

TUNER CONTROL FOR CERL CAVITIES BY DIGITAL FEEDBACK SYSTEM

Shinichiro Michizono^{#,A)}, Dai Arakawa^{A)}, Hiroaki Katagiri^{A)}, Toshihiro Matsumoto^{A)}, Takako Miura^{A)}, Yoshiharu Yano^{A)}

^{A)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK)
1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

Abstract

Digital tuner control system has been developed for the Energy Recovery Linac test facility in KEK (cERL). Both mechanical and electric (Piezo) tuners should be controlled to keep the cavity detuning to be constant. The two FPGA boards will be installed to the digital rf field and tuner control based on the uTCA standard. In order to examine this digital system, cavity tuner test-stand was assembled. This consists of the TE111 mode cavity and tuners. By this test-stand, cavity tuning system can be evaluated prior to the cERL installation scheduled on this Autumn.

デジタルフィードバックを用いた cERL 空洞のチューナー制御

1. はじめに

コンパクトエネルギー回収型リナック(cERL)は、KEK の将来計画である 3GeV 超伝導 ERL テスト施設である[1]. cERL では L バンド(1.3GHz, CW)の高周波源と空洞が使用され、その空洞電圧の振幅・位相安定度の要求仕様はそれぞれ 0.1%rms, 0.1 度 rms であり、J-PARC リニアックや KEK の超伝導高周波試験施設 (STF) で実績のあるデジタルフィードバックシステムを採用する [2].

表 1 に高周波源および空洞の仕様をまとめる. 5 台の高周波源を使って、全部で 6 つの空洞を励振する構成となっている[3]. 特に、主リニアックでは、負荷 Q 値が高く、周波数半値幅は 30Hz 程度であることから、高周波源を効率よく使うことを考慮すると、空洞離調の自動調整が重要となる. 現在は実空洞の試験を行うことができないため、空洞およびチューナー系を模擬したテストスタンドを構築しフィードバックの全体評価を行っている. 今回はこ

のチューナー制御系の開発状況を中心に紹介する.

2. チューナー制御システム

ERL 開発棟内には空調設備はなく、ビームラインのあるシールド内と、デジタル LLRF 系の中二階のパネルハウス部分のみが温度管理されている. 大電力高周波源、チューナーコントローラ (機械コントローラとピエゾ電源) およびインターロック系は、シールド外の温調のない部分におかれる. モニターされる高周波信号は中二階のデジタル LLRF 系に入力され、ここから 1 階の大電力高周波源とチューナーコントローラを制御する. デジタル入力としては、空洞からの機械モーターリミットスイッチ、ピエゾ電源診断等が接続される. デジタル出力としては、ピエゾ電源リセットや後述するモーター用パルス出力などがある. これらの制御を空洞電圧制御用デジタルフィードバックと同タイプのマイクロ TCA (μ TCA) 規格のボードを使って行う.

表 1 : cERL の空洞と高周波源

Item	Unit	Buncher	Inj-1	Inj-2	Inj-3	ML-1	ML-2
Structure		NC	SC	SC	SC	SC	SC
Gradient	MV	0.14	1	2	2	15	15
QL			5 e5	2e5	2 e5	2 e7	2e7
Beam Phase	deg.	-90	-15 to -30	-10	-10	0	0
Mechanical Tuner		Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
Piezo Tuner		No	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
Tuner position mon.		Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
Tuner limit		Yes	No	No	No	Yes	Yes
Power Required	kW	4.5	10	37	37	11	11
Power Output	kW	6.2	15	122		15	15
RF Source		IOT	Klystron	Klystron		IOT	IOT
Power Available	kW	20	30	300		>15	>15

[#] shinichiro.michizono@kek.jp

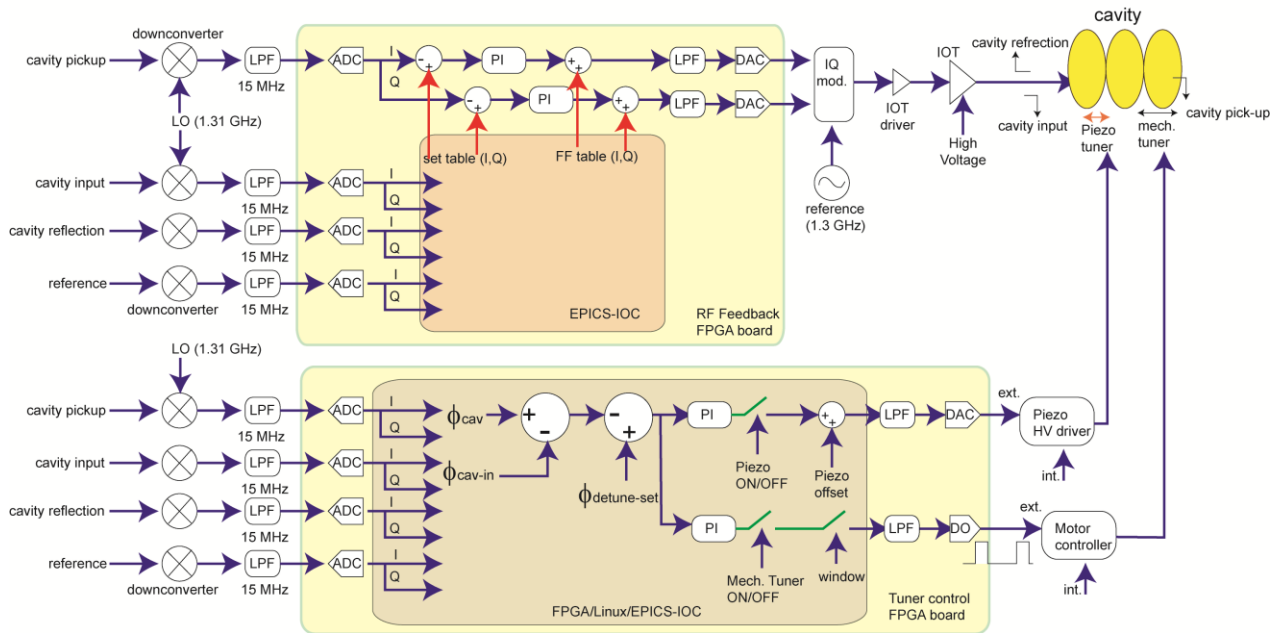


図 1 : 空洞チューナー制御系

図 1 にチューナー制御系の構成図を示す。1 空洞の制御には、1 枚の高周波フィードバック用ボードと、1 枚のチューナー制御用ボードが使用される。ボードには、FPGA に 4 個の ADC、4 個の DAC と 20 個の DIO および遅いサンプリングの ADC 1 個が備えられており、FPGA は 162.5 MHz (=1300 MHz/8) で、また、ADC および DAC は 81.25 MHz (=1300 MHz/16) で動作する。入力する高周波信号は、空洞ピックアップ、空洞入力、空洞からの反射と、基準信号の 4 つであり、ダウンコンバータで 10.16 MHz (=1300 MHz/128) の中間周波数に変換したあと、直接 ADC に接続される。高周波フィードバックボードでは 2 つの DAC で IQ 変調器をドライブする。チューナー制御用ボードでは、ステップモーターについてはボードのデジタル出力から対応するパルスを生じさせ制御し、ピエゾについてはボードの DAC からの出力を電圧増幅器に接続する。ステップモーターによるチューナーの位置については、位置モニターによりモニターする。これは、 μ TCA ボードの遅いサンプリング (~ 100 kHz) の ADC に接続される。

バンチャ、入射空洞、主リニアックによって、その制御用モーター、ピエゾの入力電圧仕様（ただし、常伝導空洞のバンチャではピエゾは使用しない）は若干異なるが、それらについては、電圧変換ユニット等を介する事で基幹部分の互換性を保つ。表 1 に各空洞のチューナー系の仕様をまとめる。チューナーのフィードバックは単純な比例積分 (PI) 制御で行い、共振した際の位相を基準として、空洞の位相と空洞入力の位相差から離調を算出する。機械チューナーについては不感帯を設け、離調が一定の範囲を超えたときのみ動作する。このようなアルゴリズムは KEKB で実績のあるアナログ系のチューナーフィードバックシステムを参考にしてい

る[4]。

機械チューナー、ピエゾチューナーともに、空洞の機械共振（超伝導空洞で ~ 200 Hz 程度）を避けること、共振のずれは一般にはゆっくりしたドリフトが主成分であることから、1 秒程度の時間間隔で動作を行わせる予定である。周波数帯域の狭い主リニアックでは、初期の離調調整を機械チューナーで行い、加速器運転中のチューナー制御は主としてピエゾを利用することになる。

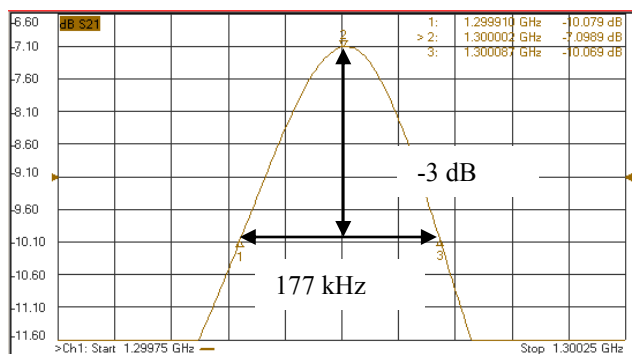


図 2 : 空洞の S21 カーブ

3. チューナー制御テストスタンド

3.1 チューナー制御評価用空洞

2012 年秋から cERL の入射部空洞のコンディショニングが開始される予定であるが、それまでは、実空洞を使った制御システムの評価をすることができない。チューナーアルゴリズムや、フィードバック性能の評価を実空洞稼動以前に行う必要があり、このために模擬空洞およびそのチューナー制御系を作成した。空洞は、1.3GHz に共振を持つ TE₁₁₁ モード

の円筒空洞共振器を利用している。図2に空洞のS21特性を示す。Q値は7300程度である。この値は、実際の超伝導空洞のQ値よりかなり小さいため、空洞の安定度を評価するには適さないが、チューナーを含めたシステムの評価には十分である。

空洞には4つのアンテナを挿入しており、2つは空洞入力および空洞モニターに、残りの2つは、空洞の同調を確かめるためにネットワークアナライザーに接続している。入射部空洞に取り付けるものと同じステップモーターを使った駆動装置台をつくり、そこに位置モニターを取り付けた。ステップモーターのコントローラは市販のコントローラに外部からのパルス入力ができるような機能を追加したものである。このため、 μ TCAボードからの制御だけでなく、ローカルでステップモーターの動作確認をすることができる。

この駆動装置台の上に、ピエゾを模擬したラジコン用サーボモーター(RCサーボ)を取り付け、サーボの振れ角に応じてチューナー棒を差し込む構造とした。これにより、ステップモーターとRCサーボの動きを重畳したものが動くことになる。RCサーボの振れ角は、モーターへの入力パルス幅に比例する。このため、 μ TCAからのDAC出力に比例したパルス幅を生成する電子回路を途中に組み込んでいる。この回路はNIMモジュールに収められており、外部入力および振れ角に対応するパルスモニターする端子を持つ。図3にこのチューナー制御試験系の写真を示す。



図3：空洞テストスタンド

3.2 機械チューナー性能

機械チューナーの性能について以下のように確認した。まず、ネットワークアナライザーを使って、1.3GHzの共振状態になるようにローカルにてステップモーターを移動した(共振状態)。この際の位置モニターの読みは2.30(相対値)であり、ソフト的な位置モニターを使ったリミット値もこの前後の値になるようにした。(実空洞では、大きく機械チューナーが動くときとチューナー制御系に不具合が生じる可能性があり、それを制限するために、この位置モニターの値にリミット値を入れ、また、ハード的なリミッターを入れている。)RCサーボは、ボードのDACからの出力15000の固定値とした。

μ TCAボードからのパルス出力と離調(共振状態の空洞入出力の位相差をゼロと定義した時の位相差に相当)の関係を図4に示す。 ± 15000 カウント程度で ± 30 度程度の離調となっていて、また、線形な応答が得られている。大きな離調がなければ十

分な動作範囲を確保できている。

3.3 高速チューナー性能

同様に、RCサーボを使ったピエゾチューナー模擬系の評価を以下の要領で行った。まず、ネットワークアナライザーにて確認しながら機械チューナーをローカルにて動かし、共振状態とした。この状態で、機械チューナーは固定し、ボードからのDAC出力を変えたときの離調およびRCサーボへのパルス出力を測定した。DACからの出力が小さくなると離調が線形から外れてくるが、50度程度の離調範囲で線形成が保たれていることが確認できた。ピエゾは10度程度以下の小さな離調制御に主として使用されるため、これくらいの線形範囲が得られれば十分と考えられる。

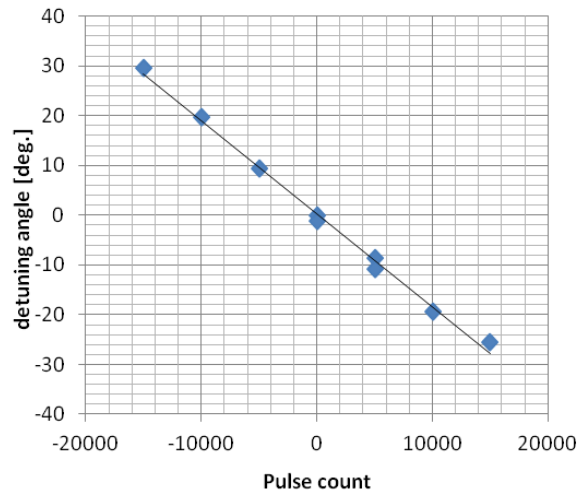


図4：機械チューナーのパルス数と離調の関係

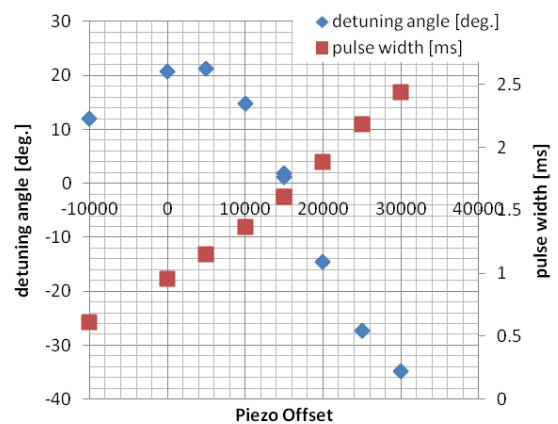


図5：DAC出力(Piezo Offset)と出力パルス幅および離調の関係

4. テストスタンドでの性能評価

テストスタンドでも、デジタル系については実際の空洞制御(電界制御、およびチューナー制御)と同様2枚のボードで行っている。最初に共振状態で

空洞入力位相と空洞出力位相を 0 に合わせたのち、ローカルで機械チューナーを 30 度程度離調させた。その後、 μ TCA ボードで比例制御によるチューナー同調試験を行った。RC サーボ（高速チューナーに対応）をオフ状態で、機械チューナーだけで同調状態に移ることを確認し、また、RC サーボも使った状態でピエゾを模擬した際にも、同調状態側に移ることを確認した。積分制御を加えると、まだ離調の変化が大きくなりすぎる傾向があり、チューナー制御における PI 定数の最適化については、今後このテストスタンドで評価を続け、また、デジタル系でのシミュレーションも行う予定である。

5. まとめ

デジタルボードを用いたチューナー制御系についてテストスタンドを作成した。テストスタンドでは機械チューナー、ピエゾチューナー（を模擬した RC サーボ）がともに動作することを確認した。cERL の実機試験は、今年秋から予定されているが、それに先立ってチューナー制御系のシステム評価を行うことができた。

References

- [1] S. Sakanaka et al., "コンパクト ERL 建設の進捗状況", Proceedings of the 8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (August 1-3, 2011, Tsukuba, Japan), pp.1071-1075.
- [2] T. Miura et al., "LOW-LEVEL RF SYSTEM FOR CERL", Proceedings of IPAC'10 (May 23-28, 2010, Kyoto, Japan), pp.1440-1442.
- [3] H. Nakajima et al., "cERL における 30kW CW IOT/クライストロン用電源の開発" in these proceedings.
- [4] K. Akai et al., "THE LOW-LEVEL RF SYSTEM FOR KEKB", Proceedings of EPAC98 (June 22-26, 1998, Stockholm, Sweden), pp.1749-1751.