

STF-2 加速器でのビーム誘起波を用いたデジタル LLRF 系の信号校正 SIGNAL CALIBRATION OF DIGITAL LLRF SYSTEM USING BEAM-INDUCED FIELD FOR THE STF-2 ACCELERATOR

松本利広 ^{*,A,B)}, 荒川大 ^{A)}, 片桐広明 ^{A)}, 三浦孝子 ^{A,B)}, 松本修二 ^{A,B)}
Toshihiro MATSUMOTO ^{*,A,B)}, Dai ARAKAWA ^{A)}, Hiroaki KATAGIRI ^{A)},
Takako MIURA ^{A,B)}, Shuji MATSUMOTO ^{A,B)}

^{A)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

^{B)} SOKENDAI (The Graduate University for Advanced Studies)

Abstract

In accelerators that operate for long RF pulses of several hundred microseconds or CW RF operation, a single high-power RF source supplies its power to multiple cavities. In such RF systems, vector-sum feedback control is employed to keep the vector sum of the amplitude and phase of each cavity constant, and calibration of the amplitude and beam phase from each cavity is important for stable beam operation. There is a method to calibrate the amplitude and phase of each cavity using beam-induced waves. Beam operation using this method on the STF-2 accelerator has contributed to stable operation at the target ILC-spec beam pulse length and beam current.

1. はじめに

数百マイクロ秒以上の長パルスや CW 運転を行う加速器では、1 台の大電力高周波源から複数の空洞に電力を供給する構成がある。その場合の高周波系では、各空洞の振幅・位相のベクトル和を一定にするフィードバック制御を採用した LLRF 系が重要な役割を担うことになる。更にビームの安定な運転のためには、各空洞からの振幅とビーム位相の校正が重要になってくる。このような高周波系に対して、ビーム誘起波による振幅・位相を測定することで各空洞の振幅・位相の校正を行う手段が DESY の FLASH [1] や XFEL [2] の運転で用いられている。

国際リニアコライダー (ILC) [3] の場合、電子・陽電子を加速する高周波源は、10 MW L-band (1.3 GHz) マルチビーム・クライストロン (MBK) で 39 台の超伝導空洞に対してパルス幅 1.65 ms, 繰り返し 5Hz で高周波を供給する。電子・陽電子を各々 5 GeV から 125 GeV まで加速する ILC の主リニアックでは、この高周波源を 236 セット据え付ける構成となっている。このため ILC の運

転時には、各空洞の振幅・位相の校正を自動化することも重要になってくる。

KEK の超伝導リニアック試験 (STF) 棟では、ILC の実現に向けて STF-2 加速器 [4] (Fig. 1) の開発、運転を進めている。この STF-2 加速器のビーム運転において、ビーム誘起波による各空洞の振幅とビーム位相の測定を行い、その情報を元に校正を行うことで安定なビーム運転に寄与することができた。ここではビーム誘起波による LLRF 系の信号校正とその結果、今後の検討について報告する。

2. STF-2 加速器の高周波系

ILC の高周波系では、平均 31.5 MV/m \pm 20% の加速勾配を持つ超伝導空洞に対して加速ユニット当たりの平均加速電場を最大、かつビーム加速を行う領域に対して振幅安定度 $\Delta A/A = 0.07\%$ (rms)、位相安定度 $\Delta \varphi = 0.32$ deg. (rms) が要求される。これらの要求を満たすため、高周波系の個々の超伝導空洞の入力パワーと位相をリモートで調整できること、各空洞の振幅・位相をピックアップ、そのベクトル和が一定になるフィードバック制御を行う必要がある。

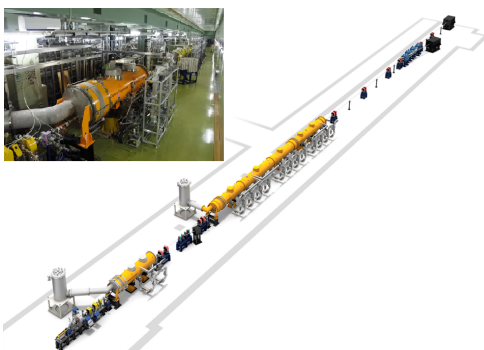


Figure 1: STF-2 accelerator.

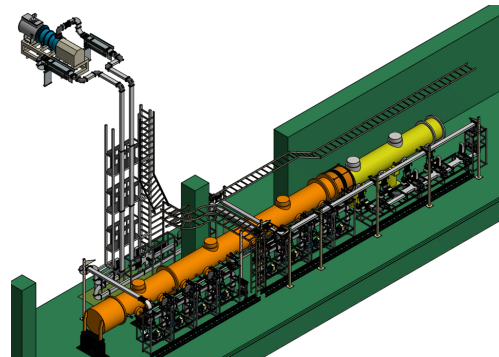


Figure 2: High power distribution system for CM1/2a module at the STF-2 accelerator.

* toshihiro.matsumoto@kek.jp

STF-2 加速器には3つの高周波系があり、その高周波源と負荷の組み合わせは、5 MW 出力のクライストロンと常電導空洞の RF 電子銃、800 kW クライストロンとキャプチャー・モジュールの2台の超伝導空洞、10 MW MBK と 12 台の超伝導空洞を組み込んだ CM1/2a モジュールとなっている。各超伝導空洞への RF 入力は、空洞直前に配置する可変ハイブリッドや可変移相器で構成する局所電力分配系により、RF 入力レベルとその位相を調整して供給される (Fig. 2)。

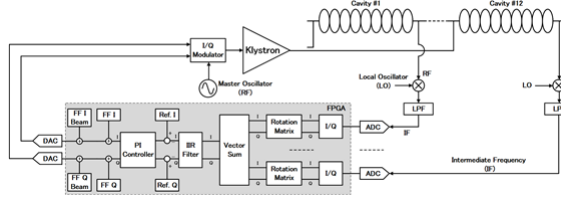


Figure 3: Simplified diagram of digital LLRF feedback loop system at the STF-2 accelerator.

各空洞の振幅・位相をベクトル和によるフィードバック制御は、アナログ-デジタル変換器 (ADC)、デジタル-アナログ変換器 (DAC)、Field Programmable Gate Array (FPGA) を搭載したデジタル制御ボードを用いた低電力高周波 (Low-Level RF, LLRF) 系により実現する。高周波系の信号図を Fig. 3 に示す。

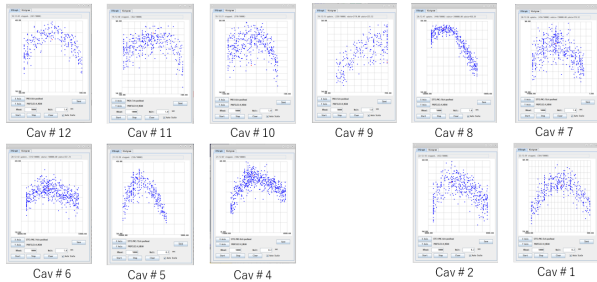


Figure 4: Energy scan results for each cavity using waveguide phase shifter.

これまでの STF-2 加速器の運転でのビーム位相の調整には、空洞直前に配置した個々の可変移相器で空洞の RF 位相を変化させてビームエネルギーの変化を測定 (Fig. 4)、各空洞で電子ビームのエネルギー最大となる位置に可変位相器を設定した。次に各空洞の測定値の校正用の回転行列を調整、同じ位相になるように合わせた後にベクトル和一定となるフィードバック制御を開始してきた (Fig. 5)。

今回、10 MW MBK、CM1/2a モジュールの 12 台の超伝導空洞で構成する高周波系を用いて、ビーム誘起波による空洞信号校正の試験を行った。

3. ビーム誘起波による空洞電圧

ビーム誘起による誘起波電圧 \vec{V}_{Cb} は、以下の一般的な空洞方程式を基に評価できる。

$$\frac{d\vec{V}_{Cb}}{dt} + (\omega_{1/2} - j\Delta\omega)\vec{V}_{Cb} = 2\omega_{1/2}R_L\vec{I}_{b0} \quad (1)$$

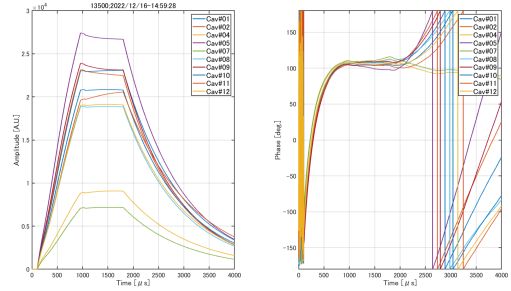


Figure 5: Amplitude and phase of eight cavities before phase calibration based beam-induced field.

ここで、 $\omega_{1/2}$ 、 $\Delta\omega$ 、 R_L は空洞の半値幅、離調度、シャントインピーダンス、 \vec{I}_{b0} はビーム電流である。ビーム電流のパルス幅が空洞の時定数に対して非常に短い場合、誘起電圧は時間に対してほぼ線形に変化するので、

$$\frac{d\vec{V}_{Cb}}{dt} \approx 2\omega_{1/2}R_L\vec{I}_{b0} \quad (2)$$

と近似できる。ここで

$$\omega_{1/2} = \frac{\omega_0}{2Q_L} = \frac{\pi f_0}{Q_L}, \quad R_L = \frac{1}{2} \left(\frac{r}{Q} \right) Q_L \quad (3)$$

なので、ビーム誘起波の空洞方程式は

$$\frac{d\vec{V}_{Cb}}{dt} = 2\omega_{1/2}R_L\vec{I}_{b0} = \left(\frac{r}{Q} \right) \pi f_0 \vec{I}_{b0} \quad (4)$$

となる。この式を積分することにより、ビーム誘起電圧 \vec{V}_{Cb} は

$$\vec{V}_{Cb} = \left(\frac{r}{Q} \right) \pi f_0 \vec{I}_{b0} \Delta t \quad (5)$$

として求まり、ビーム誘起電圧 \vec{V}_{Cb} の位相はビーム電流 \vec{I}_{b0} の位相と等しいことが分かる。

通常、ビーム誘起波は高周波から空洞にパワーを供給し、加速電場 \vec{V}_C がある状況で測定する。今回の測定では、フラットトップ状態の加速電場に短いバンチトレインを入射することで、バンチ入射時の加速電場を起点としてビーム誘起電圧 \vec{V}_{Cb} を評価した。

4. STF-2 加速器での位相校正

ビーム誘起波測定のパラメータは、バンチ電荷 20 pC/bunch、162.5 MHz 間隔、1000 バンチ (ビームパルス幅 6.15 μ s) で RF 電子銃から電子ビームを出射、高周波系は空洞#3 と#6 を除いた 10 台の超伝導空洞を開ループで運転であった。Figure 6 にビーム誘起波領域前後での加速電圧 $|\vec{V}_C|$ を示す。

今回の試験では、振幅波形でビーム入射時とその前後を一次式で fitting することにより、その交点を入射時として求めた。イベント毎の各空洞のビーム入射時を求め、その平均値を用いてビームパルス幅を評価したところ、 $6.26 \pm 0.29 \mu$ s であった。これは 1000 バンチでの設定値 6.15 μ s と一致している (Fig. 7)。

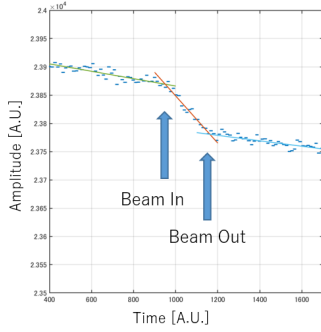


Figure 6: Change in cavity electric field due to beam-induced field.

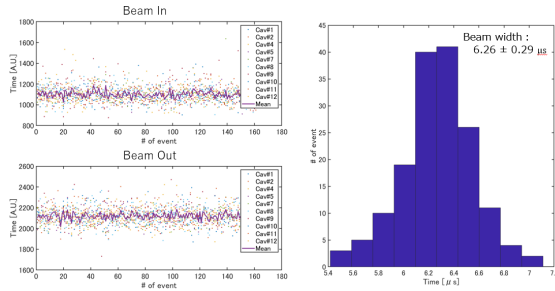


Figure 7: Beam injection/exjection timing in each cavity and evaluated beam width.

Figure 6 のビーム誘起波を含んだ加速電場 \vec{V}_C を I/Q 表示したものを Fig. 8 に示す。ここで、ビーム入射時の空洞電場の位相 θ_{cav} 、ビーム誘起電圧の大きさ A_{beam} 、位相 ϕ_{beam} である。空洞電場位相 θ_{cav} とビーム誘起波位相 ϕ_{beam} から求めた ψ_{beam} 、これが各空洞で等しくなることを空洞間の位相差の校正に用いる。

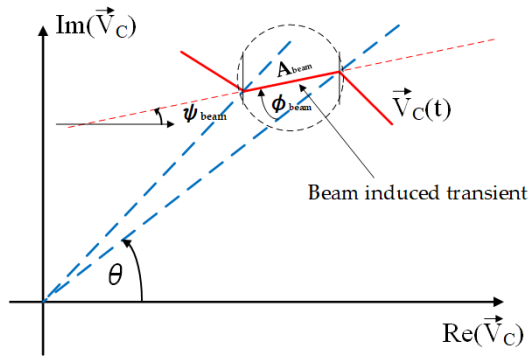


Figure 8: Relation diagram between cavity waveform (amplitude and phase) and beam-induced field (amplitude and phase).

各空洞での空洞電場位相 θ_{cav} 、ビーム誘起位相 ϕ_{beam} の測定結果を Table 1 に示す。空洞電場位相の揺らぎは空洞に依らず $\pm 2\text{deg.}$ 程度、ビーム誘起位相の揺らぎは $\pm 10 \sim 20\text{deg.}$ 程度であった。空洞電場位相の揺らぎと比較してビーム誘起位相の揺らぎが大きくなった原因として、高周波系の発振器と RF 電子銃の発振器の同期や各

Table 1: Measured Results of θ_{cav} and ϕ_{beam}

Cavity	θ_{cav} [deg.]	ϕ_{beam} [deg.]
#1	111.23 ± 1.87	-6.58 ± 15.65
#2	108.11 ± 1.94	2.21 ± 16.62
#4	111.92 ± 1.94	-3.08 ± 8.56
#5	107.81 ± 2.01	7.12 ± 17.25
#7	112.96 ± 1.96	-0.87 ± 7.81
#8	110.87 ± 1.92	19.27 ± 14.77
#9	109.07 ± 1.98	-17.72 ± 16.29
#10	108.08 ± 1.96	-6.10 ± 17.41
#11	108.24 ± 1.99	-12.79 ± 17.97
#12	110.07 ± 1.92	1.79 ± 16.26

高周波系のタイミングの揺らぎ、等が考えられる。

今回の位相校正では、 $\psi_{beam} = 116\text{deg.}$ にして各空洞の校正用回転行列を調整、設定した。Figure 9 に設定後の各空洞の位相波形を示す。校正の結果、各空洞の位相差は最大 30deg. 程度に広がった。

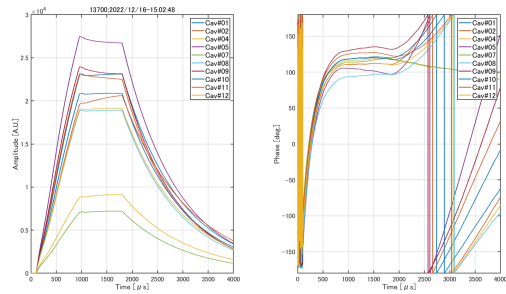


Figure 9: Amplitude and phase of eight cavities after phase calibration based beam-induced field.

各空洞の位相差が校正したことにより、次に導波管移相器を用いて各空洞の位相がまとまるように調整した。しかし、空洞#8 は立体回路系で上流に位置する空洞#5～#7 の入力パワーを調整する可変ハイブリッドの設定で一方に振り切れたため、空洞位相を纏めきることができなかった (Fig. 10)。

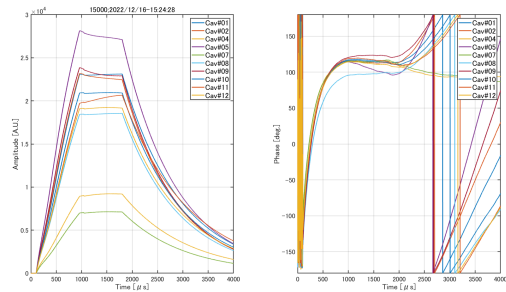


Figure 10: Amplitude and phase of eight cavities after adjustment with the waveguide phase shifter.

この位相校正を実施後にベクトル和一定のフィード

バック制御で CM1/CM2a の高周波系の運転を行った結果、最終的にバンチ電荷 35 pC/bunch、118000 バンチ (ビームパルス幅 726 μ s) の ILC スペックを満たすパルス長、ビーム電流で運転することに成功した [5]。この校正を行う前では、ビーム電流を増やそうとするとビーム損失に由来する空洞クエンチが頻繁に起こっていたが、校正後は安定なビーム運転が可能になった。また、バンチ間のエネルギー差は $\sim 1.5\%$ と見積もられたが、高周波系の同期関係を見直すことで改善するものと思われる。

5. まとめ

1 台の大電力高周波源から複数台の空洞に電力を供給する高周波系では、各空洞の振幅・位相のベクトル和を一定にするフィードバック制御を用いて運転を行う。このベクトル和フィードバック制御では各空洞の振幅・位相の校正が重要であり、これはビーム誘起波を測定することで実現可能である。この方法を STF-2 加速器に用いてビーム運転を行ったところ、目標とする ILC スペックのビームパルス長、ビーム電流での安定な運転に寄与した。

今回の校正でビーム誘起波の揺らぎ ($\pm 10\sim 20$ deg. 程度) が空洞波形の揺らぎ (± 2 deg.) と比較して大きかった件については引き続き調査を進める。また ILC での応用を目指して、ビーム誘起波による空洞の振幅・位相の校正方法の自動化を進めていく。

参考文献

- [1] Ayvazyan, Valeri, “Digital RF Control System for the Pulsed Superconducting Linear Accelerator”, Free Electron Lasers, IntechOpen, 2012.
- [2] Walker, N. *et al.*, “Beam-Transient-Based LLRF Voltage Signal Calibration for the European XFEL”, (2022).
- [3] <https://linearcollider.org/>
- [4] 山本 康史, 福田 将史, 松本 利広, 森川 祐, ILC に向けた STF-2 クライオモジュールによる 33 MV/m でのビーム加速実証, 加速器, 2021, 18 巻, 3 号, p. 143-150.
- [5] Kurata, M. *et al.*, “Report of same pulse length and current electron beam acceleration as ILC specification with STF-2 cryomodules”, in Proc. 20th Annu. Meet. Part. Accel. Soc. Japan, WEOA8, 2023, this meeting.