

## DIGITAL LOW-LEVEL RF CONTROL SYSTEM USING MULTI-INTERMEDIATE FREQUENCIES

Toshihiro Matsumoto<sup>1</sup>, Hiroaki Katagiri, Takako Miura, Shinichiro Michizono, Yoshiharu Yano and Shigeki Fukuda  
High Energy Accelerator Research Organization (KEK)  
1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801, Japan

### Abstract

In a superconducting accelerator, an FPGA-based low-level rf system is adopted and a digital feedback control system is utilized to satisfy the requirement of stability in the accelerating field. A digital low-level rf system using multi-intermediate frequencies (IF-Mixture technique) has been developed at STF (Superconducting rf Test Facility) in KEK. A superconducting cavity was operated using this IF-mixture technique and the stability under the feedback operation was measured.

### 複数の中間周波数を用いたデジタル低電力RF制御系

#### 1. はじめに

超伝導空洞を用いる ILC(International Linear Collider)では、1台のクライストロンあたり26台の空洞を励振させる高周波源の構成になっている<sup>[1]</sup>。このILCの高周波源の低電力高周波(LLRF)系では、振幅安定度0.07%、位相安定度0.24度の加速電場への要求を満たすため、ADC、DAC、FPGA/DSPで構成される制御用基板を用いて、振幅・位相のベクターサムによるフィードバック(FB)制御を行う。このベクターサムによるFB制御では、高周波源での空洞と同数のADCが必要となる。しかし多数のADCを制御用基板に配置することは、基板開発が困難となり、基板製作の費用もかかるものとなる。

空洞内のrf測定に必要とするADC数を減らすことが可能な新しい(IF-Mixture)方法を用いたデジタルLLRF制御系の開発を進めており、これまでに空洞シミュレーターによる評価を行った<sup>[2]</sup>。今回、KEKのSTF(Superconducting rf Test Facility)で1台の超伝導空洞<sup>[3]</sup>からの信号を四分割して、IF-Mixture法を用いたデジタルLLRF制御系の動作試験を行い、FB制御の実証試験を行った。

#### 2. IF-Mixture 法

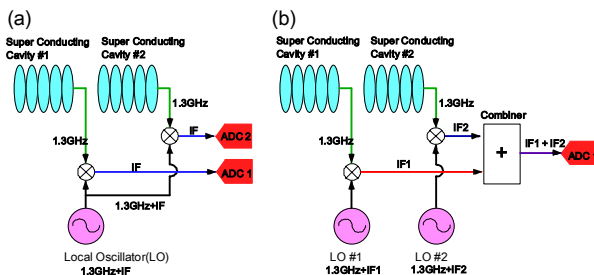


図1: デジタルLLRF系の構成模式図:(a) 通常の構成、(b) IF-Mixture法を用いた構成

通常のデジタルLLRF制御系の模式図を図1(a)に示す。空洞からのrf信号は、ダウンコンバーター(Mixer)で空洞内の振幅と位相の情報を保持したまま、中間周波数(IF)へ周波数変換される。IF周波数へ変換された信号はADCへ入力、サンプリングによりデジタル信号となる。

IF-Mixture法を用いたデジタルLLRF制御系(図1(b))では、空洞からのrf信号はそれぞれに異なるIF周波数へ周波数変換後、合成器でIF信号の重ね合わせを行い、ADCの入力信号となる。このときADCのサンプリング周波数(SR)とIF周波数の間に、 $N \cdot IF = M \cdot SR$  (N, Mは整数)の関係式が成り立つものとする。

超伝導空洞の場合、rf信号のI、Q成分の変化はゆっくりであり、IF周波数の1周期の間、定数とみなすことができる。2つのIF信号の合成の場合、ADCでサンプリング後のIF信号列は

$$\begin{aligned} X(n) &= x_1(n) + x_2(n) \\ &= I_1 \cdot \cos\left(\frac{2\pi \cdot M_1}{N_1} \cdot n\right) + iQ_1 \cdot \sin\left(\frac{2\pi \cdot M_1}{N_1} \cdot n\right) \\ &\quad + I_2 \cdot \cos\left(\frac{2\pi \cdot M_2}{N_2} \cdot n\right) + iQ_2 \cdot \sin\left(\frac{2\pi \cdot M_2}{N_2} \cdot n\right) \end{aligned}$$

と表すことができる。各IF周波数のI/Q成分は、この合成されたIF信号列から

$$\begin{aligned} I &= \frac{2}{N} \sum_{n=1}^N X(n) \cos\left(\frac{2\pi \cdot M}{N} \cdot n\right) \\ Q &= \frac{2}{N} \sum_{n=1}^N X(n) \sin\left(\frac{2\pi \cdot M}{N} \cdot n\right) \end{aligned}$$

より計算する<sup>[4,5]</sup>。その際、IF周波数に対応する(M,N)を用いて計算を行うことにより、特定のIF周波数のI/Q成分のみを求めることができる。

<sup>1</sup> E-mail: toshihiro.matsumoto@kek.jp

### 3. デジタルLLRF制御系

デジタルLLRF制御系は、ADC、DAC、FPGA/DSPを持つ制御用基板、IQ変調器、ダウンコンバーター、rf信号の周波数変換を行うための局所発振器(Local Oscillator, LO)や制御用基板のクロック信号発振器を含む信号発生部で構成される(図2)。今回の試験において、制御用基板、IQ変調器、ダウンコンバーターはSTFのLLRF系の制御のために開発されたものを用いている<sup>[6,7]</sup>。

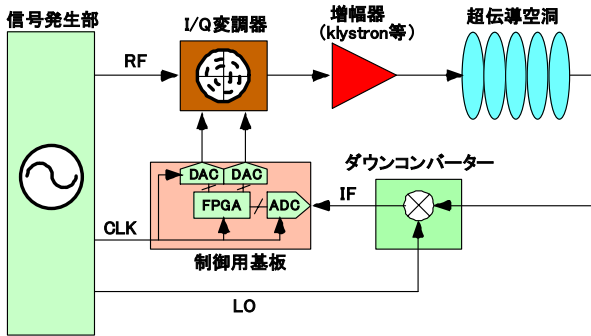


図2: デジタルLLRF制御系を含めたシステム全体の模式図

IF-Mixture法によるデジタルLLRF制御系の場合、異なる周波数を持つIF信号を作るため、周波数の異なる複数台のLO系を準備する必要がある。またIF信号の周波数は、制御用基板のADCサンプリング(SR)に対して、 $N \cdot IF = M \cdot SR$  ( $N$ ,  $M$ は整数)の関係を満たさなければならない。このためIF信号およびクロック信号は、運転周波数であるrf周波数のCWを基にして、プログラム可能な信号分配用ICを搭載したAD9510により作られる。LO信号は、IQ変調器

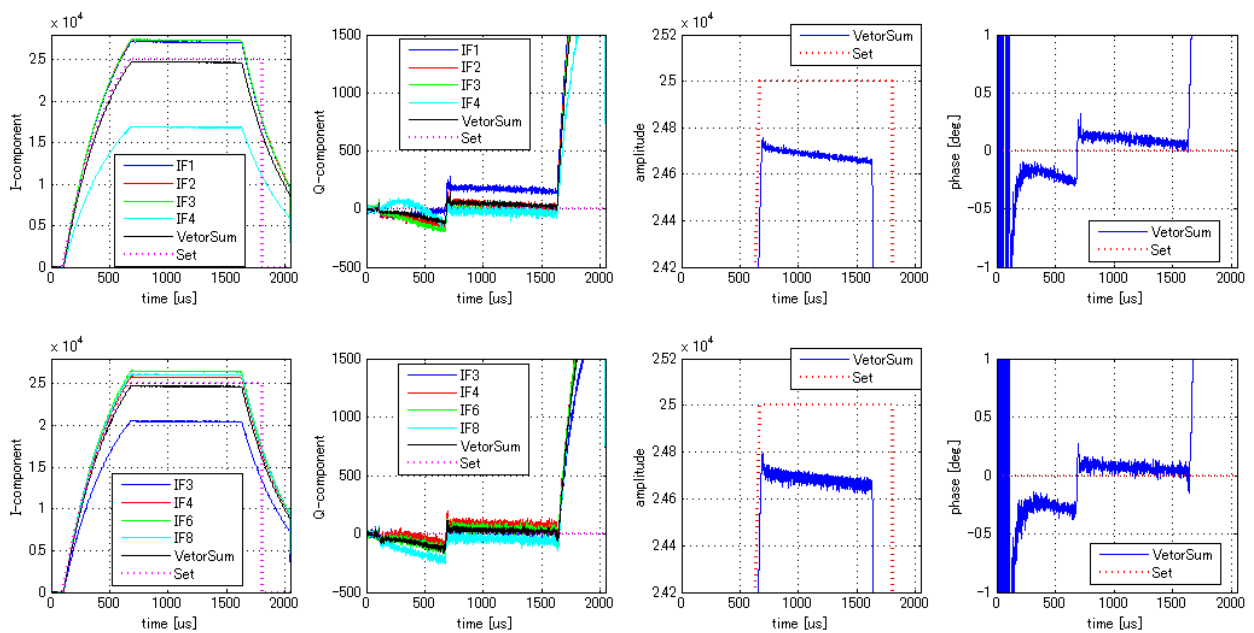


図5: 4 IF-Mixture法を用いたFB運転時におけるI/Q成分および振幅・位相  
上段: (N,M1,M2,M3,M4)=(9,1,2,3,4); 下段: (N,M1,M2,M3,M4)=(24,3,4,6,8)

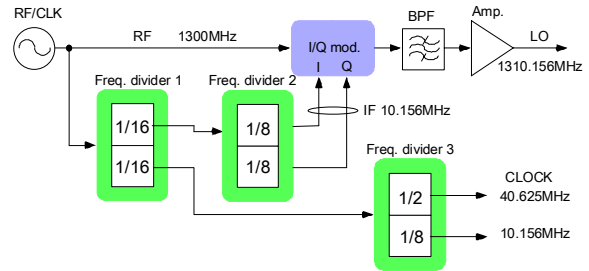


図3: LO系、クロック信号部の模式図

(AD8346)により、CWのIF周波数とrf周波数を合成して作られる(図3)。LO系では、その信号の位相雑音そのままIF信号の測定誤差へと伝播されるため、運転周波数の1.3GHzのCWと同程度の位相雑音が求められる。このLO信号の位相雑音を測定した結果、オフセット周波数10Hz~10MHzの範囲で0.02mdeg.程度であり、同じオフセット周波数でのrf信号の位相雑音0.015mdeg.と同程度であった。

今回の実験では、4つのIF信号の合成、およびデジタル信号処理による分離を目指した(図4)。

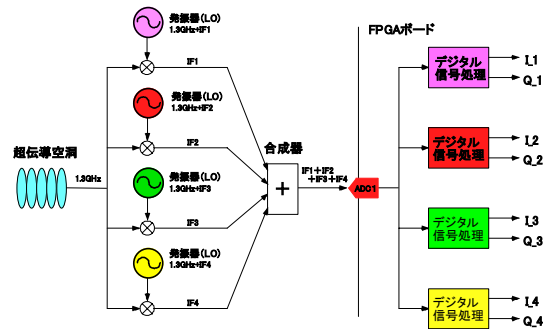


図4: 4 IF-Mixture法のセットアップ図

FPGAのクロックおよびADCのサンプリング周波数は40.625MHz、(N,M1,M2,M3,M4) = (9,1,2,3,4)と(24,3,4,6,8)の二組をIF周波数として用いた。STFで使われているFPGAのプログラムを基にして、1ADCに対して4 IF-Mixture用のデジタル信号処理を行えるようにプログラムの改修を行った。

#### 4. フィードバック動作試験

IF-Mixture法によるデジタルLLRF制御系を使い、STFで超伝導空洞を用いた動作試験を行った。図5は、(N,M1,M2,M3,M4) = (9,1,2,3,4)と(24,3,4,6,8)の各々の場合において、設定値25,000で比例FB制御(ゲインは80)をした場合の動作である。FBループは閉じており、合成したIF信号から空洞信号の分離を確認できた。この動作試験の結果、フラットトップ(750~1600  $\mu$ s)における振幅の安定度は、(9,1,2,3,4)で0.07%(RMS)、(24,3,4,6,8)で0.09%(RMS)であり、位相安定度はともに0.03°(RMS)であった。

図6に(N,M1,M2,M3,M4) = (24,3,4,6,8)における比例FB制御のゲインとフラットトップ(650~1650 $\mu$ s)で

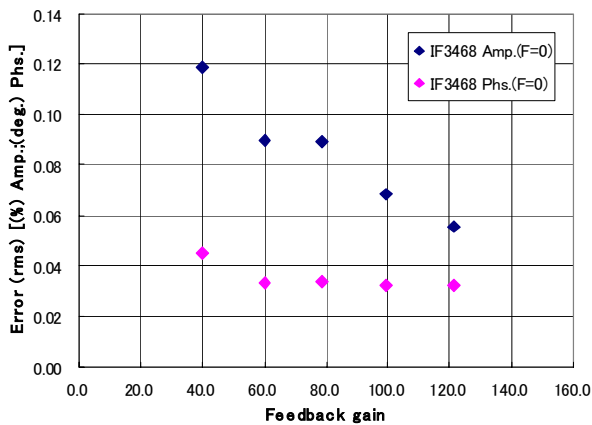


図6: 比例FB制御のゲインとフラットトップ(750  $\mu$ s~1600  $\mu$ s)の振幅・位相のエラーの相関図

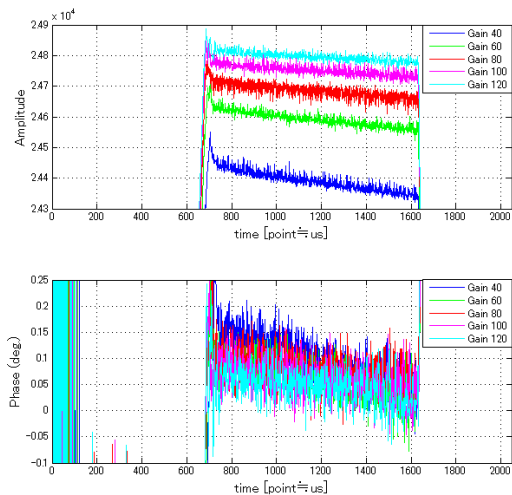


図7: 比例FB制御でのゲインと振幅・位相波形

の振幅・位相安定度の相関図を示す。位相のエラーはゲインに依らずに0.03°(RMS)で一定であったが、振幅のエラーはゲインが上がるに従って減少した。フラットトップでの波形を見ると、振幅のサグがエラーに寄与しており、その傾きがFBのゲインにより変化していることが分かる(図7)。このサグは増幅器(クライストロン)の時間的なサグによるものと思われ、適切なフィードフォワードを設定することにより打ち消すことが可能と考えられる。サグの影響が小さくなる1000~1050  $\mu$ s間での振幅・位相の安定度は、0.03%(RMS)、0.02°(RMS)という結果であった。

#### 5. 将来計画

今年秋に予定されている4空洞の運転試験において、IF-Mixture法を用いたデジタルLLRF制御系の実証試験を行う予定である。

本試験では、4つの合成されたIF信号からデジタル信号処理が可能なADCは1チャンネルのみであったが、複数のチャンネルでIF-Mixture法による信号処理が可能になるようにプログラムの改修を進めている。

#### 6. まとめ

STFにおいて超伝導空洞を用いたIF-Mixture法によるデジタルLLRF制御系の評価試験を行った。信号分配器とIQ変調器を用いて、運転周波数のrf信号と同程度の位相雑音を持つLO信号源を作ることができた。このLO信号を用いて、空洞からの信号を4つに分離、周波数の異なるIF信号へ周波数変換後に合成、ADCで測定後にデジタル信号処理で信号の復元を行うことができた。この信号を基にフィードバック運転を行い、パルス内の振幅安定度0.07%(RMS)、位相安定度0.03°(RMS)の結果が得られた。振幅のサグの影響を除いた場合には、振幅安定度0.03%(RMS)、位相安定度0.02°(RMS)であった。

#### 参考文献

- [1] <http://www.linearcollider.org/cms/?pid=1000437>
- [2] T.Matsumoto, et al., "Development of Digital Low-level RF Control System using Multi-intermediate Frequencies", PAC07, Albuquerque, New Mexico, USA, pp. 2110-2112.
- [3] 齋藤健治 他, "LL 9セル空洞のSTF 大電力試験結果", this conference.
- [4] M.Grecki, et al., "Estimation of IQ Vector Components of RF Field - Theory and Implementation", MIXDES 2005, Cracow, Poland, pp. 783-788.
- [5] S.Simrock, et al., "Considerations for the Choice of the Intermediate Frequency and Sampling Rate for Digital RF Control", EPAC2006, Edinburgh, Scotland, pp. 1462-1464.
- [6] S.Michizono, et al., "Performance of LLRF System at STF in KEK", this conference.
- [7] S.Michizono, et al., "Status of the Low-level RF System at KEK-STF", PAC2007, Albuquerque, USA, pp.2113-2115.