

PERFORMANCE OF LLRF SYSTEM AT STF IN KEK

Shinichiro Michizono¹, Hiroaki Katagiri, Toshihiro Matsumoto, Takako Miura, Yoshiharu Yano
and Shigeki Fukuda

High Energy Accelerator Organization (KEK)
1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki 305-0801

Abstract

ILC (International Linear Collider) requires the rf stability of 0.07% in amplitude and 0.24deg. in phase, respectively. Since STF is a test facility aiming for ILC, final goal of the llrf stability is the ILC specification. In order to satisfy these requirements, we have developed the digital llrf feedback system. The system consists of high-stable master oscillator, FPGA board with 10 16bit-ADCs and 2 14bit-DACs, downconverters and an IQ modulator. The stabilities of 0.05% (rms) and 0.02deg.(rms) are obtained during rf operation (without beam).

STFにおける低電力高周波源の性能

1. はじめに

KEKの超電導高周波テスト施設(STF)では、国際リニアコレイダー (ILC) に向けた超伝導空洞の試験が行われている。ILCでは、空洞加速電界の安定度として振幅安定度0.07%、位相安定度0.24度が要求されている^[1]。これまで、Cavity Simulator等を利用してソフトウェア開発やシステム性能を評価してきた^[2]が、昨年7月から超伝導空洞を利用した高周波運転が始まった^[3]。これまで、STFの実空洞を使ったLLRFに関するいくつかのスタディをおこなっている。一つは、KEK独自の計測手法であるIF-Mix法の実証である。この手法を使えば多チャンネルの信号をたとえば1/4のADCで計測することができる。今回の試験期間中に、1空洞の信号を4分割したうえでIF-Mix法を使ったフィードバックが問題なく動作することを実証した^[4]。また、中間周波数信号が高くなると、 π モード以外の空洞のモードもデジタルLLRF系に混入し、そのためフィードバック条件によっては不安定なるとされており、実際にLPFを抜いた状態でのフィードバックの安定度の評価や、その不安定の周期からフィードバックのループ時間を

算出する試みも行っている^[5]。このほかに、1.3GHzまで帯域のある高速ADCを高速処理可能なFPGA評価ボードに接続し、1.3GHzの空洞信号を270MHzのサンプリングでミキサーを経由せず直接ADCに入力するダイレクトサンプリングの試験も行っている^[6]。ダイレクトサンプリングでは、ジッターの影響を受けやすくなるが、高速サンプリングによりビーム誘起波等の中間周波数以上の高速信号を検出できるほか、ミキサーを使わないことから構造がシンプルとなりミキサーの非線形性等を考慮する必要がなくなる等の利点がある。今回は、これまで得られたデジタルLLRF系の試験結果について報告する。

2. フィードバックシステムの構成

STFの低電力高周波 (LLRF) 系はFPGAを使ったデジタルフィードバックシステムにより構成されている。筐体としては、J-PARCリニアックのLLRF系と同様のcPCIを採用し、安全系も含めてJ-PARCリニアックの仕様^[7]を基本的には踏襲している。ただし、最大8空洞のベクターサム制御をおこなう必要があるため、16ビットADCを10チャンネル備えたFPGAボー

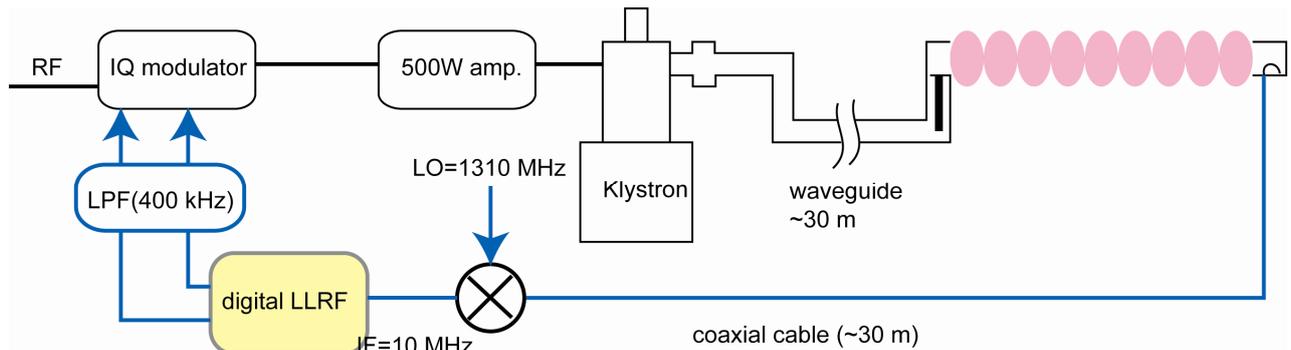


図1: デジタルフィードバック系を含めたシステムの模式図

¹ E-mail: shinichiro.michizono@kek.jp

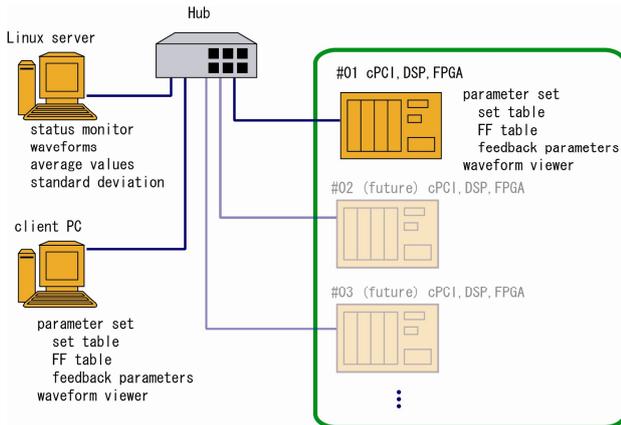


図2：cPCIと外部サーバ、クライアントとの関係

ドを採用した．図1にデジタルフィードバック系を含めたシステムの模式図を示す．FPGAボード中の2チャンネルのDAC出力は，空洞中の π モード以外のモードの励振を避けるため^[5]400kHz以下を透過するローパスフィルタを経てIQ変調をおこなう．その変調出力は500Wアンプ，大電力クライストロン（最大5MW）を経て超伝導空洞を励振する．空洞は地下に配置されており，空洞からの高周波検出信号は同軸ケーブルで伝送され，ミキサーで中間周波数（IF）に変換されたのち，FPGAのADCで直接検出する．フィードバックは単純な比例積分（PI）制御をにより行っている．

図2にcPCI筐体と外部サーバ，クライアントとの関係を示す．cPCI筐体にはWindowsが動作するCPUと，cPCIバス上に市販のDSPボード（パルセロナ，

Spectrum Inc.）が挿入されており，このDSPボードのドータカードとしてFPGAボードが接続されている．フィードバックのパラメータ設定は外部のクライアントPCからcPCIのCPU，DSPボードを経由してFPGA内部に設定される．また，逆に高周波波形はFPGAボードからDSP，CPU経由でクライアントPCに表示される．Linuxのサーバーでは，cPCIの状態，波形の定時保存等を行っている．外部とcPCIとの通信プロトコルとしてはJ-PARCと同様にCORBAを利用している．cPCIのCPUには最新の1パルスのほかに，150波形が保存されており，5Hz運転の場合30秒間に蓄積された波形を取り出し評価することができる．これらの波形は，各チャンネルのIQ成分それぞれについて16ビットで長さ2048のデータ列である．通常は1us毎のデータ（全部で2.048ms）を記録するが，外部からの設定により，最大で40MHzサンプリングのデータ（この場合は約50usの幅のデータとなる）を取り込むことができる．外部からの変更や波形取り出しはMATLABを経由しても行うことができるため，MATLABを使ったリアルタイムの解析も可能である．

3. デジタルLLRF系の性能

フィードバックの際の空洞電界の振幅，位相波形を図3に示す．設定は，空洞のQ値に対応する時定数で増加させ，一定時間後に設定値になるというものである．このときのフィードバックは比例制御で，また，フィードフォワードは使用していない．空洞の帯域はフィードバックを行う場合も100kHz程度以下に限られる．振幅のサグは，主としてアンプおよびクライストロンの時間的なサグによるもので，適切なフィードフォワードを印加すればキャンセルで

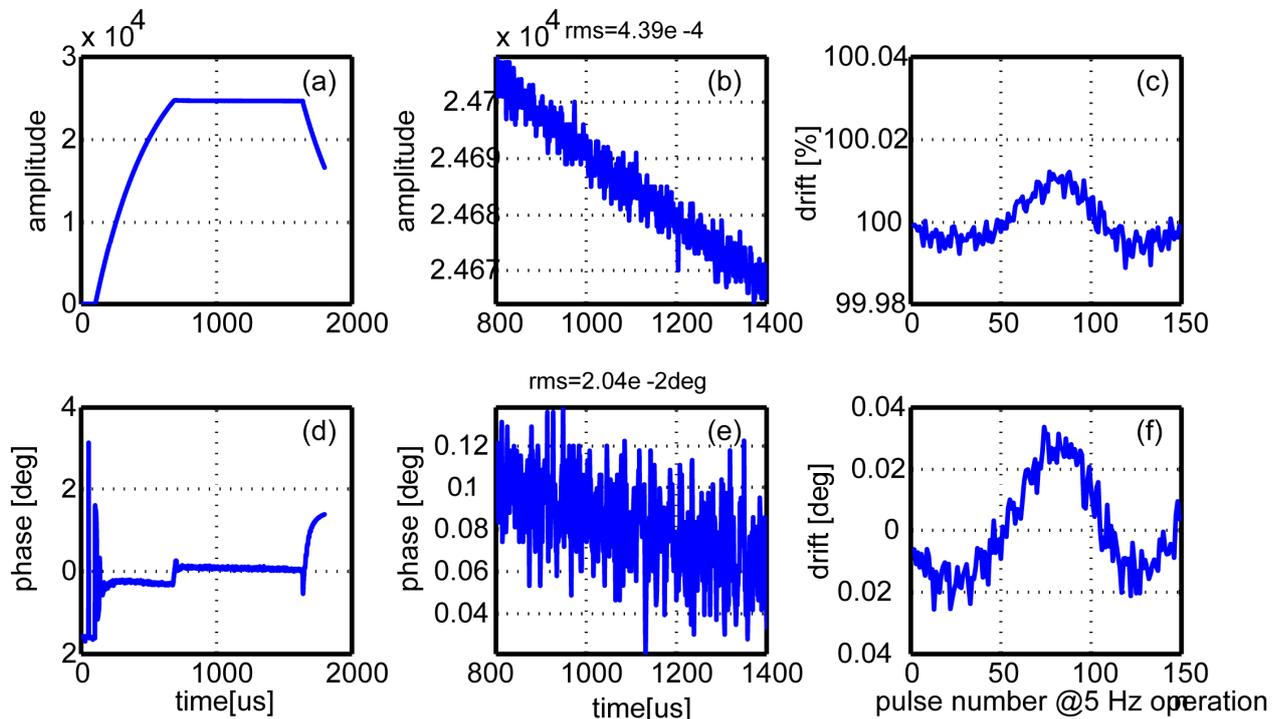


図3：システムの安定度．(a)振幅，(b)振幅（拡大），(c)振幅の150パルス（30秒間）のパルス内平均値のドリフト，(d)位相，(e)位相（拡大），(f)位相のパルス内平均値のドリフト．

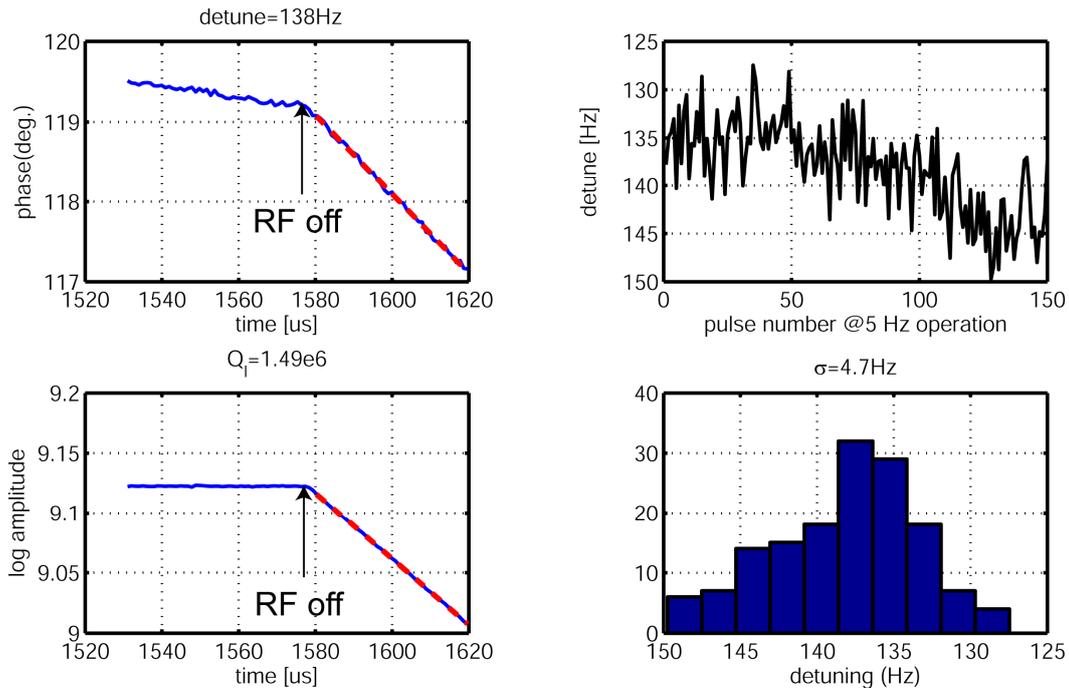


図4：空洞のRFオフ前後の位相変化(左上、破線は最小二乗法によるフィッティング)および減衰曲線(左下、破線は最小二乗法によるフィッティング)，求められた空洞離調の30秒間の変化(右上)とそのヒストグラム(右下)。

きる。振幅のサグを含めたパルス内安定度は、0.05%rms, 0.02度rms程度である。30秒間のパルスの振幅および位相のパルス内平均値のドリフトを図3の(c), (f)に示す。この間のドリフトは0.01%, 0.02度程度であった。

4. LLRF系のソフトウェア利用

空洞への高周波入力停止後は、空洞に蓄積されたエネルギーは空洞自身の共振周波数（運転周波数との差を離調と呼ぶ）により減衰するため、空洞電界の減衰の時定数から空洞のQ値を、減衰時の位相の時間変化から離調を算出できる。図4に高周波停止後のRF波形の位相（左上）および振幅の対数（左下）を示す。高周波停止後の減衰について、最小二乗法でフィッティングし、離調およびQ値を求めた。フィッティングした直線が赤の破線で示している。このときの結果は離調が-138Hz, Q値が1.49e6である。このときの運転はフィードフォワードのみで、フィードバックは行っていない。空洞電界は8MV/m程度であった。30秒間のパルス（合計150パルス）での、離調の変化をFig. 4の右上に示す。この離調の変化は主として空洞のマイクロフォニクスによるものと考えられる。ヒストグラムを図4の右下に示す。このときの標準偏差は4.7Hzである。DESYのTTFにおける測定値は、1時間で4Hz程度であった。このときは10分程度の周期の遅い変化も含んでいるが、今回の測定は30秒間のもので、短時間の変動のみである。ただし、10分程度のゆっくりした離調については、フィードバックにより補正が可能であり、問題は少ないと思われる。

5. まとめ

STFでは超伝導空洞を使った運転が行われ、いくつかのLLRF関連の試験評価が進められている。今年の秋には4空洞の試験が行われる予定で、ベクターサム制御等、多空洞運転での試験が行われる予定である。

参考文献

- [1] <http://www.linearcollider.org/cms/?pid=1000437>
- [2] 松本利広 他, “KEK-STFでのLLRF系の現状”, Proceedings of the 3rd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan And the 31st Linear Accelerator Meeting in Japan, August 2-4, 2006, Sendai, Japan.
- [3] 福田茂樹 他, “KEK超伝導RF試験装置 (STR)のRF源の開発”, These proceedings.
- [4] 松本利広 他, “複数の中間周波数を用いたデジタル低電力RF制御系”, These proceedings.
- [5] 三浦孝子 他, “KEK-STFにおける TM010モードのパスバンドによるRF不安定性”, These proceedings.
- [6] 片桐広明 他, “LLRF計測制御のためのFPGAを利用した高速データ収集”, These proceedings.
- [7] 道園真一郎 他, “デジタル低電力高周波系の開発”, 加速器学会誌, 5 (2007), to be published.