

EVALUATION OF LLRF STABILITY AT KEK-STF

Takako Miura^{1,A)}, Shinichiro Michizono^{A)}, Toshihiro Matsumoto^{A)}, Hiroaki Katagiri^{A)}, Yoshiharu Yano^{A)}, Shigeki Fukuda^{A)}, Yoshihito Okada^{B)}

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

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

^{B)} NEC network and sensor systems, Ltd.

1-10 Nisshin-chou, Fuchuu, Tokyo, 183-0036

Abstract

Super-conducting rf test facility (STF) has been progressed in KEK. In STF phase-1, 4-cavities were driven by one RF source using a vector-sum feedback control. Measurements of feedback-control-instabilities arising from passband of TM_{010} mode other than π mode and evaluation of a feedback gain margin of LLRF were performed.

KEK-STFにおける低電力高周波源の安定性評価

1. はじめに

超伝導加速RF施設(STF)では、国際リニアコライダー(ILC)用の9セル超伝導加速空洞の試験が行われている。STFの低電力高周波源(LLRF)は、高い振幅・位相安定度を満足し、信号処理アルゴリズムに柔軟性を持たせるためデジタル制御系を採用している。STF Phase-0.5では、1台の加速空洞に対するRF制御が行われ[1]、新たにSTF Phase-1では、1つのRF源からパワーを分配し[2]、同時に4台の加速空洞を運転するベクター・サム制御で、振幅0.007%rms、位相0.018°rmsの安定度が確認された[3]。今回、LLRFの特性を調べるために、不安定に起因する π モード以外の TM_{010} パスバンドの振る舞いと、ゲイン余裕について測定を行ったので報告する。

2. STFの低電力RF制御系

STFの低電力RF系は、FPGAを用いた高速デジタルフィードバック(FB)制御(IQ制御)を採用している。図1にデジタルFB系の概念図を示す。1300MHzの信号を10MHzの中間周波数(IF)に周波数変換した後、IFの4倍でサンプリングし、FPGA内部でI/Qに分離、FB計算を行っている。FPGAは書き換え可能であるため、信号処理アルゴリズムに柔軟性を持たせることができる。FBのループ時間は短いことが望まれるが、 π モード以外の $8/9\pi$ モードなどによる不安定性の振る舞いを調べたり、システムのゲイン余裕などの特性を調べるために、FPGA内部にデジタル遅延機構を設けて活用している。DAC出力はベースバンドであるが、 π モードに対して0.7 MHzしか離れていない $8/9\pi$ モードの成分を落とすため、0.4 MHzの2次のローパスフィルター(LPF)を通してしている。

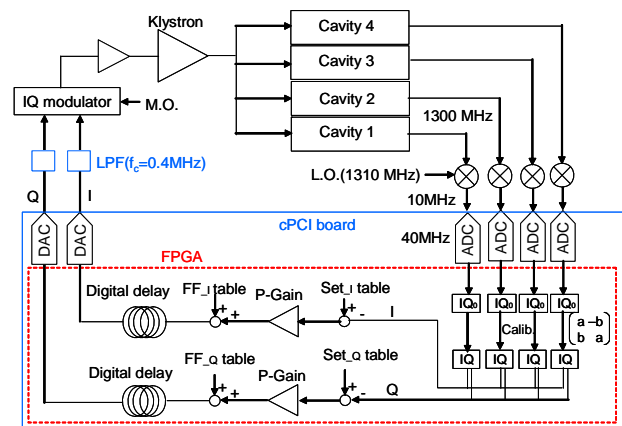


図1 : STFにおけるデジタルFB系の概念図

TM_{010} モードのパスバンドによるフィードバック不安定性

$8/9\pi$ モードなどの TM_{010} パスバンドによるFB不安定性について調べるため、DAC下流のローパスフィルタを外し、FBのループ遅延時間を変化させて測定を行った。表1に各空洞の TM_{010} パスバンドモードと π モードとの周波数差($f_{\pi} - f_{n,9\pi}$)を示す。 π モードの共振周波数を1300MHzに合わせるために、個々の空洞で離調周波数の調整を行った結果、各モードの周波数は、空洞によって若干異なっている。STF Phase-0.5では、1台の空洞に対する測定を行い、ループ時間に対しておよそ $1/(f_{\pi} - f_{n,9\pi})$ 間隔で不安定と安定を繰り返すことを報告した[4]。今回は、4つの各空洞、およびベクター・サムの場合について測定を行った。

¹ E-mail: takako.miura@kek.jp

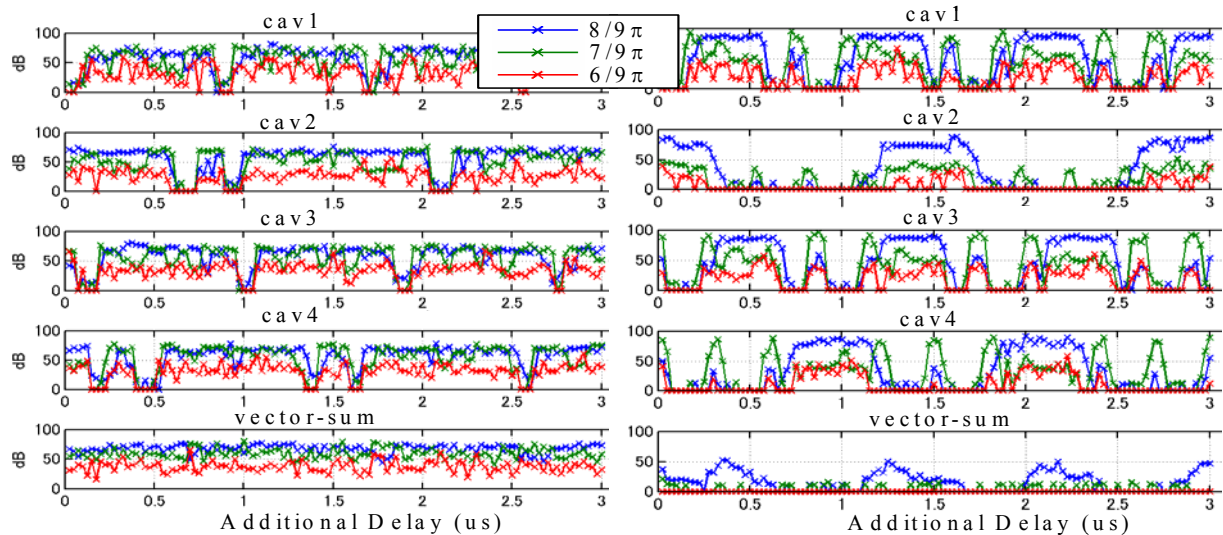


図2：FBループに加える遅延時間を変化させた場合の各空洞、及びベクトル・サムに現れる π モード以外のパスバンドモードの強度。(左図：比例ゲイン=55の場合、右図：比例ゲイン=5の場合)

表1：TM₀₁₀パスバンドの π モードとの周波数差。
(ネットワークアナライザによる測定結果)

mode	Cavity 1 $f_c - f$ (MHz)	Cavity 2 $f_c - f$ (MHz)	Cavity 3 $f_c - f$ (MHz)	Cavity 4 $f_c - f$ (MHz)
8/9 π	1.1675	0.7223	1.1225	0.8859
7/9 π	3.6413	3.5392	3.4742	3.3931
6/9 π	6.9246	7.3201	7.0056	7.0822
5/9 π	11.8131	11.6902	11.6116	11.5009
4/9 π	16.0743	16.4536	16.3576	16.2954
3/9 π	20.8873	20.7968	20.9104	20.6134
2/9 π	24.1013	24.5003	24.4863	24.1717
1/9 π	26.4603	27.2074	26.6434	26.6119

FBの比例ゲインは、高い場合(ゲイン=55)と低い場合(ゲイン=5)の場合の2種類について測定を行った。40MHzでデータ取得し、高速フーリエ変換(FFT)により周波数スペクトルに変換し、 π モード以外のモードに対してピーク強度を求めた。安定な場合は、 π モードしか存在しない。各モードの強度分布を、図2に示す。測定から得られたピークの周波数は、表1の周波数と一致することを確認した。測定の結果、主に8/9 π モードと7/9 π モードによって強く励振されて不安定となった。一方、6/9 π モードも観測はされたが、それ自身が不安定性を決める要因にはなっていない。クライストロンの帯域が6MHz、およびダウンコンバータに入っているフィルタの帯域も5MHzであるため、6/9 π モードより下のモードの影響は小さいと考えられる。8/9 π モードや7/9 π モードの周波数が各空洞で異なっているため、安定領域は各空洞毎に異なっている。ゲインが55の場合、安定領域は各空洞で非常に狭く、ベクトル・サムの場合はその重ね合わせであるために全ての領域で不安定となった。一方、ゲインが5と低い場合は、ベクトル・サムの場合、安定領域が大きく広がる結果となった。これは、4空洞を足し合わせて、1台の空洞の信号成分が1/4になった効果によるためと考え

られる。

3. ゲイン余裕

空洞の負荷Q値(Q_L)に対する、ループ時間とゲイン余裕の関係についてシミュレーションを行った。計算には、クライストロンの帯域、DAC出力側のLPF等も含んでいる。結果を図3に示す。空洞のQ_Lが大きくなるにつれてゲイン余裕が大きくなる。FBループは、DAC下流のLPFが無い場合は1.4 μ s程度、また別途測定したDAC下流のLPFでは多段のLC回路を含むいわゆる梯子型回路構成である0.5 μ s程度の遅延があり、通常運転時のFBループは2 μ s程度であると見積もられている。図3の結果から、ループ時間が現状の2 μ sより短くなると、急激にゲインを大きくできることがわかる。

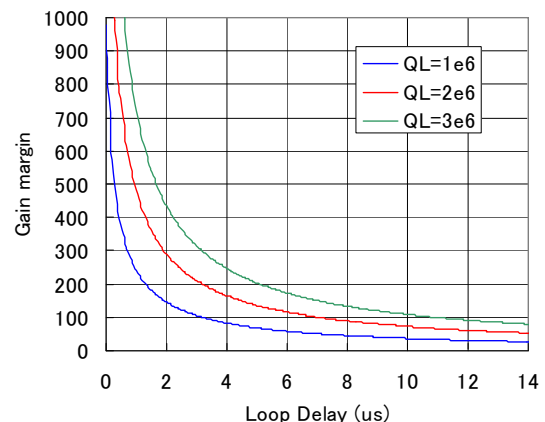


図3：ループ遅延時間に対するゲイン余裕のシミュレーション結果

一方、実際の測定も行った。FBはベクター・サム制御で行い、このときの各空洞 Q_L は、 $\sim 1 \times 10^6$ ($1.12 \times 10^6, 1.22 \times 10^6, 1.28 \times 10^6, 1.40 \times 10^6$)であった。あるFBの比例ゲインに対し、応答が不安定になるところまでFBループ時間を増加させた。比例ゲインは、56, 49, 34, 22.8の場合の測定を行った。ゲインが49の場合の結果を図3に示す。付与した遅延時間に元々のループ時間の $\sim 2\mu\text{s}$ を加えたものをループ時間としている。フラットトップ部は600ch \sim 1600chだが、200ch毎に領域を分けて変動をプロットした。FBループ時間が遅れるにつれてフラットトップ部の先端が落ち着くのに時間がかかり、先端部の変動がどんどん大きくなっていく。仮に、ビームが入射されたとしてその後のふらつきを考えると、フラットトップ先端の変動が大きくなっていく時間が安定限界と考えて良いと思われる。

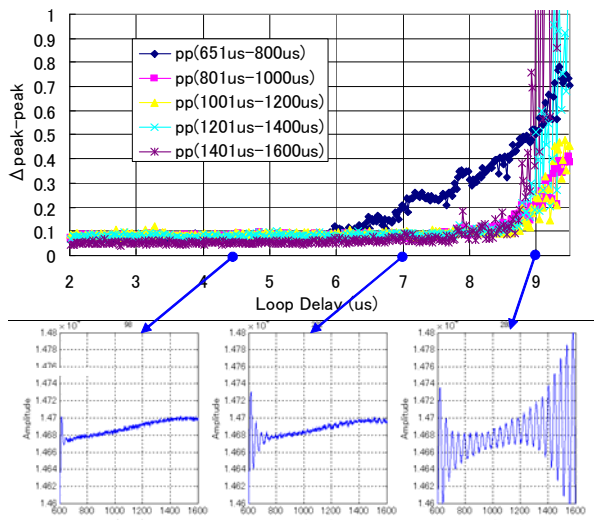


図3：FBループ時間に対するフラットトップ部の領域毎の変動。下図はフラットトップ部を拡大表示したもの。(Pgain=49の場合)

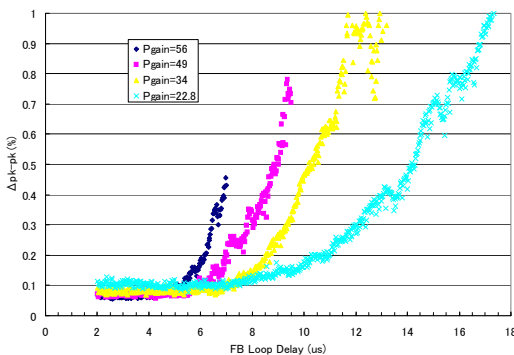


図4：FBゲインとループ時間との関係

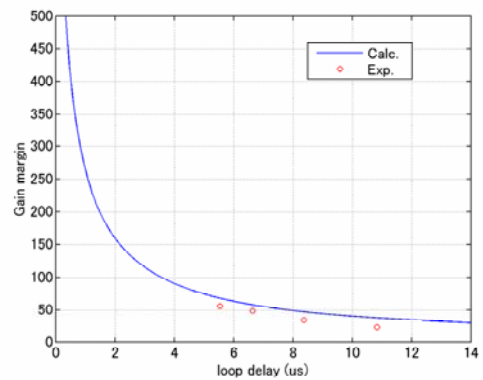


図5：測定と計算($Q_L=1.1 \times 10^6$)の比較

図4に各FBゲインに対する測定結果を示す。不安定となる点をどこにとるかは判断しにくいだが、今回は安定領域に対して変動が2倍になる点を選択し、計算と比較したものを図5に示す。測定と計算で若干異なるが、計算値は発振が生じる際のゲインである、このことを考慮すると比較的良く合っていると見える。この結果、シミュレーションの結果は妥当であり、FBゲインを上げるには、アナログフィルタをデジタルのIIRフィルタに変更するなどして可能な限り遅延を少なくすることが望まれる。

4. まとめ

STF Phase-1で、4台の空洞に対するベクター・サム制御によるフィードバック(FB)運転を行った。 π モード以外の TM_{010} パスバンドの振る舞いを調べ、ゲインが高いときには安定領域が全く無くなってしまいが、低ゲインのときは、逆に広い領域で安定となった。また、ゲイン余裕に関しても測定とシミュレーションを行い、両者でよく一致した結果が得られた。現在の通常運転時のFBループ時間 $\sim 2\mu\text{s}$ より少しでも遅延を減らすことでゲイン余裕を大きく増加させ、更なる安定度が得られることが予測される結果となった。

参考文献

- [1] S. Michizono, et al., "Performance of LLRF System at STF in KEK", Proceedings of the 5th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Hiroshima, Aug. 6-8, 2008
- [2] S. Fukuda, et al., "KEK超伝導RF試験装置(STF)のRF源の開発", in these proceedings.
- [3] T. Matsumoto, et al., "STF Phase-1におけるデジタル低電力高周波系", in these proceedings.
- [4] T. Miura, et al., "RF instability due to passband of TM_{010} mode in STF", Proceedings of the 5th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Hiroshima, Aug. 6-8, 2008