

## DEVELOPMENT OF DIGITAL LOW-LEVEL RF CONTROL SYSTEM USING MULTI-INTERMEDIATE FREQUENCY

Toshihiro Matsumoto<sup>1,A)</sup>, Hiroaki Katagiri<sup>A)</sup>, Shinichiro Michizono<sup>A)</sup>, Yoshiharu Yano<sup>A)</sup>, Zheqiao Geng<sup>B)</sup>,  
Shigeki Fukuda<sup>A)</sup>

<sup>A)</sup> High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

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

<sup>B)</sup> Institute of High Energy Physics (IHEP/China)

19 Yu Quan Lu Beijing 100039, People's Republic of China

### 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 has been developed and the stability of the feedback operation is estimated using a cavity simulator based on an FPGA board. In this study, the rf system is examined and the results of estimations that are obtained using the cavity simulator are reported.

## 複数の中間周波数を用いたデジタル低電力RF制御系の開発

### 1. はじめに

超伝導空洞を用いた加速器では、ビーム性能の要求に応じて、空洞内の振幅と位相に対して各々1%から0.01%、 $1^\circ$ から $0.01^\circ$ の安定性が要求とされる。この要求を満たすため低電力RF(LLRF)制御系では、ADC、DAC、FPGA/DSPで構成される制御用基板(FPGAボード)を用いて、ベクターサムによるフィードバック(FB)制御やフィードフォワード(FF)制御が行われる。このデジタル化されたLLRF制御系では、空洞からピックアップされたRF信号はダウンコンバーター(Mixer)により、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。このIF周波数へ変換された信号は、ADCでのサンプリング後にデジタル信号へ変換される。

超伝導加速器では、1台のクライストロンで多数の空洞を励振させる。通常、空洞と同数のADCがベクターサムを用いたFB制御には必要であり、ILCの場合には20台以上の空洞を1台のクライストロンにより励振させる(図1(a))。しかし多数のADCを1枚のFPGAボード上に配置することは、基板開発が困難となり、また製作の費用もかかることになる。

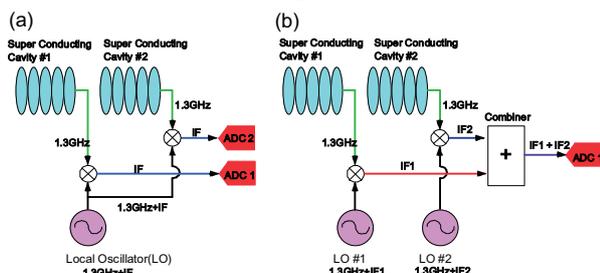


図1: デジタル低電力RF系の構成模式図:(a) 通常の構成、(b) IF-Mixture法を用いた構成

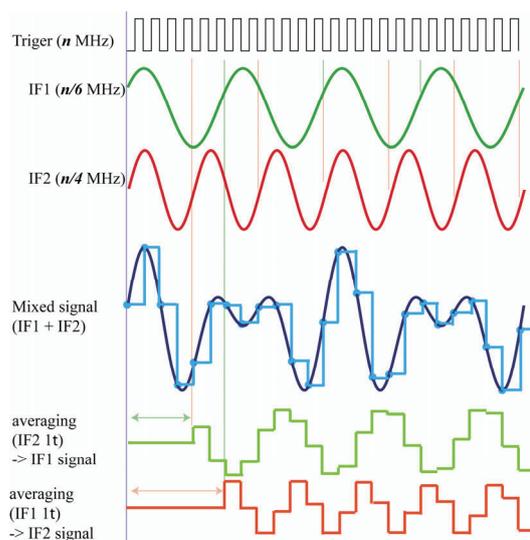


図2: IF-mixture法の概念図

空洞内のRF測定に必要とするADC数を減らすために、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いる(図1(b))。この制御系において空洞からのRF信号は、それぞれに異なるIF周波数へ周波数変換が行われた後、合成器により重ね合わせが行われる。この合成されたIF信号は、ADCでのサンプリングの後、デジタル信号処理により元の信号へ復元が行われる(図2)。

### 2. IF-Mixture法

合成したIF信号は、次のように表すことができる。

$$\begin{aligned} & x_1(t) + x_2(t) \\ &= I_1(t) \cdot \cos(\omega_{IF1}t + \phi_1) + iQ_1(t) \cdot \sin(\omega_{IF1}t + \phi_1) \\ & \quad + I_2(t) \cdot \cos(\omega_{IF2}t + \phi_1) + iQ_2(t) \cdot \sin(\omega_{IF2}t + \phi_2) \end{aligned}$$

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

$I(t)$ ,  $Q(t)$ ,  $\varphi$ は、それぞれ信号のI、Q成分、ループ位相を表し、 $\omega_{IF} = 2\pi \cdot IF$ である。超伝導空洞の場合、IF周波数の1周期の間、I、Q成分の変化はゆっくりであるため定数とみなす。ADCでサンプリング後のIF信号列は次のようになる。

$$x_1(n) + x_2(n) = I_1 \cos\left(\frac{2\pi}{N_1} \cdot n\right) + iQ_1 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{N_1} \cdot n\right) + I_2 \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{N_2} \cdot n\right) + iQ_2 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{N_2} \cdot n\right)$$

このIF信号列の連続した $N_1$ もしくは $N_2$ 個の和を取ることにより、信号列 $x_1(n)$ 、 $x_2(n)$ を再構成でき、計算結果は

$$X_1(n) = \sum_{n=1}^{N_2} (x_1(n) + x_2(n)) = \frac{\sin \frac{N_2 \theta_1}{2}}{\sin \frac{\theta_1}{2}} \cdot x_1(n)$$

$$X_2(n) = \sum_{n=1}^{N_1} (x_1(n) + x_2(n)) = \frac{\sin \frac{N_1 \theta_2}{2}}{\sin \frac{\theta_2}{2}} \cdot x_2(n)$$

となる。 $\theta$ は隣り合う信号間の位相差( $\theta = 2\pi/N$ )、 $X_1(n)$ 、 $X_2(n)$ は再構成された $x_1(n)$ 、 $x_2(n)$ である。今回の試験では、ADCのサンプリング周波数として40.625MHzを選び、 $(N_1, N_2) = (6, 4)$ を選択した。IとQ成分の計算は次式で求める[1]。

$$I = \frac{2}{N} \sum_{n=1}^N x_i(n) \cos\left(\frac{2\pi}{N} \cdot n\right)$$

$$Q = \frac{2}{N} \sum_{n=1}^N x_i(n) \sin\left(\frac{2\pi}{N} \cdot n\right)$$

このIF-Mixture法を用いた場合、IF信号の測定からIQ成分の決定までに $(N_1 + N_2)/SR$ の遅延時間が発生する。これは通常の方法でIQ成分を計算するものとは比べて大きい遅延時間である。しかし、この方法では、平均化の過程でADCサンプリングにおけるノイズやジッターの影響を減らすことが期待できる。

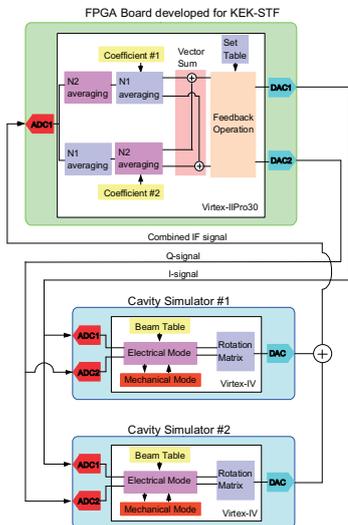


図3: IF-Mixture法試験系の模式図

### 3. デジタルフィードバック系

#### 3.1 全体構成

IF-Mixture法の実験系は、図3のようにFPGAボード、2つの空洞シミュレーター、信号分配系で構成され、これらはKEK-STFのデジタルLLRF系のために開発された[2,3,4]。FPGAボードはFPGAチップ(Virtex II Pro)、2個の14ビットDAC(AD9764)、10個の16ビットADC(LTC2204)で構成される。

空洞シミュレーターは市販のFPGAボード(Xilinx, Xtreme DSP Development Kit-IV)で構成され、ボードにはFPGAチップ(VirtexIV)、2個の14ビットADC(AD6645)、2個のDAC(AD9772A)が使われている。これらの空洞シミュレーターは4×IF周波数で動作して、離散系の空洞の状態方程式の計算を行い、空洞からの信号を再現する[5]。出力されたIF信号は合成器(Mini-Circuit, ZFSCJ-2-1)により合成される。

#### 3.2 信号分配系

このデジタルFB系では、FPGAボード、空洞シミュレーター#1、#2の3種類のクロック信号が使われる。KEK-STFで開発されたRF & CLKユニット(1300MHzのCW信号を出力)とプログラム可能な信号分配用ICを搭載したAD9510により信号分配系が構成され、各ユニットへのクロック信号が供給される。

この信号分配系により、FPGAボードと空洞シミュレーター#1へ40.625MHz、空洞シミュレーター#2へ27.083MHzのクロック信号が送られる。図5に合成されたIF信号に周波数スペクトラムを示す。

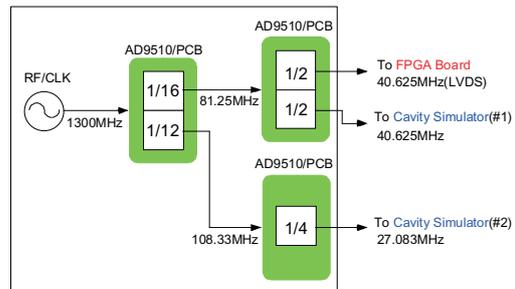


図4: 信号分配系の模式図

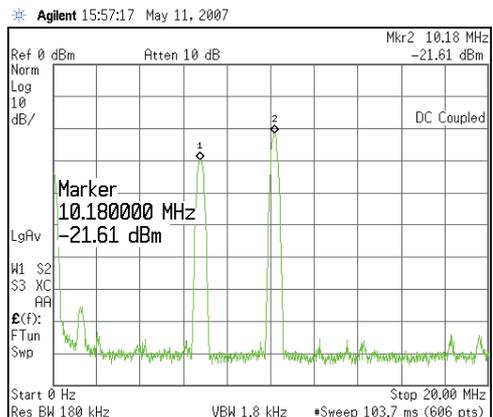


図5: 合成されたIF信号の周波数スペクトラム

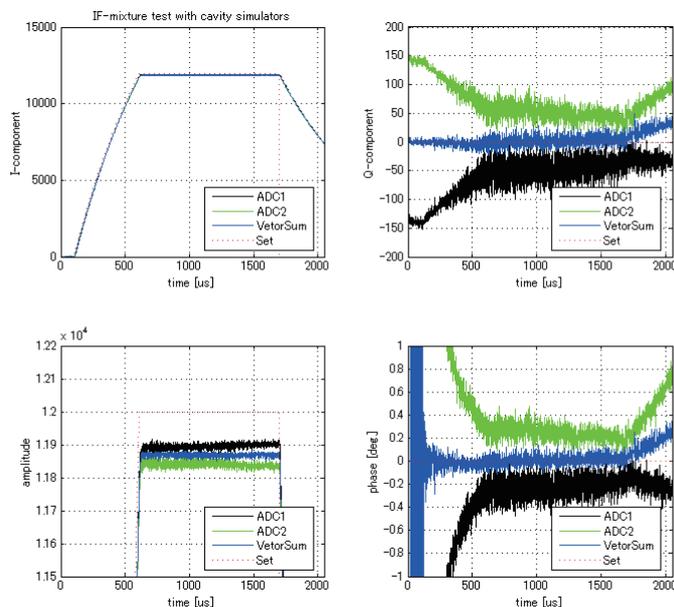


図6: 2台の空洞シミュレーターを用いたFB運転時におけるI/Q成分および振幅・位相

#### 4. フィードバック動作試験

空洞シミュレーターを用いてIF-Mixture法によるデジタルLLRF制御系の動作試験を行った。図6は、比例制御(ゲインは90)で設定値を12,000に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信号から各々の空洞シミュレーターの信号の分離を確認できた。この動作試験の結果、振幅と位相の安定度は、各々0.05%(RMS)、 $0.05^\circ$  (RMS)であった。

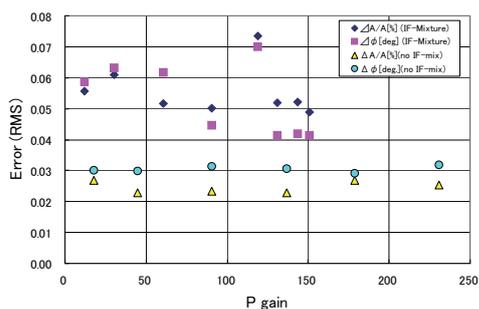


図7: 比例制御のゲインと振幅・位相のエラーの相関図

図7にゲインとフラットトップ(650~1650  $\mu$ s)での振幅・位相安定度について、IF-Mixture法を用いた場合と通常の構成の相関図を示す。通常の場合と比べてIF-Mixture法の場合、振幅・位相ともに安定度に悪化が見られた。これに対して、デジタル信号処理のアルゴリズムの調査を行っている。しかし、この振幅・位相安定度はKEK-STF phase 1での要求(0.3%(RMS)、 $0.3^\circ$  (RMS)以下)を満たすものである。

#### 5. 将来計画

本試験では、2台の空洞シミュレーターによりIF-

Mixture法を用いたデジタルLLRF制御系の動作試験を行った。現在、4台の空洞シミュレーターを用いて、4空洞の場合でのIF-Mixture法の有効性の検討および試験準備を行っている。

KEK-STF phase 1では、8台の超伝導空洞による運転が行われる予定である。今回のIF-Mixture法によるデジタルLLRF制御系の実証試験のための準備として、信号分配系からLO信号を発生させるように改造を進めている。

#### 6. まとめ

IF-Mixture法によるデジタルLLRF系の評価試験を2台の空洞シミュレーターを用いて行った。1つのADCで各シミュレーターからの信号の分離ができ、振幅・位相の安定度は、各々0.05%(RMS)、 $0.05^\circ$  (RMS)の結果が得られた。

4台の空洞シミュレーターを用いた場合でのIF-Mixture法の有効性の確認、及びKEK-STF phase 1の超伝導空洞を用いた実証試験への準備を進めている。

#### 参考文献

- [1] 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.
- [2] T.Matsumoto, et al., "Low-level RF System for STF", LINAC2006, Knoxville, USA, pp. 586-588.
- [3] S.Michizono, et al., "Status of the Low-level RF System at KEK-STF", PAC2007, Albuquerque, USA.
- [4] S.Fukuda, et al., "RF Source of Superconducting RF Test Facility (STF) in KEK", this conference.
- [5] T.Czarski, et al., "TESLA cavity modelling and digital implementation in FPGA technology for control system development", Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A 556 (2006) 565-576.