

DIGITAL FEEDBACK SYSTEM USING μ TCA FOR DRFS

Takako Miura [#], Dai Arakawa, Hiroaki Katagiri, Toshihiro Matsumoto, Shinichiro Michizono, Yoshiharu Yano, Shigeki Fukuda

High Energy Accelerator Research Organization
1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

Abstract

The test of distributed RF scheme (DRFS) for ILC was performed at the superconducting RF test facility in KEK (KEK-STF). The vector-sum control for two cavities was done by using the digital feedback system using the μ TCA. A correction of a large sag due to electrical power source and IIR filter which is also applied as a cavity simulator was installed. The measurement of field stability and the performance are reported.

DRFS における μ TCA デジタルフィードバック系

1. はじめに

KEK-STF では、ILC のための分布型高周波システム(DRFS)^[1]の試験が行われた。この試験では、電源やクライストロン、低電力高周波源(LLRF)は、加速空洞の近くに設置された。体系としては、1台の高周波電源^[2]にモジュレーションアノード(MA)付きのクライストロンが2台接続され、クライストロン1台につき各々2台の空洞を励振する^[3]。また、各クライストロンには μ TCA を用いたデジタルフィードバックボードが用意され、それぞれベクターサムフィードバックによって制御された。高周波測定系については片桐らの報告がある^[4]。ここでは、ボードに搭載された機能、および、実際に測定で得られた性能について報告する。

2. デジタルフィードバック系

2.1 デジタルフィードバックボード

フィードバックボードの外観を図1に示す。2台の高周波源に対応してデジタルフィードバックボードが2枚、 μ TCA のシェルフに挿入されている。AMC(Advanced Mezzanine Card)の規格で作られ、FPGA とデジタル I/O、トリガー入力を載せた親基板に、子基板として、AD,DA(16bit)ボードが載っている^[5]。外部との通信は、バックプレーンのギガビットイーサネットから μ TCA 筐体内の MCH モジュールを通して行う。FPGA 内部の PowerPC には、Linux が組み込まれ、各フィードバックボードが EPICS IOC となっている^[6]。EPICS レコード名は、ヘッダーに μ TCA1:xxxx, μ TCA2:xxxxx などとして与えられ、1や2の番号は、ボード上のディップスイッチで識別されて割り当てられる。ハードは、KEK に建設中の cERL(CW 運転)計画用に開発されたもの^[7]で、DRFS(パルス運転)用に FPGA 内部処理などの改良をおこなって使用した。



図1: デジタルフィードバックボード

2.2 フィードバック制御系

1300 MHz の超伝導加速空洞のピックアップ信号は、ダウンコンバーターで 10MHz の中間周波数に落とされ、ADC に入力される。図2にデジタルフィードバック系の概略図を示す。AD 変換されたデータは、FPGA の中で、40MHz に同期して I,Q に分離され、その後 80 MHz で演算処理が行われている。I,Q に対する振幅、位相の補正を行った後、2つの空洞のベクターサムを行い、デジタルの低域通過フィルター(LPF)を通して、フィードバックを行った。このフィルターは、離調を考慮しない空洞シミュレータ^[8]と同じもので、次式のような IIR フィルターである。

$$V_I(n+1) = (1-A) V_I(n) + A \cdot I(n) \quad (1)$$

$$V_Q(n+1) = (1-A) V_Q(n) + A \cdot Q(n) \quad (2)$$

ここで、 A は式(3)のように、フィルターの遅延時間 ΔT と角周波数帯域幅 $\omega_{1/2}$ の積である。

$$A = \Delta T \cdot \omega_{1/2} \quad (3)$$

このフィルターによって、入力段のノイズや、 π モード以外の他のパスバンドも除去される。空洞シミュレータとして動作させるときは、空洞の Q_L から決まる $\omega_{1/2}$ を代入し、ボードの単体試験や、クライストロンフィードバックにも利用された。

[#] takako.miura@kek.jp

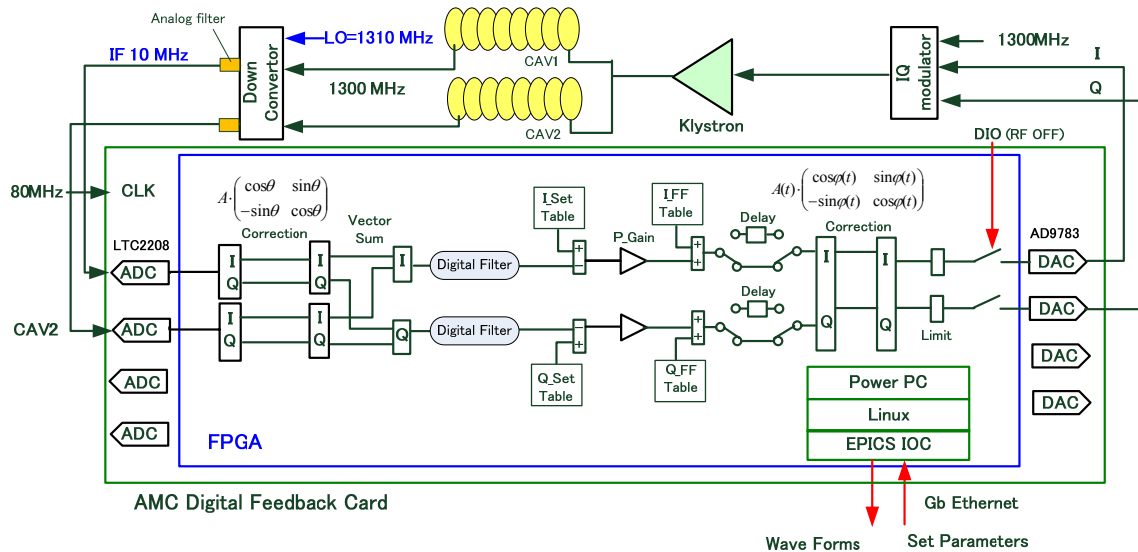


図 2 : デジタルフィードバック系の概略図

IIR フィルターを通過後、フィードバック(P 制御)を行い、FF テーブルを加えた後、補正をかけて DAC 出力し、IQ モジュレータを通して、1300MHz の信号がクライストロンに入力される。

2.3 DAC 出力補正テーブル

今回使用しているクライストロン電源には、5-6% 程度のサグがあり、クライストロン MA 電圧の立ち上がりも鈍っているため、クライストロンの RF 出力がパルス内で大きく変動する。振幅・位相一定の RF 入力に対するクライストロンの出力波形を図 3 に示す。1.6ms の RF パルス内で振幅が 10% 程度、位相は約 40° 変化した。この変化量は、フィードバックのみで抑えるには大きすぎるため、FPGA 内部でフィードバック演算をした後に、パルス内時間に応じた振幅・位相補正を加えて DAC 出力させることにより補正を行った。

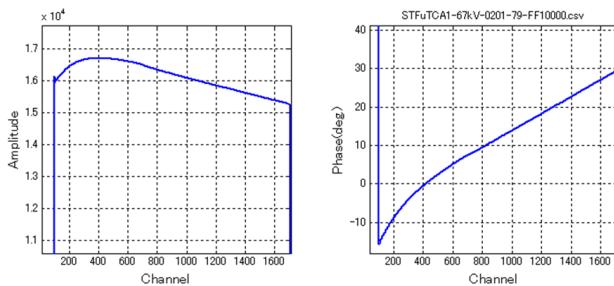


図 3 : 1.6 ms 幅のフラットな RF 入力に対するクライストロン出力の振幅と位相変動

3. フィードバック性能の実験的評価

3.1 フィードバックループ時間測定

空洞ピックアップは入力カップラと反対の 9 セル目の空洞にあり、そこでの 8/9πモードのフィールドは、πモードと 180°位相がずれている。そこか

ら、ループ時間に応じて不安定と安定を繰り返し、安定領域の中心間が $1/(f_{\pi}-f_{8/9\pi})$ の周期となるため、そのタイミングから、ループ時間を推定できる^[9]。測定は、πモード以外のパスバンドを除去していたデジタルフィルターをオフにし、FPGA 内の遅延回路でループ時間を変化させ、1 台の空洞に対するフィードバックを行った。この空洞の TM₀₁₀ パスバンドのπモードとの周波数差を表 1 に示す。μTCA1 と μTCA2 で、フィードバックゲインは共に 6 程度であった。図 4 に不安定なときの波形とその周波数スペクトルの一例を示す。どの遅延時間においても 7/9πモードなどが観測されなかったが、これは、ダウンコンバーター直後に入れられたアナログフィルタで切られたためと思われる。μTCA1 側には、LPF(11MHz)が 1 段と BPF(9.5 MHz - 11.5 MHz)が 3 段入れており、μTCA2 側には、BPF のみが 2 段入っていた。図 5 には、付加した遅延時間に対して 8/9πモードの信号強度をプロットしたものを示す。

表 1 : TM₀₁₀ パスバンドのπモードとの周波数差 (ネットワークアナライザでの測定値)

	μTCA1 (C2cavity)	μTCA2 (A2cavity)
mode	Δf (MHz)	Δf (MHz)
π	0	0
8/9π	-0.794	-0.85165
7/9π	-3.06832	-3.2688
6/9π	-6.54258	-6.95866
5/9π	-10.7539	-11.3986
4/9π	-15.1744	-16.1303
3/9π	-19.3084	-20.5185
2/9π	-22.6814	-24.0826
1/9π	-24.9263	-26.3082

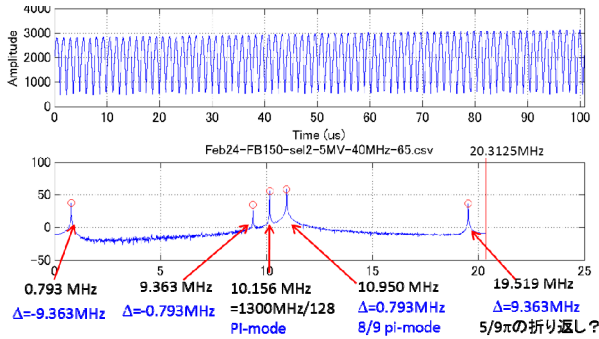


図 4 : uTCA1 での不安定な場合の振幅(上)と周波数スペクトル(下)の 1 例

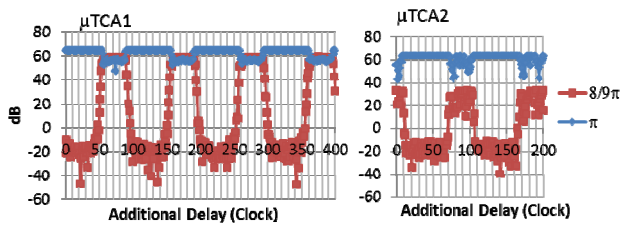


図 5 : 付加遅延時間に対する $8/9\pi$ モードの信号強度

付加遅延時間がゼロのループ時間を求めると μ TCA1 側は $1.62 \mu\text{s}$ 、 μ TCA2 で $1.26 \mu\text{s}$ となった。 μ TCA1 が μ TCA2 に比べて約 $0.36 \mu\text{s}$ 遅いのは、配線距離の違いで約 $0.17\mu\text{s}$ 、残りの $0.19\mu\text{s}$ についてはさらに検討が必要であるが、 μ TCA1 の方が、 μ TCA2 よりアナログフィルタの段数が多い (LPF+BPF) ことが関連していると推定される。今回の測定結果は、配線経路が違うものの、従来使用している cPCI フィードバック制御系では $1.22 \mu\text{s}$ であり^[9]、ほぼ同程度という結果となった。

3.2 ゲインスキャン

フィードバックのゲインを変化させながら、振幅、位相の安定度を測定した。この測定では、2 空洞のベクターサムでは無く、単一空洞に対して制御し、IIR フィルターは 150kHz のカットオフ周波数で動作させた。結果を図 6 に示す。

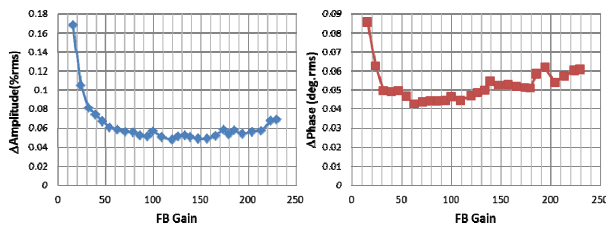


図 6 : 比例制御のフィードバックゲインに対する振幅・位相安定度。

振幅安定度は、FB ゲインが 60 以下では、DAC 出力補償では補正しきれなかったわずかな振幅のサグが支配的で、FB ゲインが 110 から 160 付近では、これらのサグがフィードバックで抑えられるため安定となった。一方、位相安定度は、60 から

90 付近で安定となった。

3.3 加速電場の安定度

FB ゲインが 97 のときのフラットトップ部の振幅、位相の測定結果を図 7 に示す。ベクターサムしたものを 35 kHz 低域通過フィルターを通して、各空洞の値に対して、ギザギザが少なくなめらかに見える。振幅安定度は、 $0.06\% \text{ rms}$ 、位相が 0.04deg. rms 程度であった。安定度の結果をみると、電源サグを補償するための DAC の回転補正が、うまく機能したことがわかる。

次に、FB 運転時の DAC 出力をベースにフィードフォワード(FF)テーブルを作成し^[10]、FB+FF 運転を行った。図 8 に示すように、平坦度が改善され、振幅で $0.017\% \text{ rms}$ 、位相で 0.03° rms となった。ILC での要求性能 0.07% 、 0.24° ^[11]は満足する結果となった。

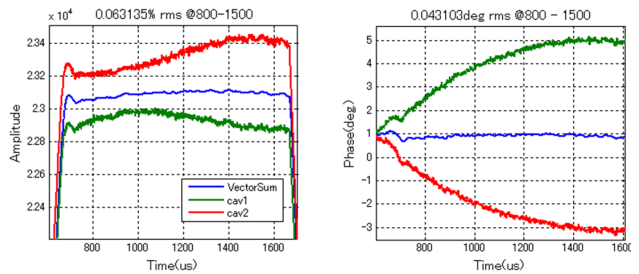


図 7 : FB(ゲイン=97)運転時のフラットトップ部の振幅、位相の結果。(振幅安定度 $0.06\% \text{ rms}$ 、位相安定度 0.04° rms)

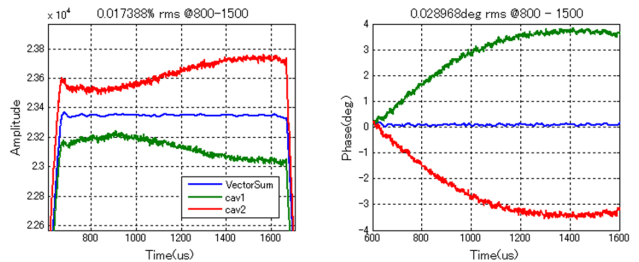


図 8 : FB+FF 運転時のフラットトップ部の振幅、位相の結果。(振幅安定度 $0.017\% \text{ rms}$ 、位相安定度 0.03° rms)

4. まとめ

KEK-STF では、ILC のための分布型高周波システム(DRFS)の試験が行われ、 μ TCA を用いたデジタルフィードバック系の性能評価も同時に行われた。フィードバックループ時間の測定を行い、システムとしては、従来のものとほぼ同程度であることを確認し、P 制御のゲインをスキャンし、およそ 100 付近が良いことがわかった。DRFS の電源サグの影響補正や、ADC の取り込み後の IIR フィルタにより、最終的には、フィードバックとフィードフォワードを足して、パルス内安定度で $0.017\% \text{ rms}$ 、 0.03° rms が確認された。

参考文献

- [1] S.Fukuda, et al., “ILC の日本スキーム : DRFS(分布型 RF システム) ”, These proceedings.
- [2] M.Akemoto, et al., “ ILC 計画における分布型 RF 源用電源開発の現状”, These proceedings.
- [3] T.Matsumoto, et al., “KEK 超伝導 RF 試験装置(STF)における S1 Global 計画での RF 源”, These proceedings.
- [4] H.Katagiri, et al., “STF での S1 グローバルのための低電力高周波系の構成”, These proceedings.
- [5] M.Ryoshi, et al., “LLRF BOARD IN MICRO-TCA PLATFORM”, Proceedings of the 7th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Himeji, August, 2010.
- [6] H.Deguchi, et al., “EPICS EMBEDDING FOR SUPERKEKB LLRF COMPONENTS”, Ibid.
- [7] T.Miura, et al., “LOW-LEVEL RF SYSTEM FOR CERL”, Proceedings of IPAC'10, Kyoto, Japan, 2010.
- [8] T.Czarski, “TESLA cavity modeling and digital implementation with FPGA technology solution for control system development”. TESLA Report 2003-28.
- [9] T.Miura, et al., “RF instability due to passband of TM_{010} mode in STF”, Proceedings of the 5th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Higashihiroshima, 2008.
- [10] T.Miura, et al., “EVALUATION OF LLRF STABILITIES AT STF”, Proceedings of PAC09, Vancouver, BC, Canada, 2009.
- [11] <http://www.linearcollider.org/about/Publications/Reference-Design-Report>