Digital LLRF feedback control system for the J-PARC linac

Shinichiro Michizono^{1,A)}, Zhigao Fang^{A)}, Seiya Yamaguchi^{A)}, Shozo Anami^{A)},

Hiyoyuki Suzuki^{B)}, Tetsuya Kobayashi^{B)}

^{A)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

^{B)} Japan Atomic Energy Research Institute (JAERI)

2-4, Shirakata-Shirane, Tokai, Naka, Ibaraki, 319-1195

Abstract

Twenty high power klystrons will be installed in the J-PARC linac. The rf fields are required to be stable less than +-1% in amplitude and +-1deg. in phase. The digital feedback (FB) system using FPGAs are adopted so as to satisfy these requirements. External monitors using wave-detectors and mixers are utilized for confirming the stability. The measured stabilities are less than +-0.15% in amplitude and +-0.15 deg. in phase during the 500µs flat-top. A tuner control system was tested and 18-hour FB operation was also carried out.

J-PARC線形加速器での高周波デジタルフィードバック制御

1.はじめに

J-PARC陽子リニアックでは、20台のクライスト ロン (324MH z、最大3MW) が使用され、RFQ,3台 のDTL,16台のSDTLモジュールを励振する[1,2]。高 周波源に対しては、振幅・位相について±1%、±1 度の精度の安定度を要求されており、この仕様を満 たすために、FPGAを用いた高速デジタルフィード バック(FB)システムを採用した[3,4]。システムはコ ンパクトPCI(cPCI)筐体に収納される。図1のシス テムの模式図に示すようにFPGAボードには4個のADC と4個のDACおよび2個のFPGA Virtex112000)が搭 載されている。空洞内と空洞入力信号がMix&I/Qモ ジュールで中間周波数(12MHz)に変換され、ADCに 直接入力される。空洞内信号(ADC1およびADC2)に ついてはFPGA1に取り込まれ、IQ成分に分離した上 で設定値と比較してPI制御の計算を行い、フィード フォワード(FF)信号を足して、DACからIQ変調器 に出力される。空洞入力信号はADC3およびADC4に入 力され、空洞内信号との位相差から空洞離調を算出 するために利用される。

今回は2台のSDTL空洞からなるSDTLモジュールに 対して、ベクターサム試験、および外部モニタでの 安定性評価、チューナー制御試験、ランニング試験 を行った。

2.試験結果

2.1 ベクターサムコントロール

SDTLモジュールでは、1台の高周波源により2台のSDTL空洞を励振する。この場合は2空洞の電界の和が一定となるような制御(ベクターサム制御)を



図1 コンパクトPCI(cPCI)の構成

行う。ベクターサムを行ったときのFBループ内のモ ニタ(FBモニタ)波形を図2に示す。設定は現在のと ころFPGAで処理する整数値をそのまま使用しており、 振幅の設定範囲は0から8192である。設定波形はフ ラット部分についてI成分が6000、Q成分が0(振幅 6000、位相0度に相当)であり、立ち上がり部分はQ

¹ E-mail: Shinichiro.MICHIZONO@kek.jp



図2 FBモニタでの波形。(a):振幅、(b):振幅(拡 大)、(c):位相。振幅、位相の設定値6,000と0度 である。比例ゲインは4、積分ゲインは0.01。

値が30,000に相当する形状で行っている。ベクターの サムのパルス内フラット部分は振幅・位相について、 ±0.06%、±0.05度以内の安定度である。

2.2 外部モニタ

これまで空洞内の電界強度については、FBを行っているFPGAボードで得られた値(FBモニタ)を示してきたが、FBの安定性を評価するためにFBループ外部での計測を行った。図3に示すように空洞信号を2系統に分岐して、振幅・位相をそれぞれ検波器とミキサーを使って測定した。検波器出力とミキサー出



Amplitude 1 Cavity +0.5%1.005 <u>əp</u> 0.99 (a) Cavity 2 1 Amplit 0.995 700 100 200 500 600 0.4 Phase [deg.] Cavity 1 ±0.2dea 0.2 -0.2 -0.4 time [us]

図4 外部モニタでのパルス内安定度。(a):振幅(規 格化したもの)、(b)位相。振幅、位相の設定値は図 2と同じく6,000と0度である。

力は、増幅器で増幅した後に14ビットアナログデジ タル変換器(ADC)に入力する。ADCではデータを1μ秒 おきに取り込んでおり、データはホストのコン ピュータに保存される[5]。得られた波形を図4に示 す。検波器、位相出力共に校正後の値に変換してあ る。パルス内の振幅および位相安定度はそれぞれ± 0.2%、±0.2度以内となっている。空洞内では、波 形に示されている様な速い成分は存在せず(Q値 20,000の場合の周波数の半値幅は16kHz程度)、実際 の安定度はこれより高くなる。FBのパラメータは変 化させず設定値のみを6000,5000,4000とした場合の パルス内の安定度を表1にまとめる。数10%の振幅 の変化に対してもFBが安定であることを確認できた。

2.3 チューナー制御

空洞内電界と空洞入力信号の位相差は、空洞の離 調と関係する。空洞が運転周波数と一致した時を基 準位相差として、空洞内と空洞入力の位相差(測定 位相差)と基準位相差の差から空洞の離調を計算で きる。空洞の離調が設定した離調(ビーム負荷があ る時は空洞を少し離調した場合に最も効率的な運転 が可能となる。)を大きく外れた場合(たとえば1 度)、cPCI上のDSPボードから空洞チューナーを調 整する。調整により、測定離調と設定離調の差が十 分小さくなった(たとえば0.2度)場合にチュー

表1 設定振幅と安定度(500µsのフラット部分)

121				
	設定振幅	4000	5000	6000
空	FBモニタ(振幅)[%]	± .10	±.08	±.06
洞	FBモニタ(位相)[度]	±.07	±.08	±.05
1	検波器振幅モニタ[%]	±.16	±.17	±.12
	Mixer位相モニタ[度]	± .12	± .15	±.14
空	FBモニタ(振幅)[%]	±.09	±.09	±.08
洞	FBモニタ(位相)[度]	±.07	±.08	±.06
2	検波器振幅モニタ[%]	±.18	± .15	±.12
	Mixer位相モニタ[度]	± .18	±.17	±.16
サ	FBモニタ(振幅)[%]	±.07	±.06	±.06
Ь	FBモニタ(位相)[度]	±.05	±.04	±.05



図5 チューナー制御試験時のチューナー位置とFB モニタの時間変化。

ナー制御を休止する。実際にチューナー制御を行っ た場合のFBモニタの時間変化を示す。図中の約1分 後に空洞1を+1mm動かし、また、約4分後に空洞2 を-1mm動かしている(チューナーを1mm変化させ ると15度程度の離調が生じる。)。この値は、実機 で想定している値(数度程度)より大きいが、動作 確認のために行っている。空洞離調が変化している



図6 ランニング試験時の外部モニタの時間変化。 (a):フラットトップの振幅の幅(最大値と最小値の 差)、(b):フラットトップの振幅平均値の時間変 化、(c):フラットトップの位相の幅、(d):フラット トップの位相平均値の時間変化。

間も、FBモニタではベクターサムが一定となって いる。また、2分程度でチューナー制御がうまく動 作することが確かめられた。

2.4 ランニング試験

FBの安定度を見るために18時間程度の連続運転を 行った。このときの外部モニタでの振幅・位相の時 間を図6に示す。ここでは、振幅・位相のフラット 部分の最大・最小値の差(図5(a),(c))およびフ ラット部分の平均値の時間変化(ドリフト、図 5(b),(d))を示している。パルス内の振幅・位相は ±0.15%(0.3%pk-pk)、±0.15度(0.3度pk-pk)程 度で、また、短時間のパルス間の振幅・位相の変化 も±0.1%、±0.15度程度に収まっている。

現在のFBシステムではRF&CLKボードとMixerボー ドが外気温変化により出力位相が変化することがわ かっている(外気温1度で位相1度程度)。これにつ いてはボードの改版作業中であり、外気温1度の変 化で位相変化が0.1度以下となるものが試作できて いる。今回の測定でドリフトが0.3度程度現れてい るのは外気温が0.5度程度変化しているためである。

3.まとめ

SDTLモジュールを使ってデジタルフィードバック 系の安定度測定を行った。検波器とミキサーを使っ た外部モニタ系も使用し、パルス内安定度が± 0.15%、±0.15度以下であることを確認した。また、 チューナー制御試験も行い、水温変化や入力の高周 波電力の変化で空洞の離調が変化した場合もチュー ナーを正しく制御することを確かめた。18時間程度 のランニング試験を行い、安定度を測定した。パル ス内の振幅・位相安定度はランニング運転中± 0.15%、±0.15度以下を維持し、パルス間の変動を 含めても、全体として±1%、±1度の仕様を十分満 たすことを確認できた。

参考文献

- [1] S.Anami, et al., "J-PARC Linac Low Level RF Control", Proceedings of the 1st Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 29th Linear Accelerator Meeting in Japan, Aug. 4-6, 2004, Funabashi, Japan.
- [2] S.Anami, et al., "Automatic Recovery Control of J-PARC Linac RF Sources", in this meeting.
- [3] S.Michizono et al., "Digital feedback system for J-PARC linac RF source", Proceedingsof the 22nd international Linear Accelerator Conference (LINAC 2004), Luebeck, Germany, August 16-20, 2004, KEK Preprint 2004-77.
- [4] E. Chishiro, et al., "Status of the RF system for J-PARC Linac", in this meeting.
- [5] H.Katagiri, et al., "Microwave measurements and control using the FPGA board", in this meeting.