰量は、1)ベータホールカプラ結合度、2)カプラから計測ラックまでの同軸ケーブル、3)計測ラック内ケーブルと固定減衰器、の 3 系統に分けて管理することにした。同軸ケーブルや減衰器の減衰量測定はネットワークアナライザの S21 で透過係数を測定する方法を用いることが多い。ただし加速管透過波モニタケーブルは入射器地下トンネルから地上階まで、概ね 15~25 m に渡り敷設されている。このようなケースでは 2 ポートを使用する S21 測定が困難なため、Fig. 2 のように S11 で反射係数を測定する方法を試みた。ケーブル終端にショートコネクタを接続して全反射させ反射係数から求めた減衰量の 1/2 をケーブルの挿入損とする考え方である。



Figure 2: Measuring cable attenuation using reflection coefficient.

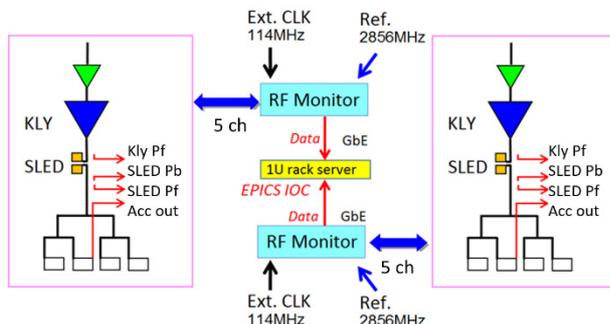


Figure 1: Block diagram of RF monitor system.

S11 で観測される反射波にはショート端での反射成分のほかにケーブル入力側コネクタやケーブル内部 (主に屈曲部) での反射成分も含まれ、各々の位相関係により反射係数が変化するため、1 点の測定だけでは正確な値は得られない。解決策の一つに反射位相を 360 度振り極座標上で反射係数の円を描かせ、その半径を求める方法がある。この理論に基づき可変長同軸管型移相器を用いて反射係数円を描かせる方法は J-PARC[2]や KEK の STF (超電導リニアック試験施設)/cERL (エネルギー回収型線形加速器) で実績がある。周波数は J-PARC が 972 MHz、STF/cERL がともに 1.3 GHz であるのに対し、2856 MHz の入射器では同型移相器では十

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

分な測定精度得られなかった。そこで位相を振るのではなく周波数を変化させることで極座標上で反射係数円が得られないか検証した。

検証には入射器の LLRF 系で幅広く使用しているコルゲートケーブル ANDREW 社 LDF2RK-50、実測 28 m のものを用い、束ねた状態で S21、S11 両方の測定を行った。LDF2RK-50 は波長短縮率が 85%であり、ケーブル内での波長は 2856 MHz で 8.905 cm となる。2866 MHz では 8.874 cm と、28 m 内に約 1 波長多く収まる計算となり、2856 MHz で 360 度位相を振るのと同様な結果が得られると推測した。

Figure 3 上は周波数 center:2856 MHz、Span:10 MHz に設定し S11 で反射係数を極座標表示したもので、推測通り円が描かれた。反射波は 28 m を往復しており 2 周分の円が描かれている。Figure 3 下は反射係数を LinearMag 表示したものである。単純に実部、虚部の座標で計算しており、反射係数円中心の座標原点からのズレは考慮されておらず、測定点により反射係数に増減があることがわかる。

Figure 4 は極座標表示の測定結果を Excel に取り込み 2856 MHz を中心に円 1 周分の領域を切り出したものである。実部と虚部、各々の最大値と最小値から円の半径を算出し、減衰量に変換すると -5.528 dB となった。S21 での測定結果 -5.527 dB の 0.2% 差に収まり、有効な測定方法であると判断した。

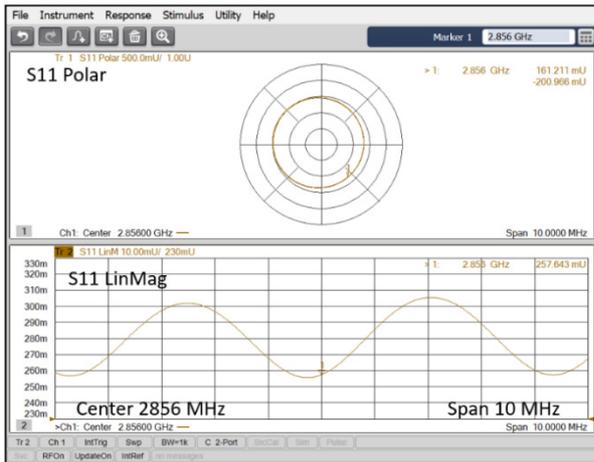


Figure 3: Measurement result of S11 reflection coefficient.

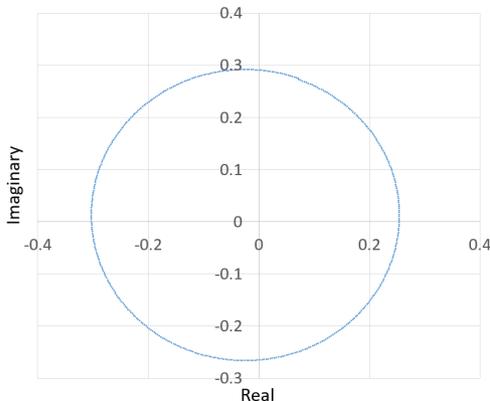


Figure 4: Reflection coefficient circle.

### 3. RF モニタユニットの校正

RF モニタユニットは Fig. 5 に示した通り、ダブルバランスミキサ (Hittite 社 HMC340LP5) と 90 度ハイブリッドカプラを組み合わせた IQ 検出器にて、ベースバンドに変換した I 成分・Q 成分電圧出力 (+1V~-1V) を 14 ビット ADC (ANALOG DEVICES 社 AD9254) でサンプリングする構成となっている。先に述べた通り振幅測定値は 14 ビット幅符号なし整数で提供している。

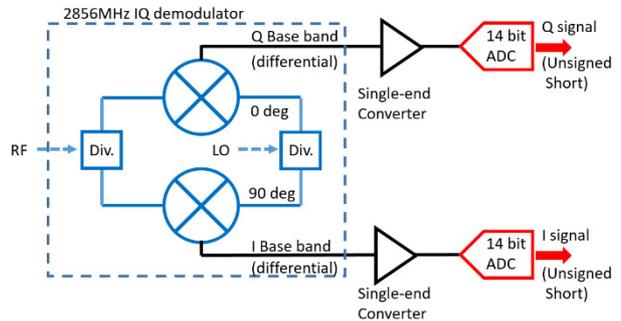


Figure 5: Front end and data acquisition part of the RF monitor unit.

RF 実電力 (mW) 表示のためには RF モニタユニットの入出力特性を校正し、振幅測定値から RF 入力電力に換算できるようにする必要がある。今回は、Fig. 6 に示した測定系を組み、校正を行った。可変減衰器で RF 入力を変化させながら入力電力と振幅測定値を取得する。パワーセンサは Agilent (現 Keysight) U2021XA、USB 接続のものを使用した。RF モニタユニットが測定した I、Q 信号には IQ 検出器や ADC の DC オフセットを含んでいる。実際の運用では RF パルスを入力しており、パルス波形のベースラインをゼロと定義することでオフセット分をキャンセルしている。今回の校正は CW 入力で行うため、RF 入力端子を 50 Ω 終端した状態で取得したデータをオフセットとした。

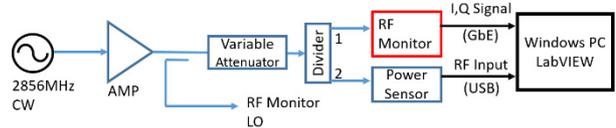


Figure 6: Calibration of the RF monitor unit.

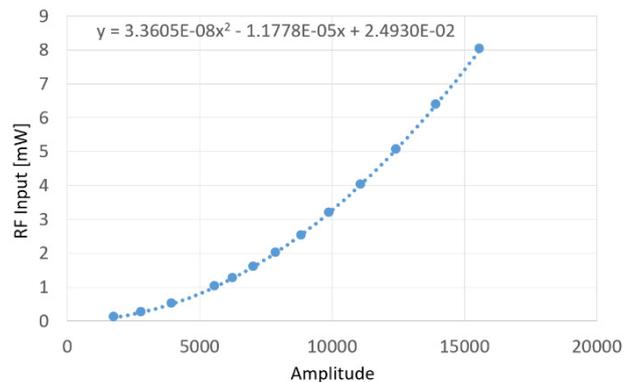


Figure 7: Input/output characteristics of RF monitor unit.

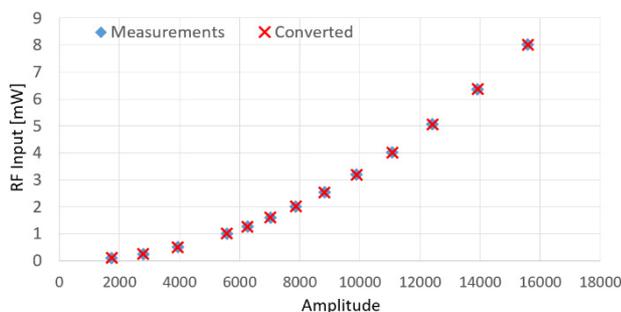


Figure 8: Comparison of measured and converted value.

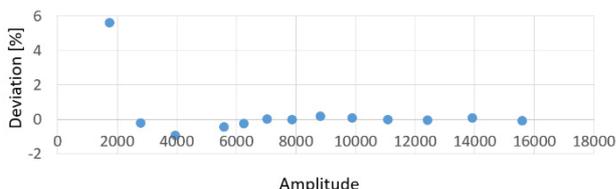


Figure 9: Deviation of converted RF input power.

Figure 7 は IQ から変換した振幅測定値とパワーセンサで測定した RF 入力電力をプロットしたもので、二次曲線的な特性となった。これはダブルバランスドミキサの非線形な入出力特性に起因するものと思われる。振幅測定値から RF 実電力に変換するには、この測定データから変換テーブルを作成する方法もあるが、データ量が大きくなること、中間値については補完処理が必要になることから、今回は近似曲線から変換式を求めることにした。Figure 7 の破線が Excel で近似曲線 > 多項式 > 次数 = 2、と設定し得られた 2 次関数曲線である。

次に、関数から入力電力への換算精度を検証した。Figure 8 はパワーセンサによる測定値と、関数から求めた換算値を比較したものである。Figure 9 は測定値を基準とした場合の、換算値の誤差である。0.1 mW 程度で

は約 6%と特に大きいのが、それ以上の領域では改善し 3 mW 以上では 0.1%以下に収まっていた。通常 RF モニタユニットは振幅測定値 8,000~14,000 程度の領域で使用しており、実用上十分な変換精度が得られると判断した。

#### 4. まとめ、今後の予定

RF モニタユニットの振幅測定値から大電力高周波源の実電力表示に換算する作業を進めている。RF モニタ信号の伝送経路での減衰量のうち、長距離敷設された同軸ケーブルについてはネットワークアナライザで周波数を振り S11 反射係数をする方法が有効であることが確認された。位相を振る方法と比較し容易に、短時間で測定できることは大きな利点であると考えている。ただしケーブル長が短くなるほど、1 波長分の変化を得るために周波数スパンを大きく設定しなければいけない欠点がある。また据え置き型ネットワークアナライザを現場に持ち込み移動させながら作業することは、故障や測定精度悪化のリスクがあり、ポータブル型測定器で同程度の精度が得られるか確認する予定である。

モニタユニットの入出力特性校正はパワーセンサを用いて行い、振幅測定値から近似曲線から求めた算数で RF 入力電力に換算する方法を検証した。実用領域においては十分な換算精度であることが確認された。今後は複数の RF 入力チャンネルを同時に校正できる測定系を組み、作業の省力化を進める。

#### 参考文献

- [1] H. Katagiri *et al.*, “RF Monitor System for SuperKEKB Injector Linac”, Proceedings of the IPAC’18, Vancouver, Canada, Apr.-May 2018, paper WEPAK016.
- [2] K. Futatsukawa *et al.*, “Precise Measurement of the Installed Cable Attenuation”, Proceedings of the 9th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, August 8-11, Osaka, Japan, 2012, paper WEPS123.