

Calibration Method of RF Amplitude/Phase Detector by using Signal Generator

Takashi Ohshima¹, Hirokazu Maesaka, Naoyasu Hosoda, Shinichi Matsubara and Yuji Otake
RIKEN, XFEL Joint Project /SPRING-8

1-1-1 Kouto, Sayo-cho, Sayo-gun, Hyogo, 679-5148, Japan

Abstract

To achieve stable operation of XFEL/SPRING-8, it is needed to stabilize an rf phase and amplitude by feedback control. For this purpose, an IQ detector and a fast 12-bits ADC module were developed. The detection linearity of a phase and amplitude of the detector is demanded for the feedback control and beam tuning. We measured detection errors, such as non-linearity, of the rf phase and amplitude of the detector by only using a signal generator, instead of a complex network analyzer system. The merit of this method is a simple measurement apparatus configuration, fast data acquisition time and in-situ calibration at a practical position in a 19" rack to install the detector. The key point is we can sweep the input phase by feeding a frequency-shifted signal to the rf input port of the IQ detector. The errors measured by a 5.7GHz detector with this method were $\pm 6\%$ in amplitude and ± 3 degree in a phase. These errors were corrected up to $\pm 0.5\%$ and ± 0.15 degree along the whole detection range of the detector phase by applying a correction algorithm for an offset error and a gain error along I and Q detection axis, and the phase error between the I and Q axes from right angles.

シンセサイザーを用いた高周波振幅・位相信号検出器の校正方法

1. はじめに

XFEL/SPRING-8では、8GeVの高エネルギー、数10fsの短バンチ長、3kAの高ピーク電流の電子を用いて、SASEの原理により波長が0.1nmオーダーのX線を発生させる。このような短バンチ、高ピーク電流のビームを実現するためには、加速空洞の高周波の位相、振幅を高い精度で制御する必要がある。従来の入射器用の線型加速器では、応答の遅い機械型の移相器などが使用されていた。しかしXFELの線型加速器では、その要求精度が厳しく帰還制御を多用せざるをえない。そのため、加速器の60Hzなどの繰り返しに対応できる高速制御応答をもち、高周波位相と振幅がベクトル量として同時に簡便に測定できる検出器が必要である。そこで、我々は、XFEL用にIQ検出器の開発を行った[1,2]。もし、IQ検出器の読み取り位相、振幅において、空洞に実際に入力されているRF信号の位相、振幅からの偏差がある場合、または位相・振幅で相互独立でなく相関がある場合、さまざまな問題が発生する。たとえば、加速空洞の位相および振幅を安定化させるために、検出器の信号を基にそれぞれの値を安定化させる帰還制御プロセスが導入されているとする。このとき、IQ検出器の位相と振幅が線形・独立パラメータでないと、位相制御において設定位相を変化させることが振幅制御に対して影響を与えることになり、帰還制御の制御性の悪化を引き起こす。また、たとえば、ビームの速度バンチングを行う加速空洞に対して0.5度ステップで位相を動かしてビームのエネルギープロファイルを分散部で観測することがある。このときに先の偏差・相互相関があると、位相を動かすこと

により振幅も変化してしまい、位相のみを変化させた測定とならない。こうして測定したビームの空洞位相変化に対する応答は、想定しているビームの応答とは異なったデータとなり結果の解析に支障をきたす。このため、IQ検出器のIとQ成分の直交性（独立性）などをチェックする校正を行い、検出の線形性や直交性を確保できるようにプログラムで補正を行うことは、重要である。以下の章ではIQ検出器の偏差発生の要因、偏差の大きさの測定方法、校正測定の結果、校正データによる直交性を確保するための補正結果について述べる。

2. 偏差測定

2.1 偏差の発生要因とその補正

SPRING-8で現在建設中のXFEL加速器では、5.7GHz信号の振幅/位相測定にIQ検出器を用いる。図1にIQ検出器の構成概念図を示す。基準信号は90度の位相

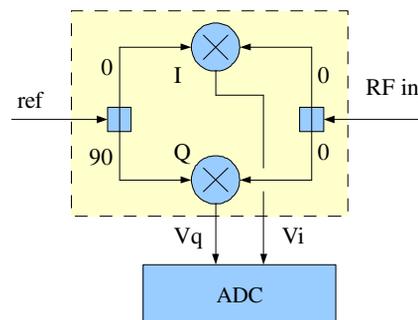


図1 IQ検出器とADCで構成されたRF検出器。

¹ E-mail: ohshima@spring8.or.jp

差を持った2つの信号 (IとQ) に分岐され、入力RF信号は0度の位相差の2つの信号に分岐される。これらの信号は2つのミキサに入力され、それぞれのベースバンド出力 (V_i, V_q) は238MHzのクロックでサンプリングを行う12bitADCでデジタル信号に変換される[3]。このADCを用いることにより4.2ns間隔で2048ポイントの連続した波形データを60Hzの繰り返し周波数で取得することができる。このRF検出器において偏差の発生する要因としては、次の項目が挙げられる。

1. オフセット誤差：IQ検出器、ADCのベースバンド回路の増幅器のオフセット電圧、IQ検出器の基準信号のRF入力へのもれこみなど。
2. ゲイン誤差：IQ検出器、ADCのベースバンド回路の増幅器のゲイン誤差など。
3. IQ軸の直交度からのずれ：IQ検出器の基準信号分配器の90度からのずれ。

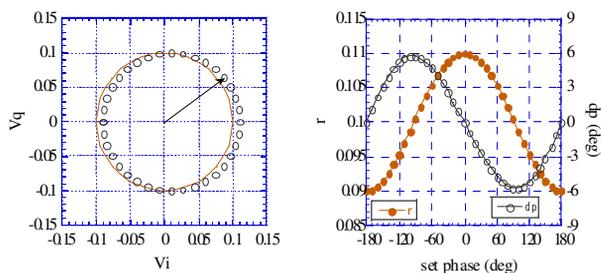


図2 0.1Vの振幅のRF信号に対して10mVのオフセット電圧がI軸にある場合の振幅偏差と位相偏差。

例として10mVのオフセット電圧が V_i にあるRF検出器に対して、0.1Vの振幅のRF信号を入力し位相を変化させた場合の振幅偏差、位相偏差を図2に示す。このデータは位相に対して周期性を持つ。そこで、その振幅偏差、位相偏差を数値的に補正するためには、偏差をフーリエ展開し、その係数を用いることが考えられる。また、このフーリエ係数と上記の誤差要因とは関連付けを行うことができる。1次の実(虚)部フーリエ係数 $Dr[1]$ ($Di[1]$)はI軸、Q軸のオフセット V_{i_ofs} , V_{q_ofs} と関連付けられる。同様に2次の実(虚)部フーリエ係数 $Dr[2]$ ($Di[2]$)はI,Q軸の相対的な利得誤差 V_{q_g}/V_{i_g} およびIQ軸の直交度からのずれ $Tilt$ と関連付けられる。こうして求めた誤差を用いて、IQ検出器の読み取り値を補正することができる。例として振幅偏差 dr に対するDFTフーリエ係数 $D(n)$ と各誤差との対応を以下に示す。

$$\begin{aligned}
 dr &= r_{meas} / r_{ave} - 1, \\
 V_{i_ofs} &= -2 * Dr(1) * V_{ave}, \\
 V_{q_ofs} &= 2 * Di(1) * V_{ave}, \\
 V_{i_g} / V_{q_g} &= 4 * Dr(2), \\
 Tilt &= -4 * Di(2).
 \end{aligned}$$

2.2 シンセサイザーを使った偏差測定

高周波装置の位相・振幅測定にはネットワークアナ

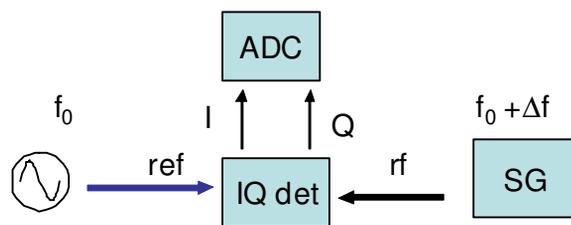


図3 シンセサイザーを用いた検出器の誤差測定の設定アップ。

ライザを用いた測定がよく行われるが、この方法では、測定系が複雑になること、測定に時間がかかることなどのいくつかの問題点があった。そこで、我々は、通常のラックへの実装状態とほとんど変わらない状態で検出器の偏差を測定する方法の開発をめざした。図3にその測定セットアップの概念図を示す。シンセサイザーを用いて、基準信号に対して Δf だけ周波数の異なった信号を発生させる。この信号を検出器に入力した場合、検出器出力を一定の時間間隔 Δt で測定すると、検出位相が1次関数で徐々にシフトするものとなる。その検出器での測定結果は、一定の位相間隔 $2\pi \times \Delta f \times \Delta t$ で振幅、位相の測定を行ったことと等価となる。検出器が理想的であれば、検出器の読み取り振幅ほどの位相に対しても一定の値となる。また、位相に対しても、直線的に変化することが期待される。その予想値からのずれを求めることにより、検出器の振幅・位相偏差を得ることができる。この方法では、特別な変調器を用意しなくても、シンセサイザーのみで構成された単純なシステムで偏差データの取得が可能である。たとえば、基準信号5.712GHzに対して、 $\Delta f = 0.2\text{MHz}$ だけずれた周波数の信号をRF信号として検出器に与えた場合について考えてみる。ADCのサンプリングレートは238MHz、波形データのポイント数は2048なので、位相測定間隔は、 $2048/238\text{MHz} * 0.2\text{MHz} = 1.7$ 周期分のデータをADCで取得すると、 $1.7 * 360\text{度} / 2048 = 0.3\text{度}$ になる。このデータは1波形を取得するだけで得ることができるため、データ収集に要する時間が非常に短くできる。

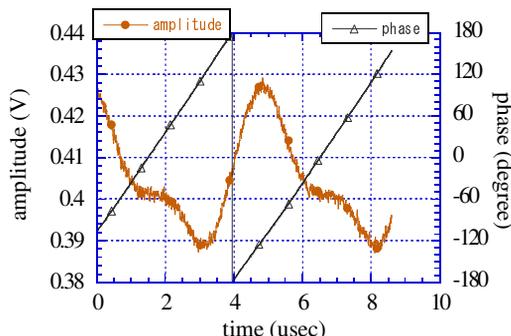


図4 基準信号に対して0.2MHzずらせた信号を入力した場合にIQ検出器から得られた波形データ。赤丸：振幅信号、黒三角：位相信号。

3. IQ検出器の振幅/位相偏差の測定

5.7GHz用IQ検出器とADCを組み合わせたあるユニットについて、入力信号位相を変化させた場合の振幅・位相に対する検出器出力信号の偏差の測定を2.2節で述べた方法を用いて行った。基準信号に対して周波数を+0.2MHzシフトさせた信号をIQ検出器に入力した。このときに得られた波形データを図4に示す。位相が直線的に変化している様子が見られる。図4に示した波形データについて2 μ s付近の100ポイントの測定点について振幅測定値のばらつきを求めたところ標準偏差で1mV、位相のばらつきは標準偏差で0.3度であった。図4と同様の測定を3回繰り返して得られたデータを用いて、検出器の読み取り位相を変数として、振幅の平均値からのずれ Δr 、周波数シフトとADCサンプリングレートから想定される位相変化からのずれ Δp を求めた結果を図5に示す。図5は、読み取り位相が-180度から+170度まで10度ステップで測定値をサンプルした結果を示している。振幅の偏差 Δr はおおよそ $\pm 6\%$ 、位相の偏差 Δp はおおよそ ± 3 度となっている。各測定位相での振幅測定値のばらつきは最大で1%、位相のばらつきは1度程度であった。

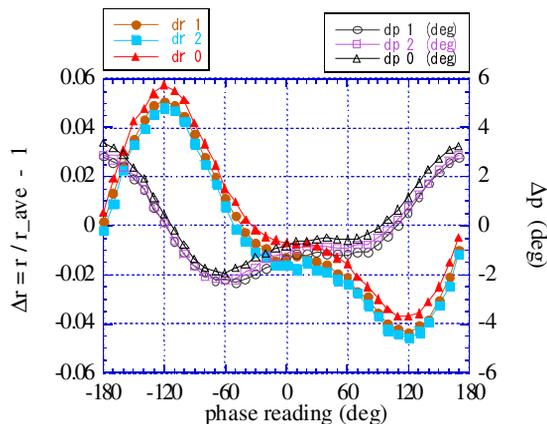


図5 波形データから算出した振幅偏差（塗りつぶし記号、左軸）と位相偏差（中抜き記号、右軸）。

4. 偏差の補正

図5に示される-180度から+170度までの位相範囲で10度ステップでの測定した36点の読み取り位相における振幅、位相誤差データに対して、フーリエ変換を行った。1次のフーリエ係数からオフセット電圧を、2次のフーリエ係数はI、Q軸の相対的なゲイン誤差と、I、Q軸の直交度からのずれを求めた。これら値を用いて測定値を補正した。結果を図6に示す。補正後の残差は振幅 $\pm 0.5\%$ 、位相は ± 0.15 度以下に抑えることができています。

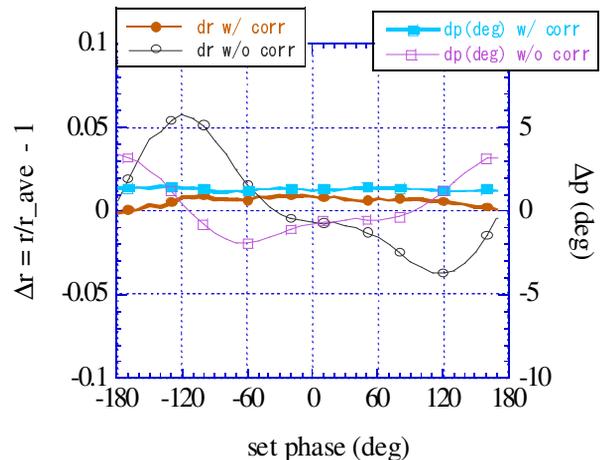


図6 振幅、位相偏差について誤差要因を用いて補正した結果。塗りつぶし記号：補正あり、中抜き記号：補正無し。

5. まとめ

IQ検出器、ADCで構成される高周波検出器について、入力信号の振幅/位相偏差の測定を行った。シンセサイザを用いることにより、ネットワークアナライザを用いた測定に比べて高速で簡便に偏差の測定を行うことができた。測定した結果、振幅偏差は $\pm 6\%$ 、位相偏差は ± 3 度であった。この測定結果を基に補正を行った結果、振幅偏差を $\pm 0.5\%$ 、位相偏差を ± 0.15 度に収めることができた。

今回は5.7GHzの高周波検出器について偏差の測定および補正を行ったが、XFELのプロトタイプ加速器SCSSのサブハーモニックバンチャ用の238MHz、476MHzなどの周波数のIQ検出器に対してこれらの測定・補正を行い実運転での有効性の確認を行いたい。

参考文献

- [1] SCSS X-FEL Conceptual Design Report, pp 81-89
- [2] T. Ohshima et al., "XFELに向けた低電力システムの改良", 第4回加速器学会年会, 和光, 2007, pp 559-561
- [3] T. Fukui et al., A Development of High-Speed A/D D/A VME Boards for a Low Level RF System of SCSS, Proc. of the 9th ICALEPCS 2005.