

PRECISE RF CONTROL SYSTEM OF THE SCSS TEST ACCELERATOR

Hirokazu Maesaka^{1,A)}, Takashi Ohshima^{A)}, Naoyasu Hosoda^{A)}, Toru Fukui^{A)}, Takahiro Inagaki^{A)}, Sunao Takahashi^{B)},
Teruaki Hasegawa^{B)}, Shin-ichiro Tanaka^{B)}, Masanobu Kitamura^{C)}, Yuji Otake^{A)} and Hitoshi Tanaka^{A)}

^{A)} RIKEN, XFEL Joint Project / SPring-8

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

^{B)} JASRI, XFEL Joint Project / SPring-8

1-1-1 Kouto, Sayo-cho, Sayo-gun, Hyogo, 679-5198, Japan

^{C)} Nichizou Electronic Control Corporation

5-3-28 Nishi-kujo, Konohana-ku, Osaka-shi, Osaka, 554-0012, Japan

Abstract

We present development and performance of the low-level rf control system of the SCSS test accelerator. The low-level rf system consists of IQ modulators / demodulators and VME waveform generators / digitizers. Recent improvements of them established high-resolution phase and amplitude setting capabilities of 0.01 degree and 0.01%, respectively. In addition, temperature drifts of the injector acceleration cavities were reduced by tuning a precise temperature regulation system. The temperature fluctuation was improved to be 0.01 K rms. As a result, the rf phase and amplitude stabilities of sub-harmonic buncher cavities were achieved to be 0.02 degree rms and 0.03% rms, respectively. The saturated FEL radiation in the wavelength region of 50–60 nm is stably generated by this improvement.

SCSS試験加速器のRFシステムの高精度化

1. はじめに

X線自由電子レーザー(XFEL)の試作機として作られたSCSS試験加速器が運転されており、真空紫外線領域のFEL光がさまざまな実験に利用されている。一般に短波長のSASE (Self-Amplified Spontaneous Emission) FELでは高いピーク電流(>1kA)で低エミッタンス($\sim 1\pi$ mm mrad)なビームが必要である。そのような高品質電子ビームを安定に生成するには加速RFの位相や振幅を精密に制御しなければならない。われわれのシステムでは熱電子銃からの約1Aのビームをサブハーモニックバンチャによる速度変調バンチャングと磁場シケインによるバンチャ圧縮をすることにより数kAのピーク電流を得なければならない。このようにバンチャ圧縮率が非常に高いため、サブハーモニックバンチャ空胴やシケイン上流の加速管に蓄積されたRFの位相・振幅が少しでもずれるとすぐにピーク電流が下がったりエミッタンスが悪化したりして、安定なFEL光が得られない。シミュレーションによると位相の許容差は時間にして100fs以下である。これは238MHzバンチャ空胴の位相で0.01度、5712MHz主加速管の位相で0.2度に相当する。SCSS試験加速器の建設時はまだこれを満足する技術が確立していなかったため許容差を1ps未満に設定してデザインをおこなった。しかし、この性能では真空紫外線FELの増幅を観測できたが飽和を達成することができなかった。そこで、われわれはRFの設定・検出分解能を上げたり、空胴の温度安定度を改善したりして加速RFの安定化をおこなった。本稿ではこれらの改良点とその性能について述べる。

¹ E-mail: maesaka@spring8.or.jp

2. RFシステム

SCSS試験加速器のRFシステムのブロック図を図1に示す。マスターオシレータから位相ノイズの小さい基準RF信号が配られる。IQ (In-phase and Quadrature-phase) 変調器[2]を使って基準RF信号からしかるべき位相・振幅をもったパルスRF信号を生成する。IQ変調器に供給するベースバンド信号の波形はVME高速D/A変換ボード[3]から出力する。得られたパルスRF信号は半導体増幅器、IOT、クライストロンなどで大電力に増幅されて加速空胴に印加される。加速空胴のRFのごく一部はとりだされてIQ復調器[2]で検波される。IQ復調器からのベースバンド信号の波形はVME高速A/D変換ボードに記録される。また、空胴の共振周波数を安定化するため、精密温度調節装置[4]を備えている。さらに、空胴内のRFの位相・振幅を安定化させるためPIDフィードバックプログラムを使って制御している。以下、各機器の内容について詳しく述べる。

2.1 IQ変調器・復調器

IQ変調器は $I(t)$, $Q(t)$ のふたつのベースバンド信号を受けて以下の式で表わされるような出力RF $V(t)$ を生成する。

$$V(t) = I(t) \cos(\omega t) + Q(t) \sin(\omega t), \quad (1)$$

ここに、 ω は搬送波の角周波数である。これにより、任意の位相・振幅波形をもったRF信号を作り出すことができる。逆に、IQ復調器は入力RF信号から位相・振幅波形をとりだす回路である。変復調器としては、RFミキサと90度位相差のあるパワーディバイダがひとつのICチップに内蔵されたものを使用し

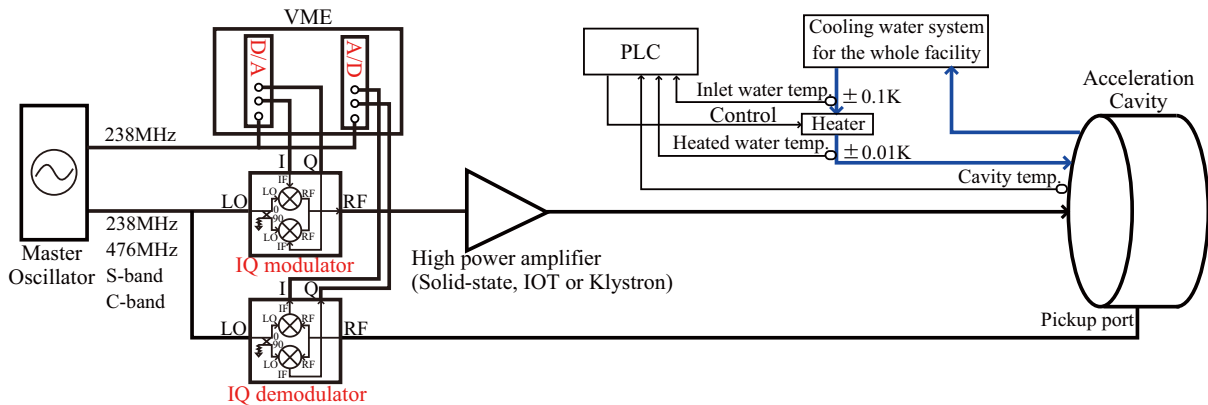


図1: RFシステムのブロック図

いる。このIQ変復調器の位相の誤差は±0.5度、振幅誤差は±数%である[2]。この回路は0.1 K以内に制御されたヒータの上に実装して温度変動を防いでいる。

2.2 VME高速D/A・A/D変換ボード

われわれの使用するVME高速D/A・A/D変換ボード[3]はいずれも12ビット分解能で、位相分解能は0.03度相当、振幅分解能はフルスケールに対して0.05%に相当する。サンプリング周波数は238MHzである。D/Aボードに関してはボード上のD/A変換チップ自体は14ビット分解能を持っているが、開発当時はA/Dボードに合わせるためにファームウェアで12ビットに下げている。これは後述するように、今回の改良で14ビット分解能が出せるようにした。

2.3 精密温度調節装置

加速空胴の温度が変化すると、共振周波数が変化して空胴内のRFの位相が変わってしまう。共振周波数が f_0 から $f_0 + \Delta f$ に変化すると、空胴内のRF位相の変化 $\Delta\phi$ は以下の式のように書ける。

$$\Delta\phi = 2Q_L \cdot \frac{\Delta f}{f_0} \quad [\text{rad.}] \quad (2)$$

ここに、 Q_L は空胴の負荷Q値で、10000程度の値である。一般に $\Delta f/f_0$ は銅の熱膨張係数から17ppm/Kであるので、RF位相は10度/Kのオーダーで変化することになる。位相変動を0.1度に抑えるには温度変動は0.01Kにしなければならない。施設からの冷却水の温度安定度は±0.1Kと安定度が不十分なため、精密温度調節装置 [4]を導入した。このブロック図は図1に描かれている。本システムは空胴の冷却水をヒータで温め、空胴の温度が一定になるようにヒータの出力を制御する。温度計として白金測温抵抗体が水配管や空胴胴体に取り付けられている。制御シーケンスはPLC上に実装されている。

3. 改善点とその性能

SCSS試験加速器の初期の調整のときのRF位相・振幅精度では、FEL増幅を観測することはできなかったが飽和を達成することができなかった。そこで、RFシステムの精度と安定度を上げるべく、精密温度調節装置の改良、PIDフィードバックプログラムの導入、D/A・A/Dボードの分解能向上を試みた。

3.1 精密温度調節装置の改良

調整初期のころ、空胴温度は0.1K以内に安定化されているにもかかわらず、RF位相の変動によるビームの不安定があった。原因を調べると、わずかに空胴温度がハンチングしていることがわかった。このハンチングは空胴の熱容量が大きいことによる位相遅れが原因であることがわかった。そこで、制御用の温度測定点を空胴胴体からヒータ直後の水の温度に変えた。この場合、制御ループ内の位相遅れは小さくなるが空胴の温度はループ外に出てしまう。しかし、空胴の熱容量が大きいおかげで外からの熱流入に対する温度変動が小さく、また、温度変動が起きる前に冷却水がその熱を取り除くので、環境温度などが変わっても影響を小さくしている。さらに、制御パラメータの微調整や温度計データ収集部にデジタルローパスフィルタを導入するなどして精度を上げた。改良後の温度のトレンドグラフを図2に示す。施設から供給される冷却水の温度変動が0.2K程度あるのに対して、空胴胴体の温度は±0.02K以内に安定化されている。温度計の分解能が0.01Kなのでほとんど測定限界である。

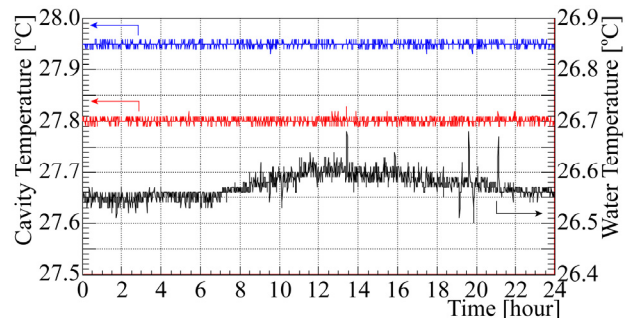


図2: 238MHz空胴(赤), 476MHz空胴(青), 施設からの冷却水(黒)の温度のトレンドグラフ

3.2 PIDフィードバックプログラム

加速RFの位相・振幅を安定化させるため、IQ復調器で検波した加速RFが一定になるようにIQ変調器にPIDアルゴリズムでフィードバックするプログラムを開発した。いまのところ更新周期は1秒で、0.1Hz以下の変動について安定化させることができています。

このプログラムにより、D/A・A/Dボードの分解能(12ビット)に匹敵するところまで安定化することができ、FEL増幅の観測に至った。しかし、D/Aボードの設定値とFEL光の強度に相関がみられ、D/Aボードの最小ビットの変化でもFEL光の強度に影響することがわかった。したがって、D/A・A/Dボードの分解能向上が必要となった。

3.3 RF位相・振幅の設定・検出分解能の向上

まず、D/Aボードにはもともと14ビットのD/Aチップが実装されているので、ファームウェアを改良するのがひとつの方法である。しかし、ファームウェアの変更には時間と労力がかかるため、当面の措置として波形を工夫して擬似的に分解能を上げることとし、その効果を確認めたうえでファームウェアの変更をすることにした。波形の工夫というのは、波形のフラットなところで最小ビットを数クロックごとに上げたり下げたりするディザ処理[5]をおこなって最小ビット以下の分解能を得るというものである。たとえば、最小ビットの1/4の値を得るには全クロックの25%で最小ビットを1にし、残り75%で0にすればよい。この処理をすると高周波のノイズが出るが、ボード上のローパスフィルタや加速空洞の狭いバンド幅のおかげで影響はほとんどない。この方法を適用した結果、約2ビット相当の分解能向上効果がみられ、位相・振幅分解能はそれぞれ0.01度、0.01%が得られた。この数カ月後、ファームウェアの改良で14ビット分解能がえられるようにしたが、同様の性能が得られることを確認した。

次に、A/Dボードの分解能強化について述べる。こちらはデータ収集時に複数ショットの平均値を得ることで擬似的に実現した。このときの運転繰り返しは10 ppsであったが、RFのフィードバックプログラムは1秒周期だったので、A/Dボードのデータを10ショット平均したものを使うことにした。これにより、ランダムノイズが $1/\sqrt{10}$ に減ることが期待される。これは1.7ビットの分解能向上に相当する。

これらの改善をおこなった結果、たとえば238MHz空洞内のRFの位相・振幅は図3に示すトレンドグラフのようになった。位相安定度は0.02度RMS、振幅安定度は0.03% RMSという値が得られた。

3.4 FELの性能

以上に述べたようなRFシステムと精密温度調節装置の改善をおこなった結果、加速器の調整が効率的に進められ、2007年秋に波長50~60nmのFELの飽和を達成した[1]。FELが飽和しているときのFEL強度のトレンドグラフを図4に示す。強度はPINフォトダイオードにて測定した。強度のゆらぎの幅のRMS値は約10%で、FEL飽和時の予想値と一致する。FELの飽和状態は10時間以上持続可能で、ユーザ運転に十分利用可能である。

4. まとめ

短波長のSASE-FELには高精度かつ安定なRFシス

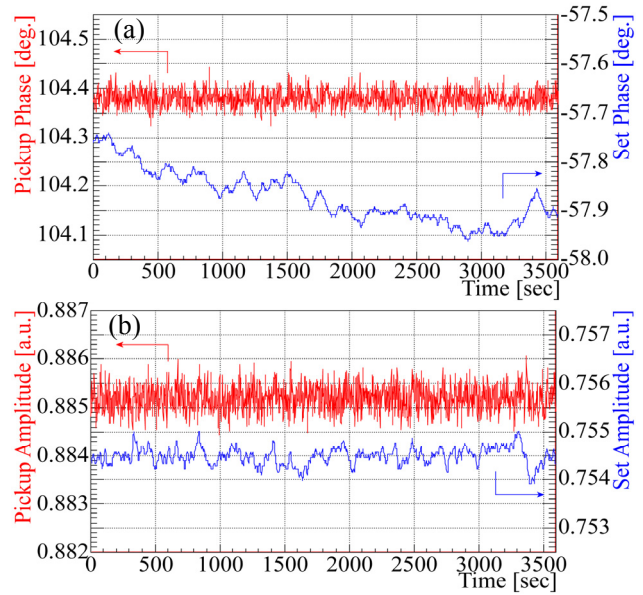


図3: 238MHz空洞のRFの位相(a)と振幅(b)のトレンドグラフ。赤線がIQ復調器の検出値で、青線がIQ変調器の設定値である。

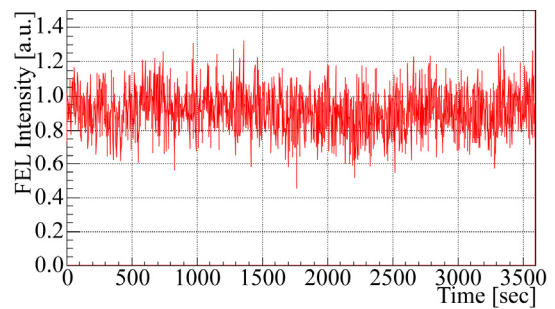


図4: FEL強度のトレンドグラフ。

テムが必要である。SCSS試験加速器では、IQ変復調器やVME高速D/A・A/DボードでRFの制御をおこない、精密温度調整システムで空洞温度を安定化している。RF位相・振幅の設定・検出分解能向上、フィードバックプログラムの導入、精密温度調節装置の改善により、サブハーモニック空洞内のRFの位相安定度0.02度RMS、振幅安定度0.03% RMSを実現した。これにより、加速器の調整が効率的に進み、波長50~60nmのFELの飽和を達成することができた。

参考文献

- [1] H. Tanaka et al., "Operation Status of the SCSS Test Accelerator", proc. of EPAC'08.
- [2] Y. Otake et al., "SCSS RF Control Toward 5712MHz Phase Accuracy of One Degree", proc. of APAC'07.
- [3] T. Fukui et al., "A Development of High-speed A/D and D/A VME Boards for a Low Level RF System of SCSS", proc. of 10th ICALEPCS conf. (2005).
- [4] S. Takahashi et al., "Precise Temperature Regulation System for C-band Accelerating Structure", proc. of APAC'04.
- [5] B. Widrow and I. Kollár, "Quantization Noise: Round-off Error in Digital Computation, Signal Processing, Control, and Communications", 685-695, Cambridge University Press (2008).