

RF instability due to passband of TM₀₁₀ mode in STF

Takako Miura¹, Hiroaki Katagiri, Toshihiro Matsumoto, Shinichiro Michizono, Yoshiharu Yano, Shigeki Fukuda
High Energy Accelerator Research Organization
1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

Abstract

In the superconducting rf test facility (STF) at KEK, high power tests of the nine-cell superconducting cavity for the international linear collider (ILC) have been performed. The RF instability due to passband of TM₀₁₀ mode was measured by changing the feedback loop-delay. Even under the conditions of no beam and low feedback-gain, the large instabilities due to 8/9 π -mode and 7/9 π -mode were appeared periodically depending on each difference of frequency from π -mode.

KEK-STFにおけるTM₀₁₀モードのパスバンドによるRF不安定性

1. はじめに

KEKの超伝導RF試験設備(STF)では、ILC用の9セル加速空洞の試験を行なっている。STFの運転は、基本周波数1.3 GHz、パルス幅1.5 ms、繰り返しが5 Hzとなっており、1msの加速電場の平坦部で0.3% rmsの振幅安定度、0.3度rmsの位相安定度を実現するために、FPGAを用いた高速なデジタルフィードバック制御による低電力高周波(Low-Level Radio Frequency, LLRF)系を採用している^[1,2]。加速には、ビームの加速効率の最も高い π モードが使われるが、 π モード以外のTM₀₁₀のパスバンドによるRF不安定性が、Vogel^[3]の論文などで指摘されている。今回、STFにおける π モード以外のTM₀₁₀のパスバンドによるRF不安定性の測定をおこなったので報告する。

2. STFにおける高周波パラメータ

表1にSTF用に製作された数台の加速空洞におけるTM₀₁₀パスバンドの π モードに対する周波数差を示す。各モードの周波数は、空洞の製作誤差により空洞間で若干異なっている。

表1 TM₀₁₀パスバンドの π モードとの周波数差^[4,5]

	cav#1@2K ff_{π} (MHz)	cav#2@2K ff_{π} (MHz)	cav#3@2K ff_{π} (MHz)	cav#4@常温 ff_{π} (MHz)
8/9 π	-0.70	-1.11	-0.88	-0.83
7/9 π	-3.53	-3.45	-3.39	-3.04
6/9 π	-7.31	-6.98	-7.08	-6.27
5/9 π	-11.69	-11.62	-11.50	-10.00
4/9 π	-16.47	-16.37	-16.31	-14.05
3/9 π	-20.83	-20.94	-20.63	-17.86
2/9 π	-24.54	-24.52	-24.20	-21.14
1/9 π	-27.25	-26.68	-26.64	測定不可能

フィードバックの安定性を考える際、クライストロンの帯域も考慮する必要がある。STFで使用しているクライストロン(TH2104A)に対して、1.3GHzの飽和出力が0.23MW, 1.18MW, 2.37MWの3つの場合に

ついでに帯域結果を図1に示す。ピークは1294MHzで、1300MHzからは低域にずれている。表1を参考にすると5/9 π ~8/9 π モードまでは、 π モードよりも透過特性が優れており、また、出力パワーが増加するにつれて帯域が広がる特性をもっている。

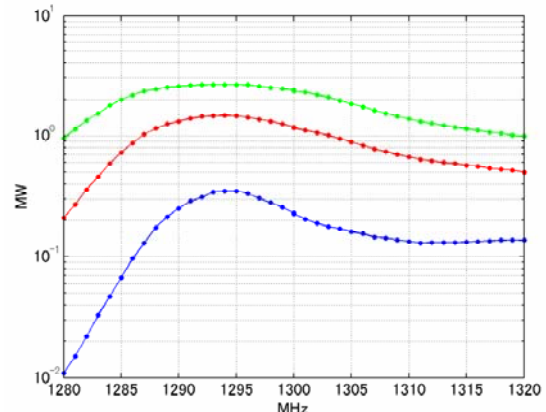


図1 クライストロン(TH2104A)帯域測定の結果

3. 各モードのゲイン余裕

不安定性の指標となるゲイン余裕の計算をおこなった。比例ゲイン(G_p)、ループディレイ(H_{delay})、空洞(H_{cav})、クライストロン(H_{kly})の各伝達関数からなる開ループ伝達関数 $H(s)$ は次式で表され、STFでのサンプリング周波数(40MHz)の離散系に変換してゲイン余裕を導出した。

$$H(s) = G_p H_{delay}(s) H_{cav}(s) H_{kly}(s) \quad (1)$$

式(1)の詳細、及び導出方法は、Vogel^[3]の論文に詳しく記載されている。結果を図2,3に示す。グレーに塗られている領域が安定で、白は不安定領域を意味する。8/9 π ~5/9 π モードでは、 G_p が小さくとも不安定になりやすく、 G_p が~20程度では、およそ $1/(f_{\pi} -$

¹ E-mail: takako.miura@kek.jp

$f_{n/9\pi}$ の間隔で安定・不安定領域が周期的に現れている。一方、 $1/9\pi$ や $2/9\pi$ モードは G_p が100程度では不安定性に寄与しないという計算結果となった。

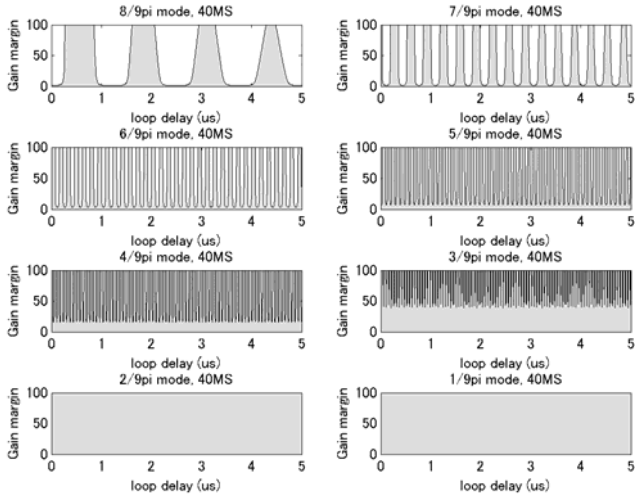


図2 ループディレイに対する各モードのゲイン余裕の計算結果(グレーの領域:安定、白の領域:不安定)

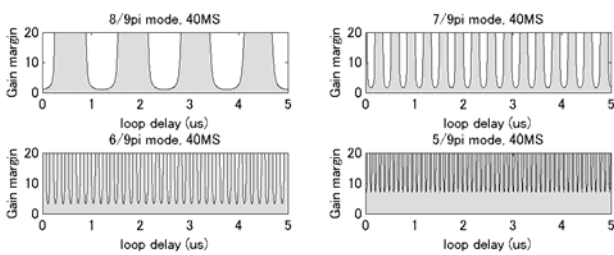


図3 図2の縦軸を拡大表示したもの

4. 測定

STFの低電力RF制御系を図4に示す。

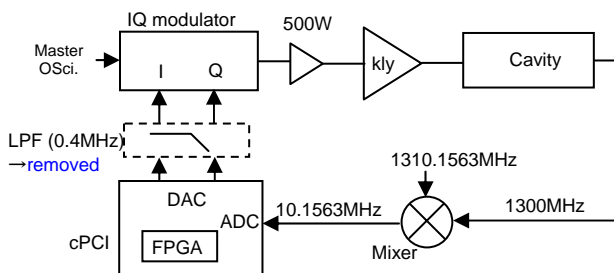


図4 STFのLLRF系

1300MHzの空洞からのピックアップ信号を中間周波数(IF) 10.1563 MHz (=1300/128)にダウンコンバートし、4倍の40.625 MHzでサンプリングを行なう。比例制御でフィードバックを行い、DACからはベースバンドでI,Qの信号が出力される。通常の運転では、 π モード以外の影響を除去するため、DACとIQモジュレータの間に0.4 MHzのローパスフィルター

(LPF)を入れているが、本研究では他のモードの影響を測定するため、このLPFは取り外して測定を行なった(LPFFを含めたLLRF系の性能に関しては道園^[2]の発表を参照のこと)。フィードバック演算はFPGAで行なっているが、ここデジタル遅延機構(0.0246 μ s/tap)を設け、フィードバックループに対し、1 tap~200 tapまで1 tapずつ付加的に遅延を加えて測定を行なった。 G_p は、5又は11.5の2種類について測定を行なった。尚、本測定は、表1の#cav4の空洞を使用し、フィードバックが不安定となって発振した場合でも、超伝導空洞がクウェンチしないような低いパワーで行なった。

5. 測定結果

LPF有りではフィードバックの G_p が100でも発振しないが、LPF無しの場合では、 G_p が5と小さな値の場合でも $8/9\pi$ や $7/9\pi$ モードによって発振状態となった。これは、図3の計算結果と矛盾しない。

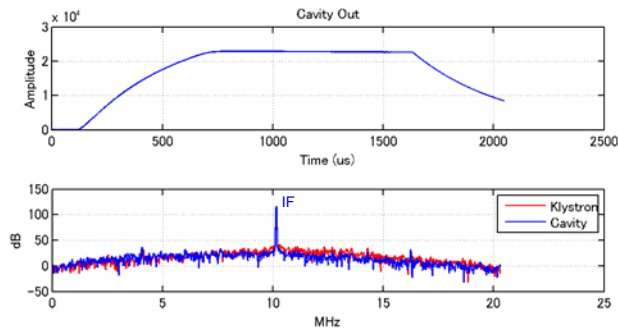
5.1 スペクトル波形

図5に空洞電界とフラットトップ部でのクライストロン出力と空洞の周波数スペクトルの例を示す。40.625MHzサンプリングで、データ数が2048ポイントであるので、周波数分解能は19.8kHzである。図5-(a)は安定な場合で、IF(π モード)の単一周波数しか現れていない。図5-(b)は、 $8/9\pi$ モードが立ち始め、空洞電界が不安定になっていく状態である。図5-(c)は、 $7/9\pi$ によって大きな発振状態となり、クライストロンからは多くの周波数が出力され、空洞に $8/9\pi$ や $6/9\pi$ モードも付随して励振された状態である。各モードの周波数と π モードとの周波数の差(Δf)を調べると、 $8/9\pi$ モードは $\Delta f=0.92$ MHz、 $7/9\pi$ モードは $\Delta f=3.15$ MHzであった。一方、 $6/9\pi$ モードは、 $\Delta f=\Delta f_{(8/9\pi)} \times 7$ 、又は $\Delta f_{(7/9\pi)} \times 2$ の値となっており、強く励振されているモードの高調波として現れていると考えられる。

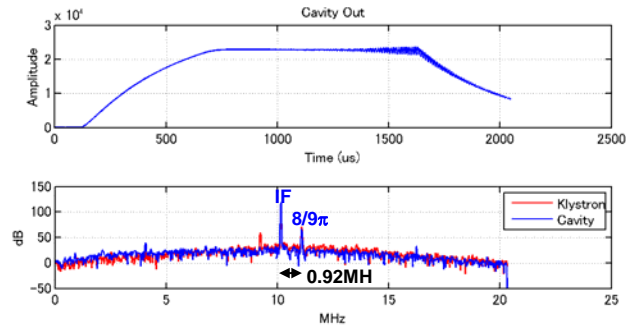
5.2 デジタル遅延スキンの結果

図6に、フィードバックループに加えたデジタル遅延量に対する $8/9\pi$ 、 $7/9\pi$ 、及び $6/9\pi$ モードの強度のグラフを示す。 $8/9\pi$ と $7/9\pi$ モードは単独でも不安定性を引き起こしているが、 $6/9\pi$ モードは、単独では不安定にならず、 $8/9\pi$ や $7/9\pi$ モードに付随して励振されたと考えられる。 $8/9\pi$ と $7/9\pi$ モードは、図3のような周期性を持っていると仮定し、 $8/9\pi$ と $7/9\pi$ モードが重なりあっていない箇所を選択して安定・不安定の周期を決定した。その結果、 $8/9\pi$ モードの周期は44 tap (1.08 μ s)、 $7/9\pi$ モードの周期は13 tap (0.32 μ s)となり、 $1/(f_\pi - f_{n/9\pi})$ から導出される値とほぼ一致した。

(a) 安定な場合(e.g. $G_p=11.5$, Delay=10 tap)



(b) 不安定な場合(e.g. $G_p=11.5$, Delay=24 tap)



(c) 非常に不安定な場合(e.g. $G_p=11.5$, Delay=108tap)

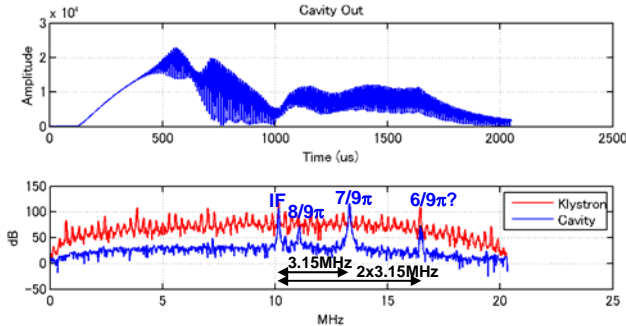


図5 空洞電界(上)とフラットトップ部に対応するクライストロン出力と空洞の周波数スペクトル(下)

5.3 ループディレイの推定

図6において、デジタル遅延時間が25 tap目の $8/9\pi$ モードの立ち上がりを基準として半周期22 tapを差し引くと、デジタル遅延が0のところは、不安定領

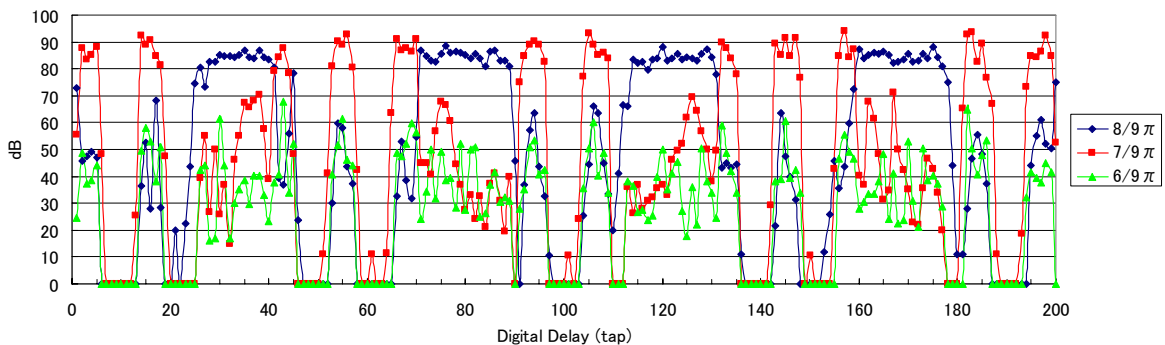


図6 $G_p=11.5$ の場合のデジタル遅延量に対する $8/9\pi$ 、 $7/9\pi$ 、及び $6/9\pi$ モードの強度

域の後ろから3 tap目であることが推測される。図3で示した計算結果の安定・不安定のパターンと比較すると、系のループディレイは $1.22\mu\text{s}$ 、又は $2.3\mu\text{s}$ と推定される。 $7/9\pi$ モードでも同様に導出し、 $8/9\pi$ モードと近い値を選択すると、 $1.3\mu\text{s}$ 、又は $2.26\mu\text{s}$ であった。一方、系の各構成要素の遅延時間を積算して見積もった値(DAC(10ns) + IQモジュレータ(160ns) + 導波管・ケーブル~100m (~500ns) + Mixer(130ns) + ADC(150ns) + FPGA(400ns))が約 $1.35\mu\text{s}$ であり、 $1.2\sim 1.3\mu\text{s}$ という値が妥当であると考えられる。

6. まとめ

KEKのSTFにおいて、 π モード以外の TM_{010} のパスバンドによるRF不安定性を調べたところ、フィードバックの比例ゲイン G_p が小さく、ビームの無い条件でも、 $8/9\pi$ や $7/9\pi$ モードによって不安定となった。デジタル遅延を加えてフィードバックループ時間を変化させた場合、およそ $1/(f_\pi - f_{n/9\pi})$ の周期で、安定・不安定を繰り返した。クライストロン出力が大きい場合や、 G_p が大きい場合は、 $6/9\pi$ や $5/9\pi$ モードなどによっても不安定となり、安定領域が大幅に狭くなると考えられる。また、数台の空洞に対するベクターサム制御を行なう場合は、同じモードでも空洞によって周波数が異なるため、ループ時間の調整で安定運転をするのは困難である。通常運転では、DACとIQモジュレータの間に0.4 MHzのLPFを入れているが、安定な運転には、このような何らかのフィルターが不可欠であると言える。

参考文献

- [1] T. Matsumoto et al., "Status of Low Power RF System in KEK-STF", 日本加速器学会年会, 2006, Sendai, WP76
- [2] S. Michizono et al., "Performance of LLRF System at STF in KEK", these proceedings, TP084
- [3] Vogel, "High gain proportional RF control stability at TESLA cavities", Phys. Rev. ST. 10, 052001 (2007)
- [4] E.Kako, Private communication
- [5] T.Saeki, Private communication