

# KEK PF 2.5 GeV リングにおける 過渡的変動補償の原理実証試験

第22回日本加速器学会年会  
@東京都市大学世田谷キャンパス  
2025/8/8

KEK PF RFグループ

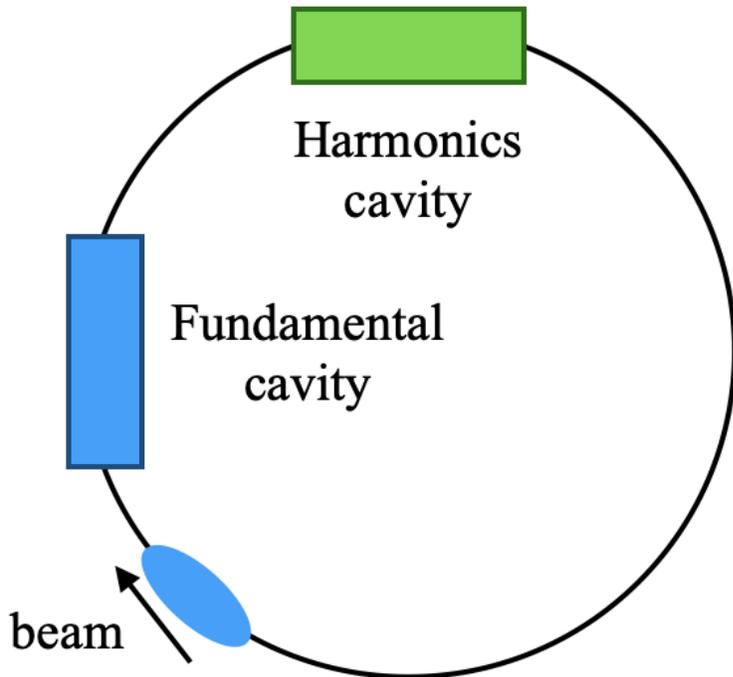
内藤大地, 山本尚人, 高橋毅, 本村新, 坂中章悟



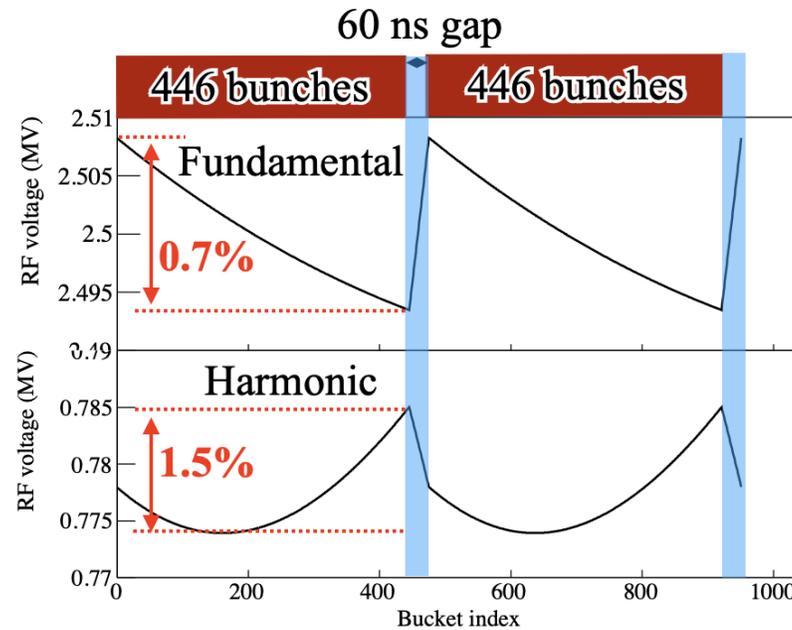
# 1. 極低エミッタリングにおける過渡的電圧変動の影響

- 極低エミッタンス放射光源でのバンチ内電子散乱によるビーム寿命低下、エミッタンス増大  
=>ダブルRFシステムによるバンチ伸長で軽減可能。
- フィルパターンに長いギャップがあると、空洞内で発生する過渡的電圧変動によりバンチ伸長が抑制される。

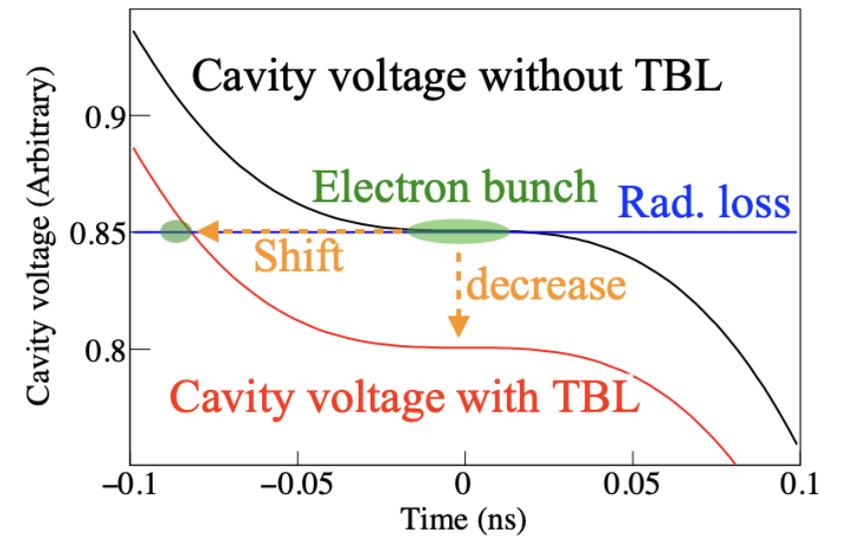
バンチ伸長のための  
ダブルRFシステム



空洞内の過渡的電圧変動@KEK-LS\*  
(数値解析的計算)



バンチ位相変動の概念図

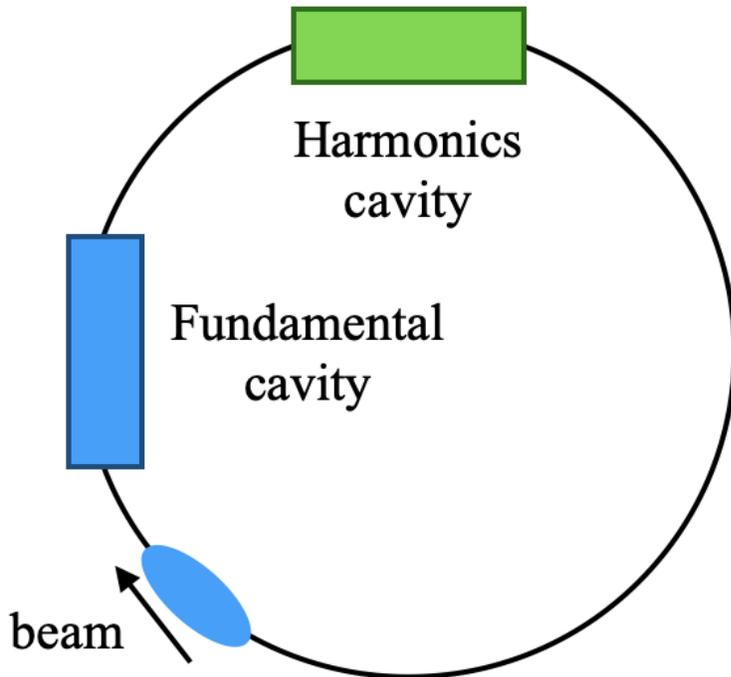


\*以前 KEKで提案されていた放射光計画

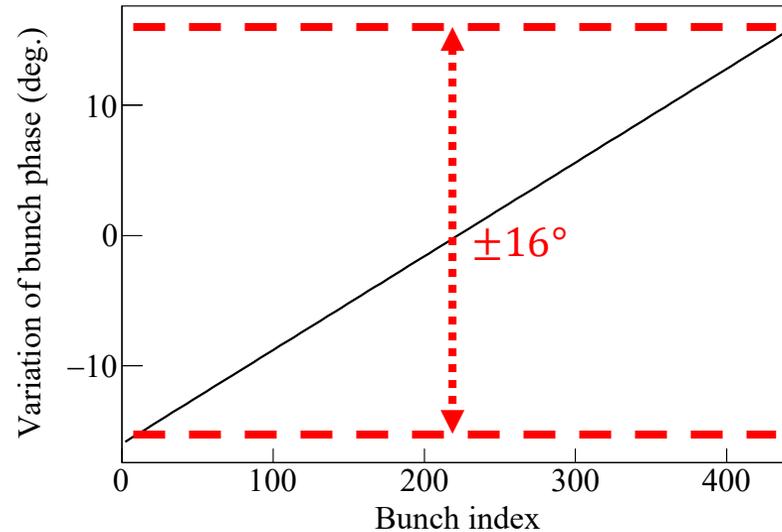
# 1. 極低エミッタリングにおける過渡的電圧変動の影響

- 極低エミッタンス放射光源での電子バンチ内散乱による悪影響(ビーム寿命低下、エミッタンス増大)  
=>ダブルRFシステムによるバンチ伸長で軽減可能。
- フィルパターンに長いギャップがあると、空洞内で発生する過渡的電圧変動によりバンチ伸長が抑制される。

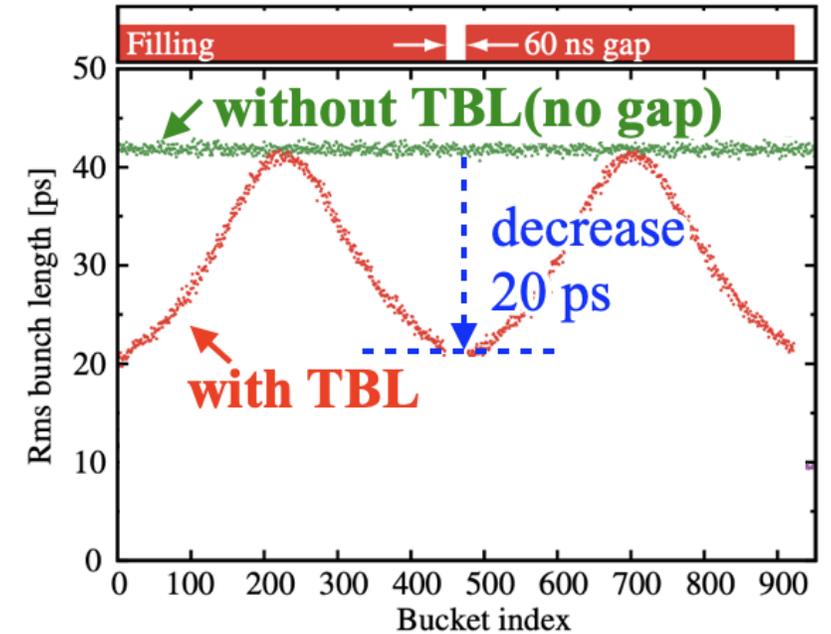
バンチ伸長のための  
ダブルRFシステム



バンチ位相シフト @KEK-LS\*  
(シミュレーション, by 山本尚人氏)



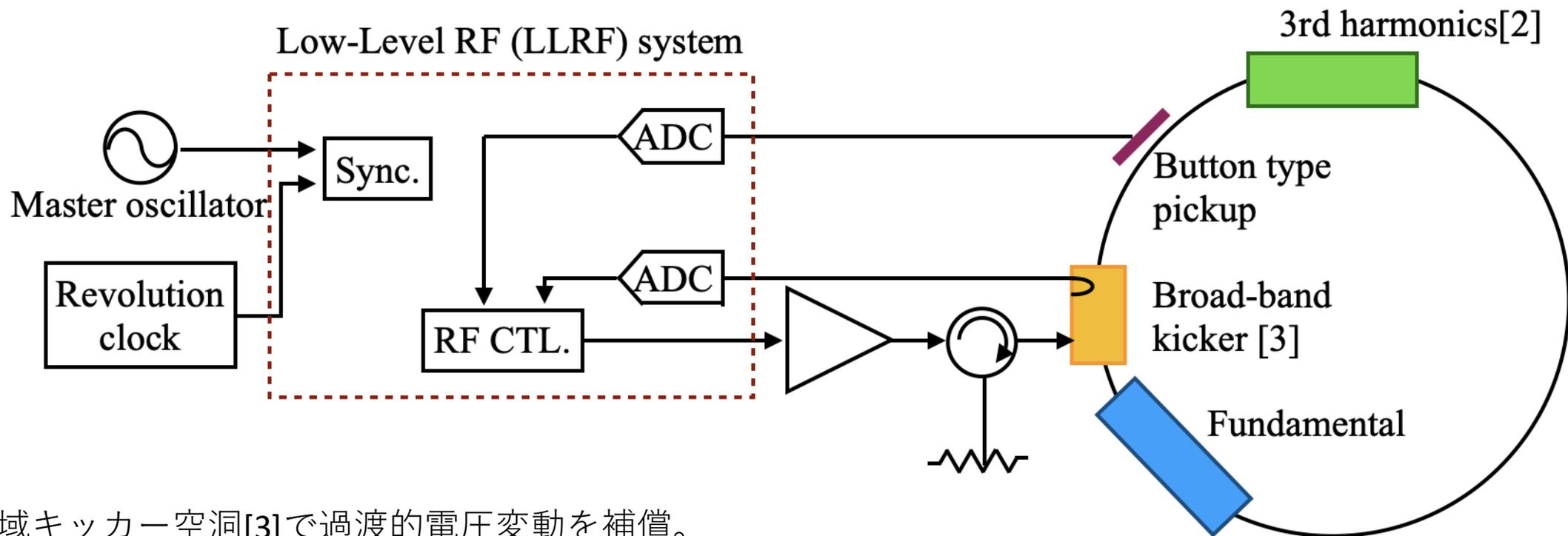
バンチ長 @KEK-LS\*  
(シミュレーション, by 山本尚人氏)



\*以前 KEKで提案されていた放射光計画

## 2. 過渡的電圧変動の補償システム

<提案している過渡的電圧補償システム[1]>



- 広帯域キッカー空洞[3]で過渡的電圧変動を補償。
  - ・クライストロン電圧をフィードフォワードで変調。
- ボタン型電極からの信号を用いてLLRFでバンチ位相をモニター。
  - ・バンチ位相の変動が最小になるように変調パターンを調整。

過渡的電圧変動の補償手法を確立するため、  
KEK PF 2.5 GeVリングにて原理実証試験を行った。

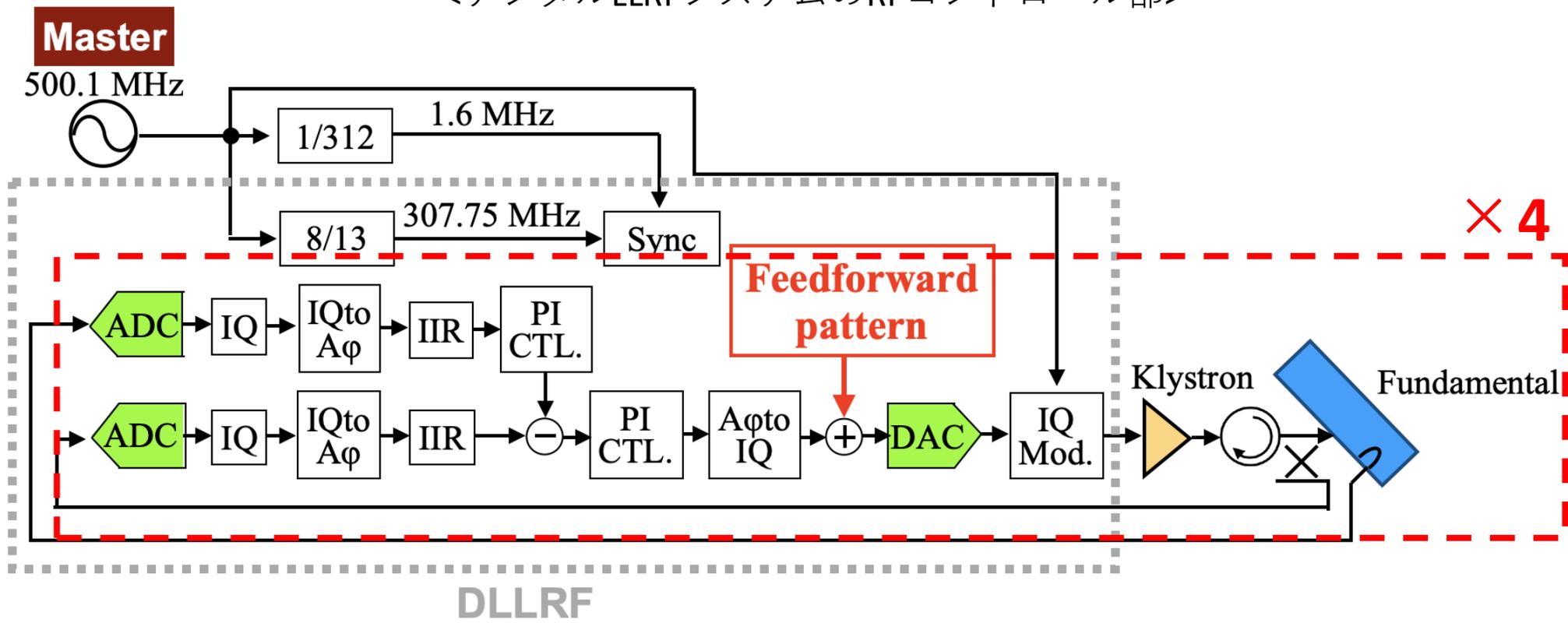
- [1] N. Yamamoto et al, in Proc MCBI, 2019  
[2] T. Yamaguchi et al, NIM A 1053, 168362  
[3] D. Naito et al, submitting PRAB



# 3.2 デジタルLLRF

- PFリングのLLRF更新のために新規開発、2023年末から運用開始[5].
- MTCA.4 規格のデジタルボードで構成。

<デジタルLLRFシステムのRFコントロール部>



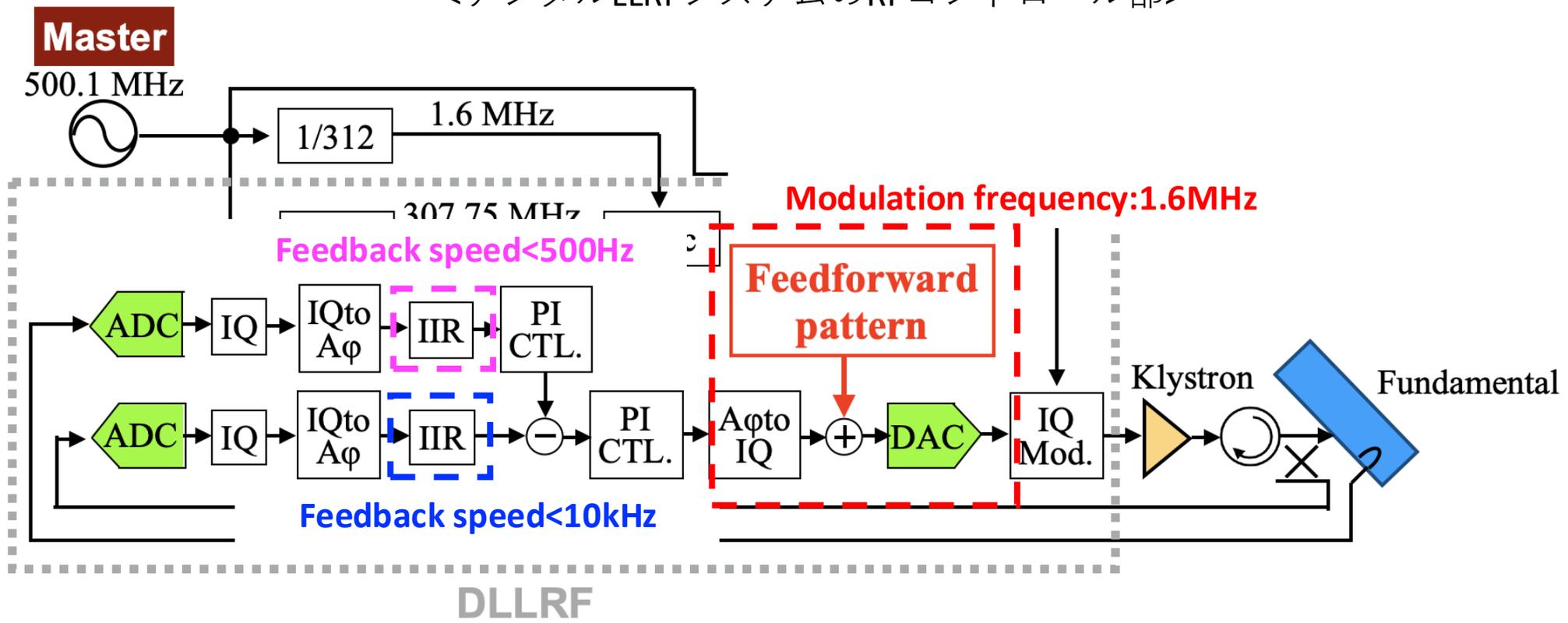
- 1組のデジタルボードで1台の空洞を制御。
- 空洞電圧は空洞ピックアップ信号とクライストロン出力を用いたダブルフィードバックで制御。
- 任意のフィードフォワードパターンをビーム周回周波数に同期してRF出力に加算可能。

[5] D. Naito et al, in proc. IPAC24, THPG71

# 3.2 デジタルLLRF

- PFリングのLLRF更新のために新規開発、2023年末から運用開始[5].
- MTCA.4 規格のデジタルボードで構成。

<デジタルLLRFシステムのRFコントロール部>



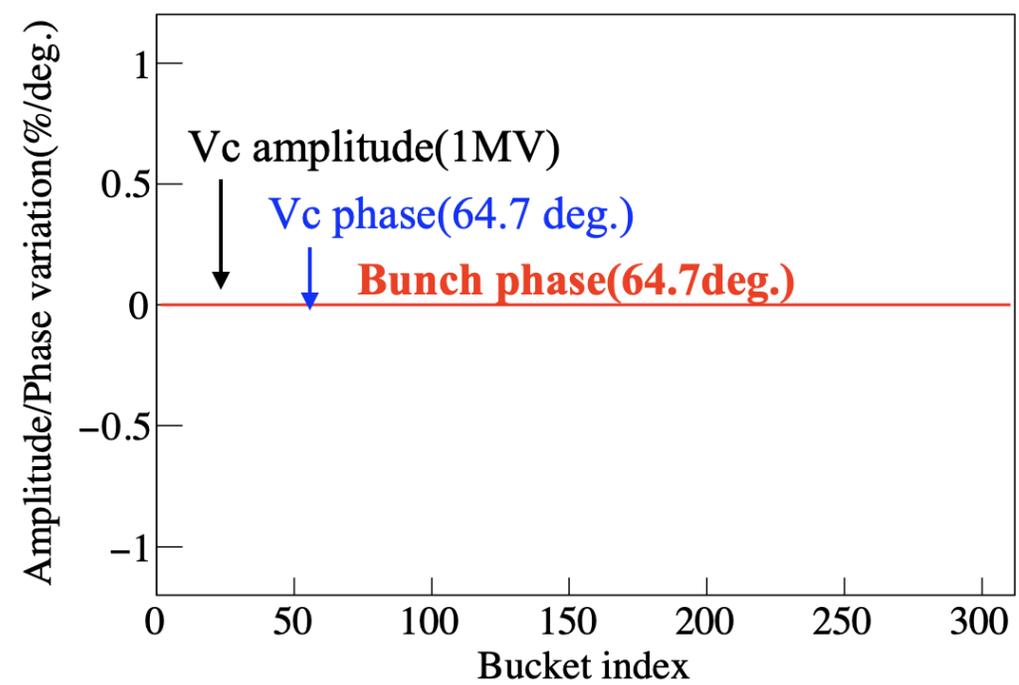
- フィードバックの速度が制限されているので空洞電圧の安定化制御に変調は影響しない。

[5] D. Naito et al, in proc. IPAC24, THPG71

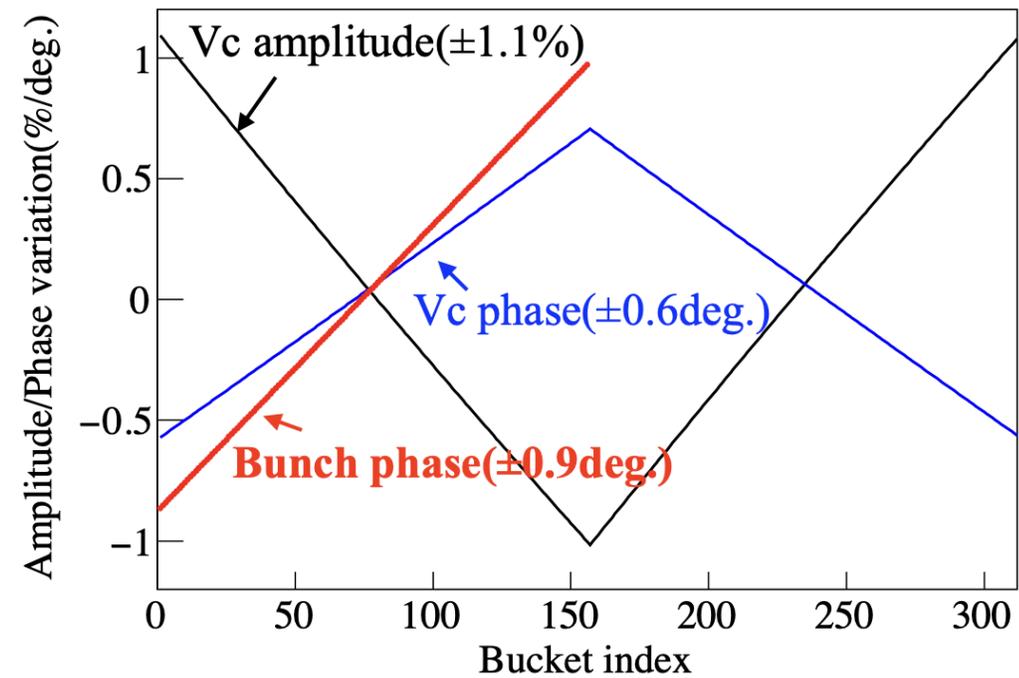
# 3.3 変調信号のパターン

● 過渡的電圧変動を補償するために必要な変調信号のパターンを数値解析的計算で予測。

過渡的電圧変動がない時の  
空洞電圧とバンチ位相



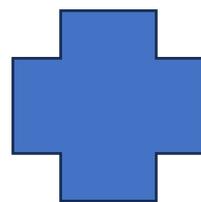
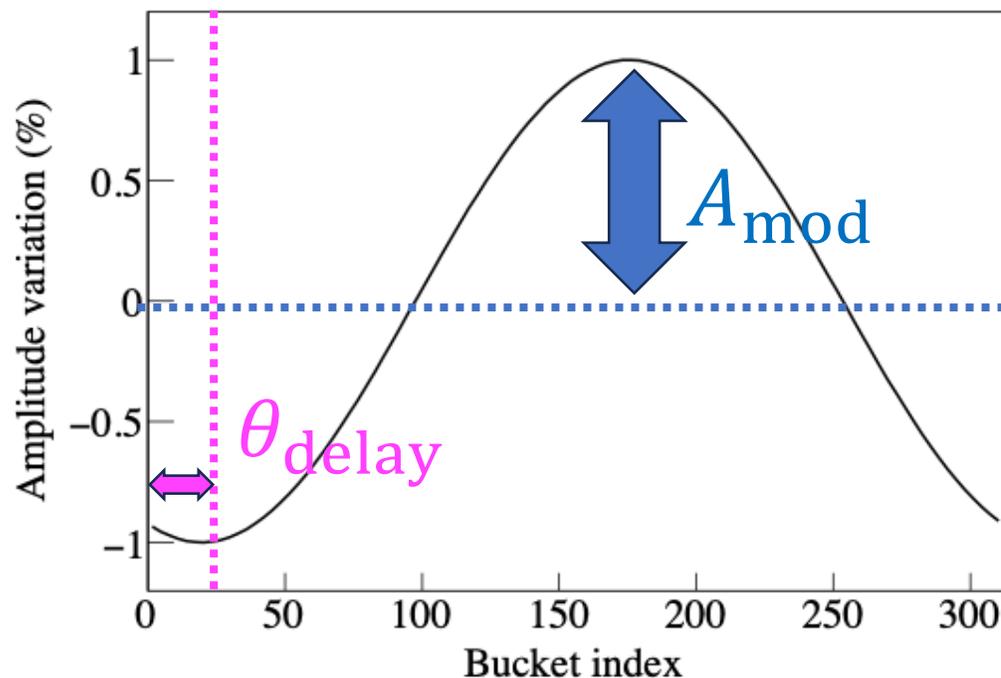
過渡的電圧変動が**ある**時の  
空洞電圧とバンチ位相



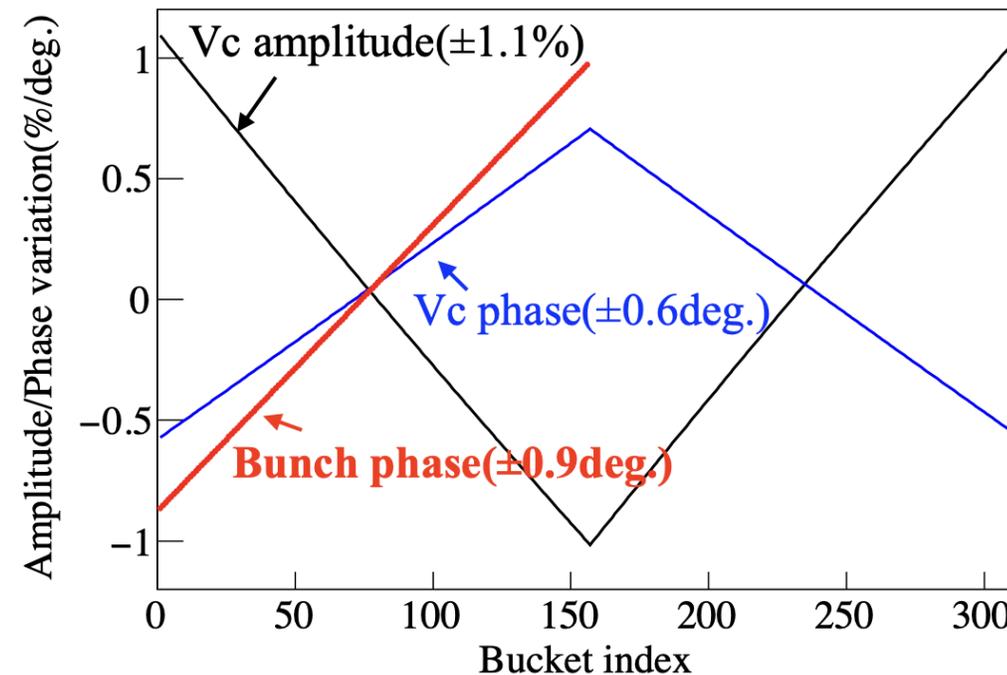
# 3.3 変調信号のパターン

- 過渡的電圧変動を補償するために必要な変調信号のパターンを数値解析的計算で予測。

振幅変調パターンの例



過渡的電圧変動がある時の  
空洞電圧とバンチ位相



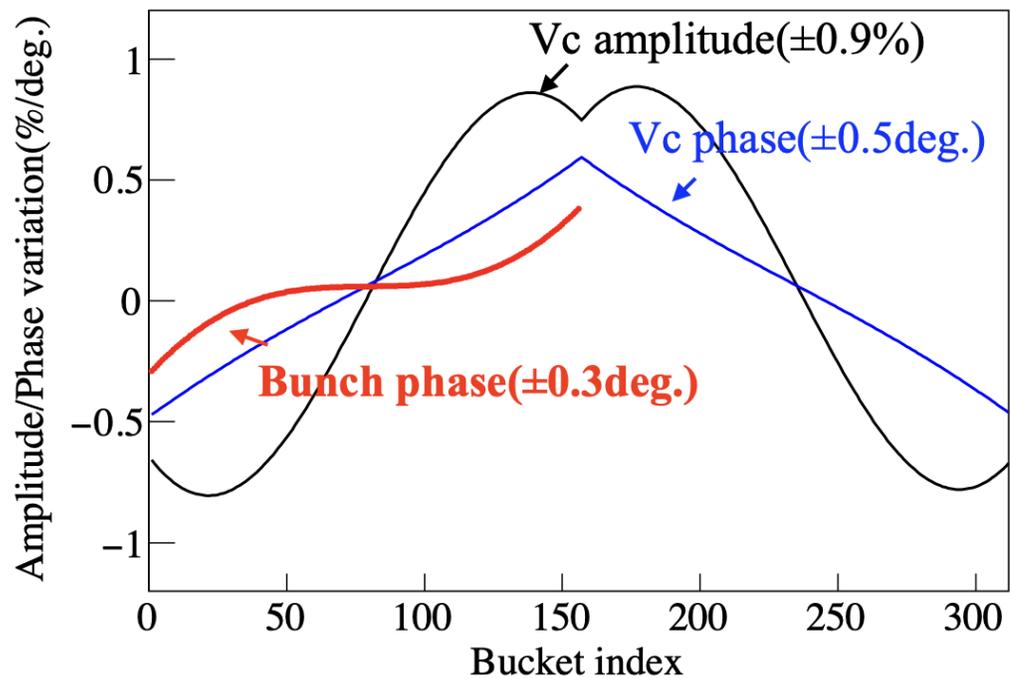
- 周波数がビーム周回周波数 (1.6 KHz)と同じ余弦波でクライストロン電圧を振幅変調。

$$|V_g|(t) = |V_{const}|(1 - A_{mod} \cos(2\pi f_{rev}t + \theta_{delay}))$$

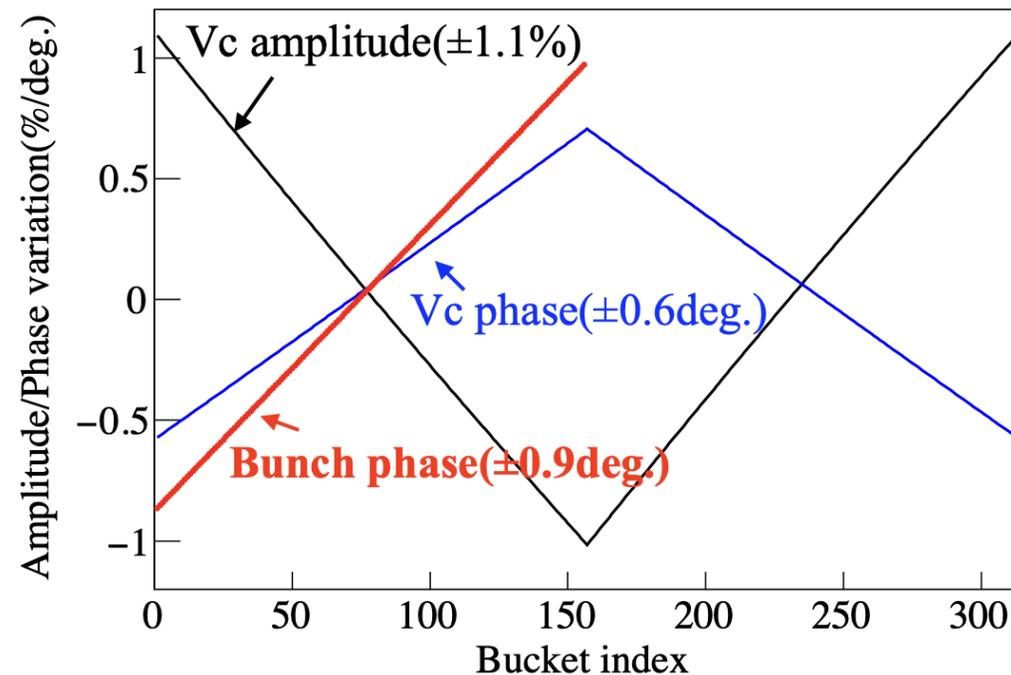
# 3.3 変調信号のパターン

- 過渡的電圧変動を補償するために必要な変調信号のパターンを数値解析的計算で予測。

$(A_{mod}, \theta_{delay}) = (0.014, 0)$ で  
振幅変調した時の空洞電圧とバンチ位相



過渡的電圧変動がある時の  
空洞電圧とバンチ位相



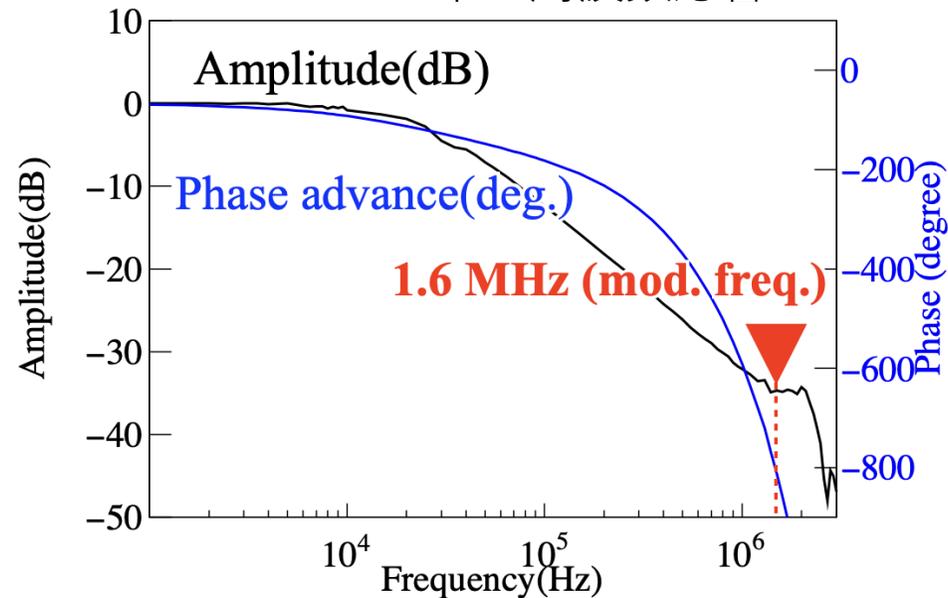
- 周波数がビーム周回周波数 (1.6 KHz)と同じ余弦波でクライストロン電圧を振幅変調。

$$|V_g|(t) = |V_{const}|(1 - A_{mod} \cos(2\pi f_{rev}t + \theta_{delay}))$$

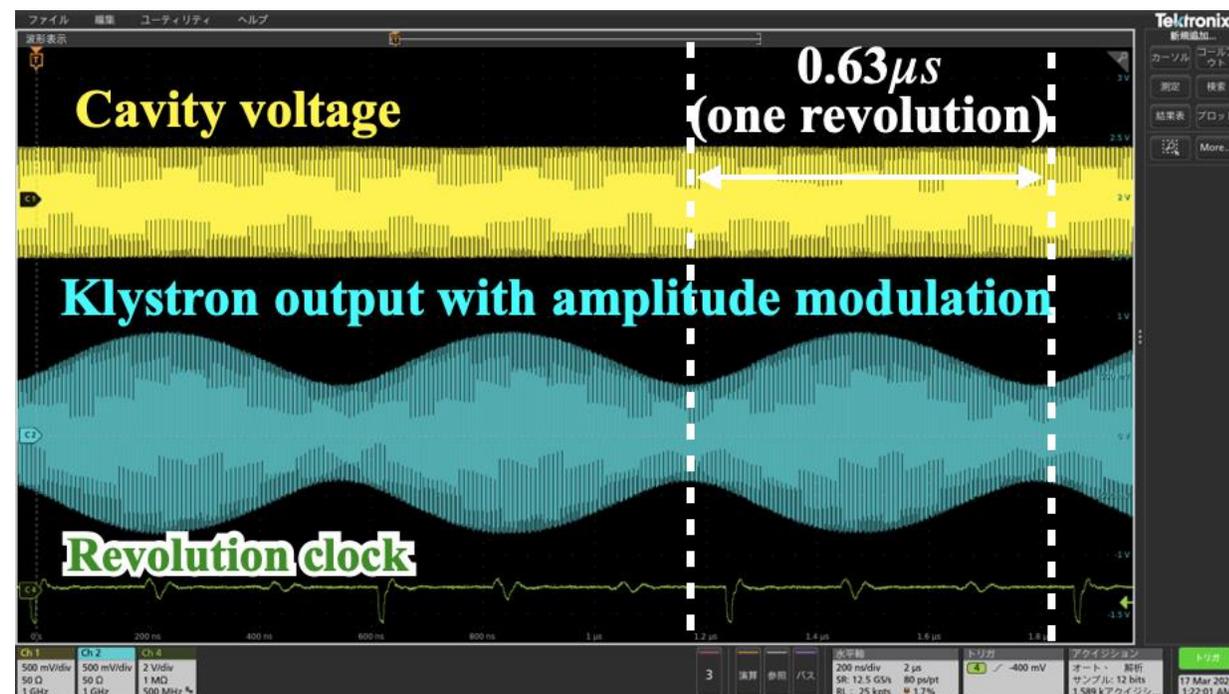
- 過度に振幅変調をかけることで、振幅変調だけでバンチ位相の過渡的電圧変動を抑える。

# 3.4 PFでの振幅変調の上限

空洞ピックアップで測定した  
ハイパワー系の周波数応答



オシロで観測したRF信号の波形



- 主空洞のバンド幅は21.5 kHz ( $Q_L=11800$ )。
  - 1.6 MHzの成分は空洞入り口で38 dB減衰する。
  - 入力した変調信号のほとんどは空洞入り口で反射する。
  - 変調振幅は本来必要な大きさの80倍が必要。
- ハイパワー系で許容できる反射パワーから $A_{mod}$ の上限値は0.58となった。

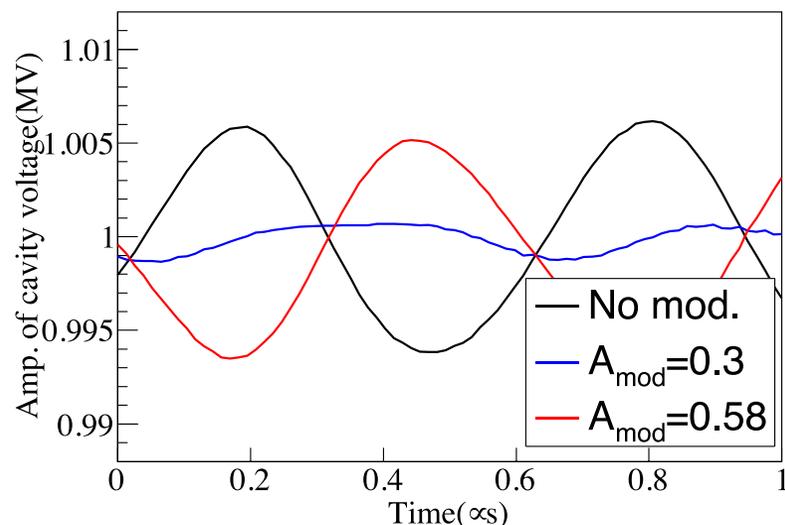
$$\text{変調パターン: } |V_g(t)| = |V_{const}|(1 - A_{mod} \cos(2\pi f_{rev}t + \theta_{delay}))$$

# 4.1 原理実証試験結果( $A_{\text{mod}}$ スキャン)

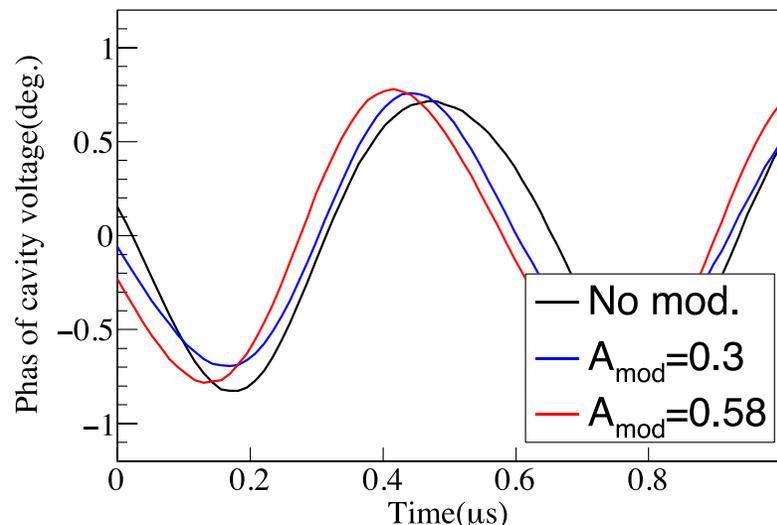
- $\theta_{\text{delay}}$  をゼロに保ち、 $A_{\text{mod}}$  の値をスキャン。

$$\text{変調パターン: } |V_g(t)| = |V_{\text{const}}|(1 - A_{\text{mod}} \cos(2\pi f_{\text{rev}}t + \theta_{\text{delay}}))$$

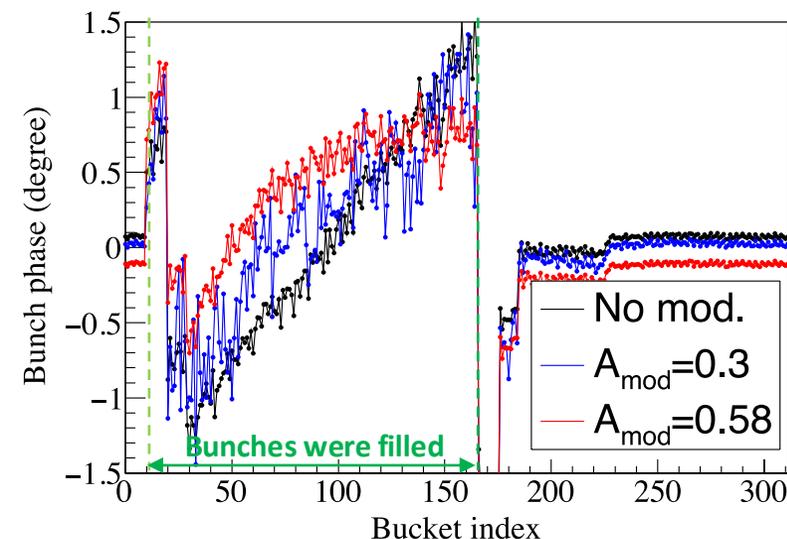
LLRFで観測した空洞電圧の振幅  
(空洞ピックアップ信号)



LLRFで観測した空洞電圧の位相  
(空洞ピックアップ信号)



iGpで測定したバンチ位相のずれ  
(ボタン型電極)



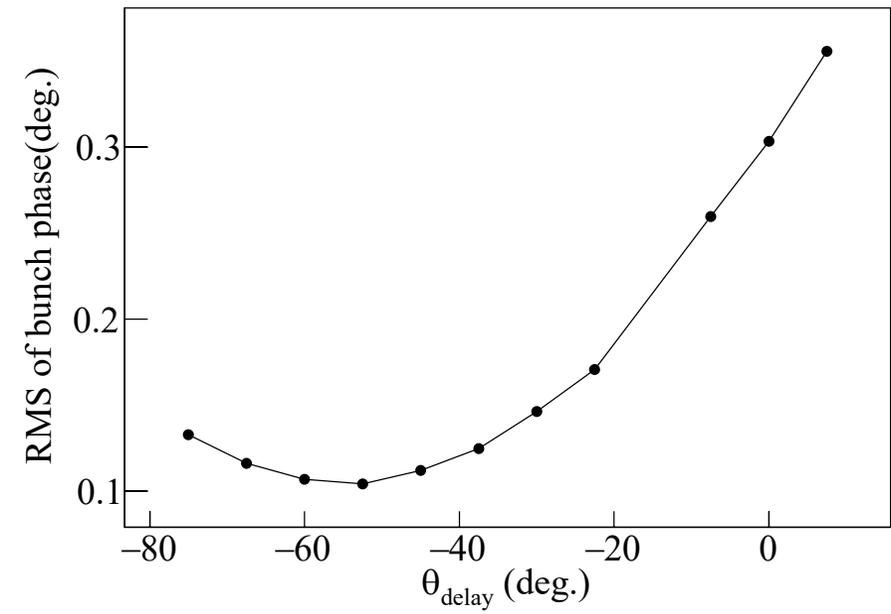
- 空洞電圧の振幅の過渡的電圧変動を、振幅変調により反転させることに成功。

- $A_{\text{mod}}$  を上限値(0.58)まで上げて、数値解析的計算から期待されるほどにはバンチ位相を補正できなかった。

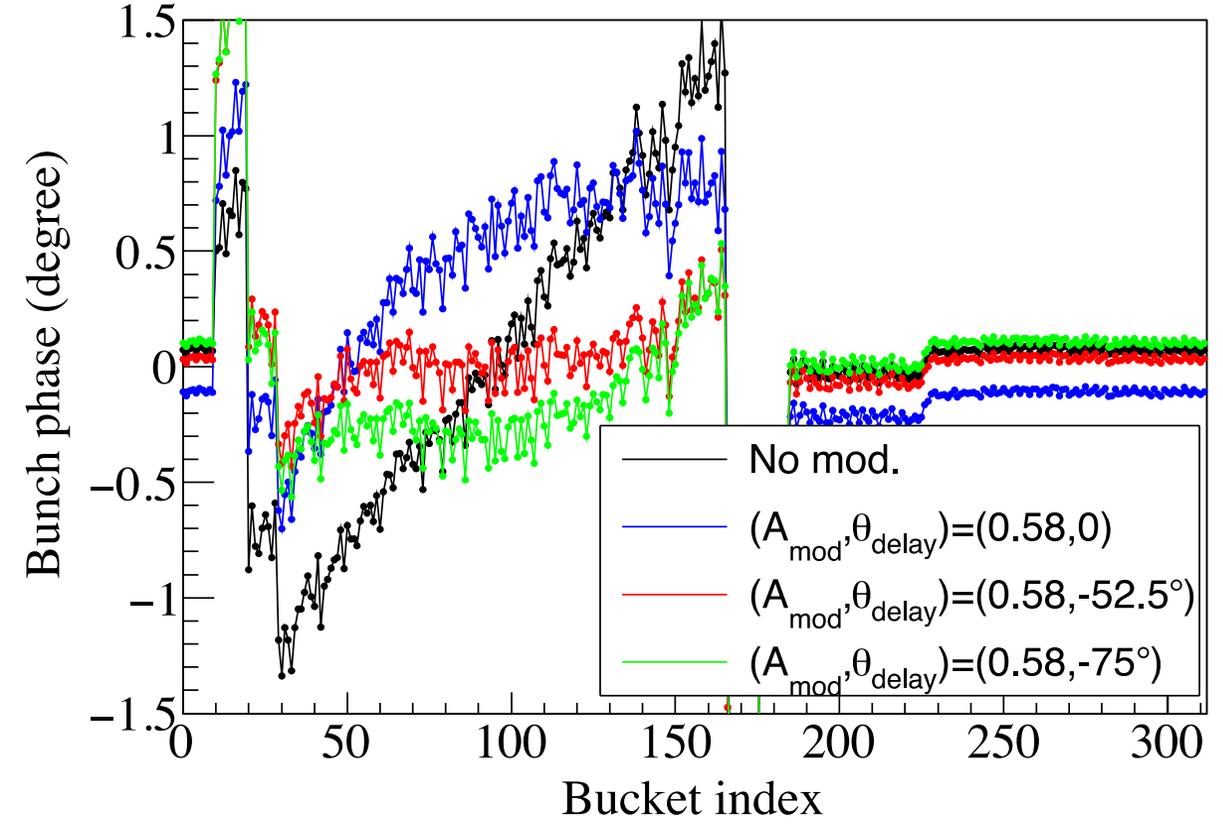
# 4.2 原理実証試験結果( $\theta_{\text{delay}}$ スキャン)

- 数値解析的計算からの予測に反して、 $\theta_{\text{delay}}$  を変更することでバンチ位相の変動が緩和された。
- $A_{\text{mod}}$  を0.58に固定して、 $\theta_{\text{delay}}$  の値をスキャン  
変調パターン:  $|V_g|(t) = |V_{\text{const}}|(1 - A_{\text{mod}} \cos(2\pi f_{\text{rev}}t + \theta_{\text{delay}}))$

40から150バケットの間の  
バンチ位相のRMS



バンチ位相のずれ

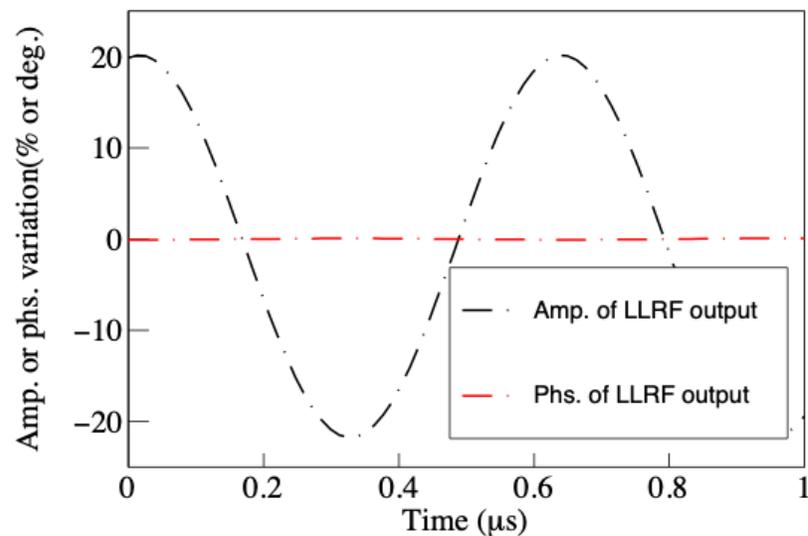


- $\theta_{\text{delay}}$  を  $-52.5^\circ$  に設定することで、バンチ位相の変動を  $\pm 1.5^\circ$  から  $\pm 0.4^\circ$  に軽減。  
— 特に、50~120バケットで非常に良い平坦度を達成。

# 5.1 試験結果と数値解析的予測との差異に関する考察

- 違いを生む原因の候補:
  - 数値解析的計算にクライストロンの応答が入っていない。

振幅変調した時の  
LLRF出力波形



# 5.1 試験結果と数値解析的予測との差異に関する考察

- 違いを生む原因の候補:
  - 数値解析的計算にクライストロンの応答が入っていない。
  - クライストロン内で振幅変動により位相変が励起される。
  - PFのクライストロン(Canon, E3774)は周波数応答で見ると共振ピークを持ち、その周りで位相変調の励起が起こる。
- 数値解析的計算に位相変調の励起を導入。

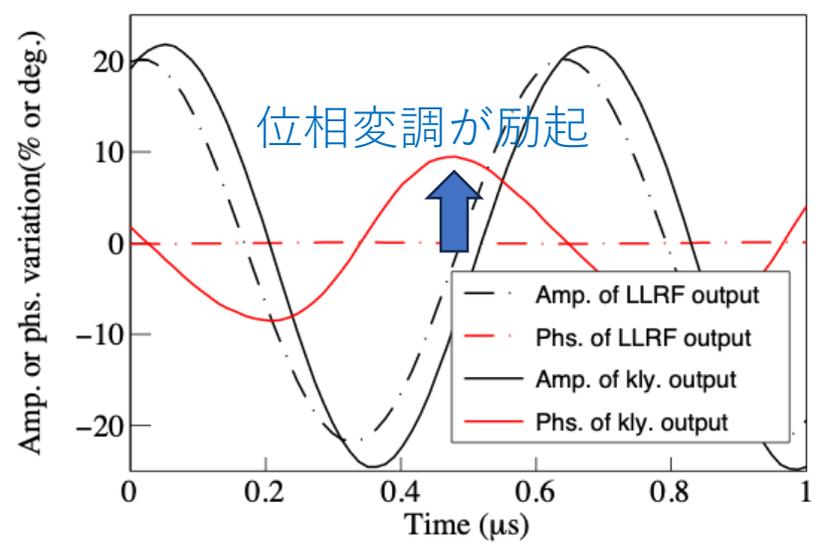
$$|V_g(t)| = |V_{const}|(1 - A_{mod} \cos(2\pi f_{rev}t + \theta_{delay}))$$

$$\Rightarrow V_g(t) = |V_{const}|(1 - A_{mod} \cos(2\pi f_{rev}t + \theta_{delay})) \cos(2\pi f_{RF}t - P_{ex} \cdot A_{mod} \cos(2\pi f_{rev}t + \theta_{delay} + \theta_{ex}))$$

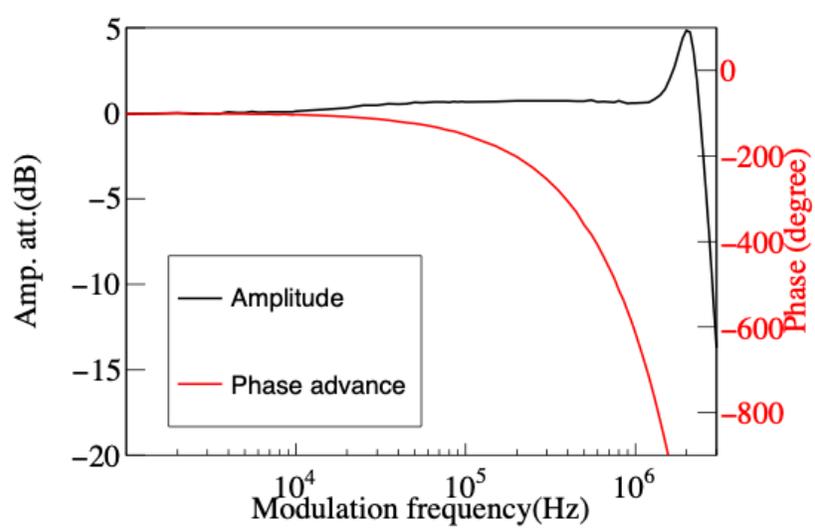
$f_{RF}$  : RF周波数 (500.1 MHz),  $P_{ex}$  : 振幅変調に対する位相励起の割合(109.8 deg.),

$\theta_{ex}$  : 振幅変調と励起される位相延長との位相差(-1.36 rad.)

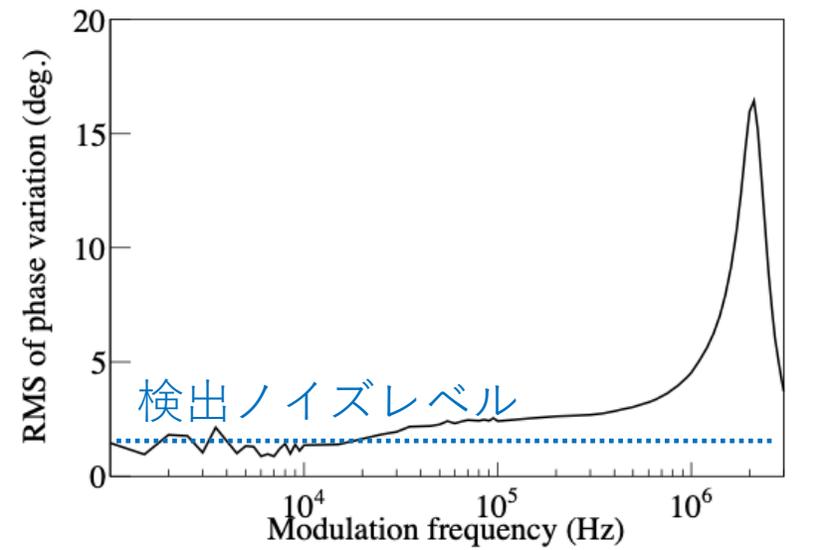
振幅変調した時の  
クライストロン出力波形



振幅変調に対する  
クライストロン出力振幅の応答

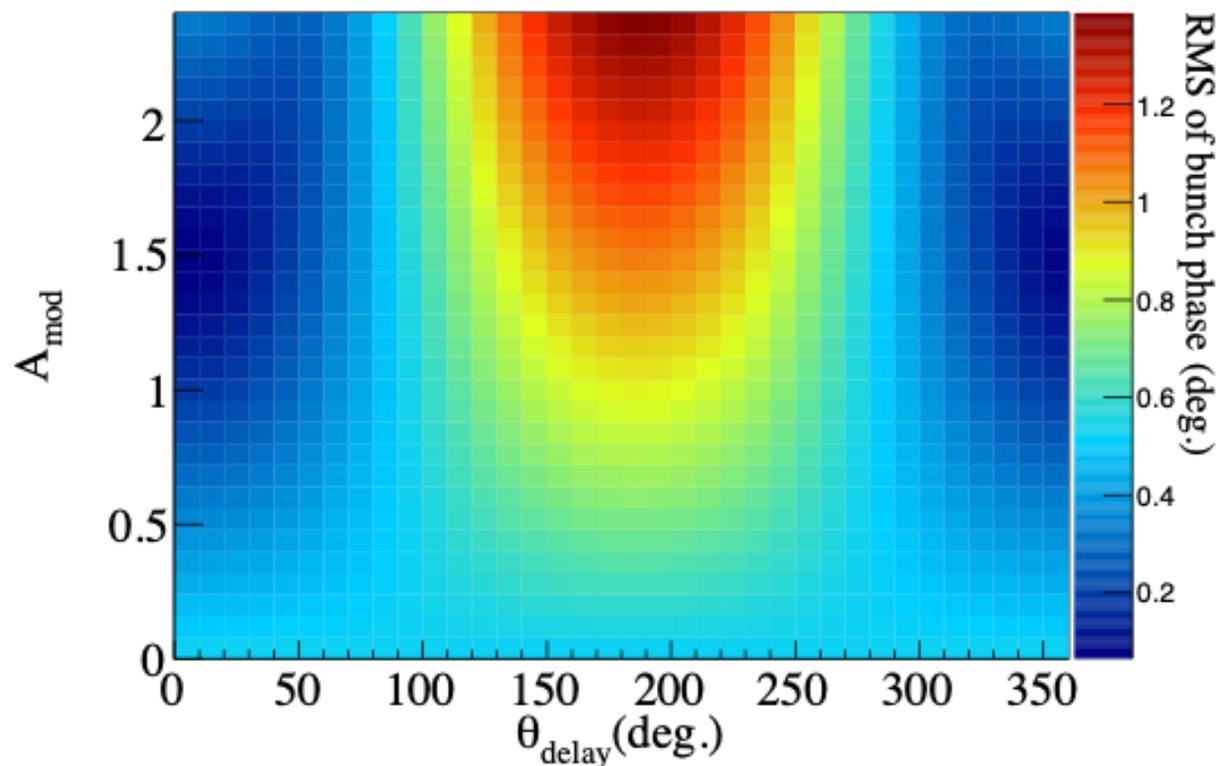


振幅変調( $A_{mod}=0.2$ )した時の  
クライストロン出力での位相変動RMS

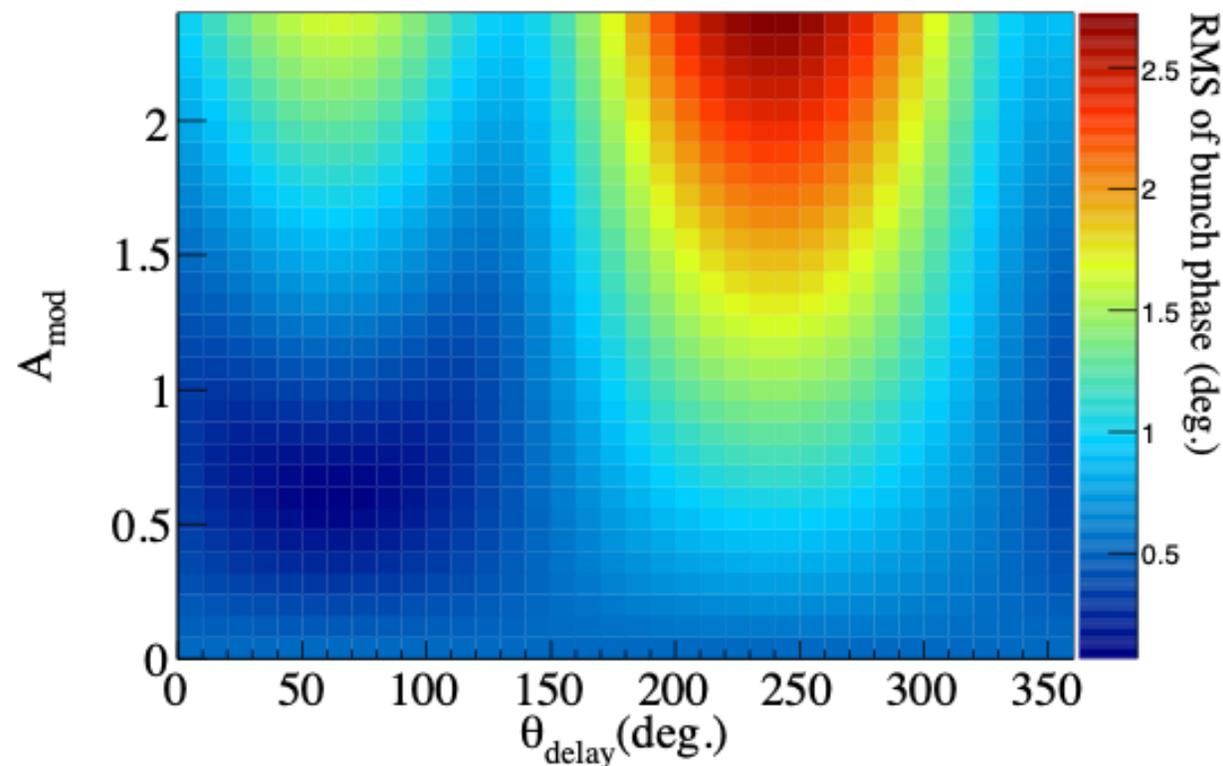


## 5.2 振幅変動による位相変動励起の導入結果 1

位相変動の励起がない時の  
バンチ位相のRMS(数値解析的計算)



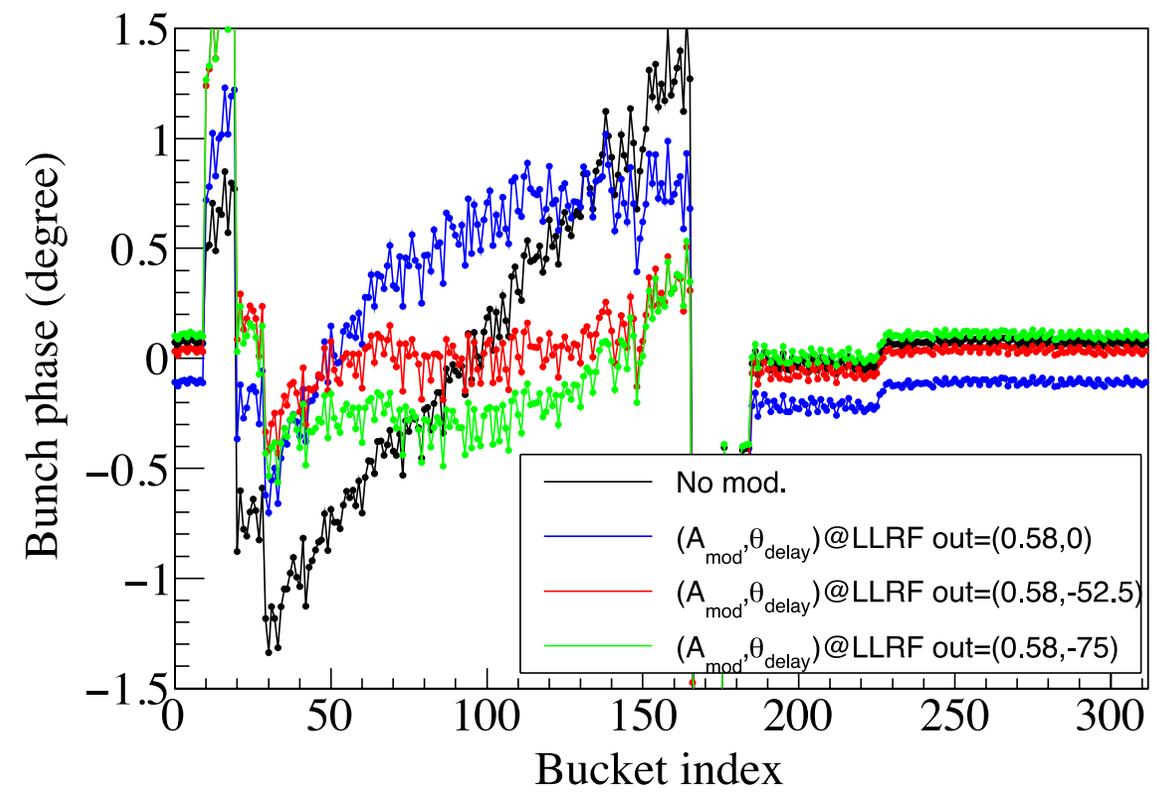
位相変動の励起を考慮した時の  
バンチ位相のRMS(数値解析的計算)



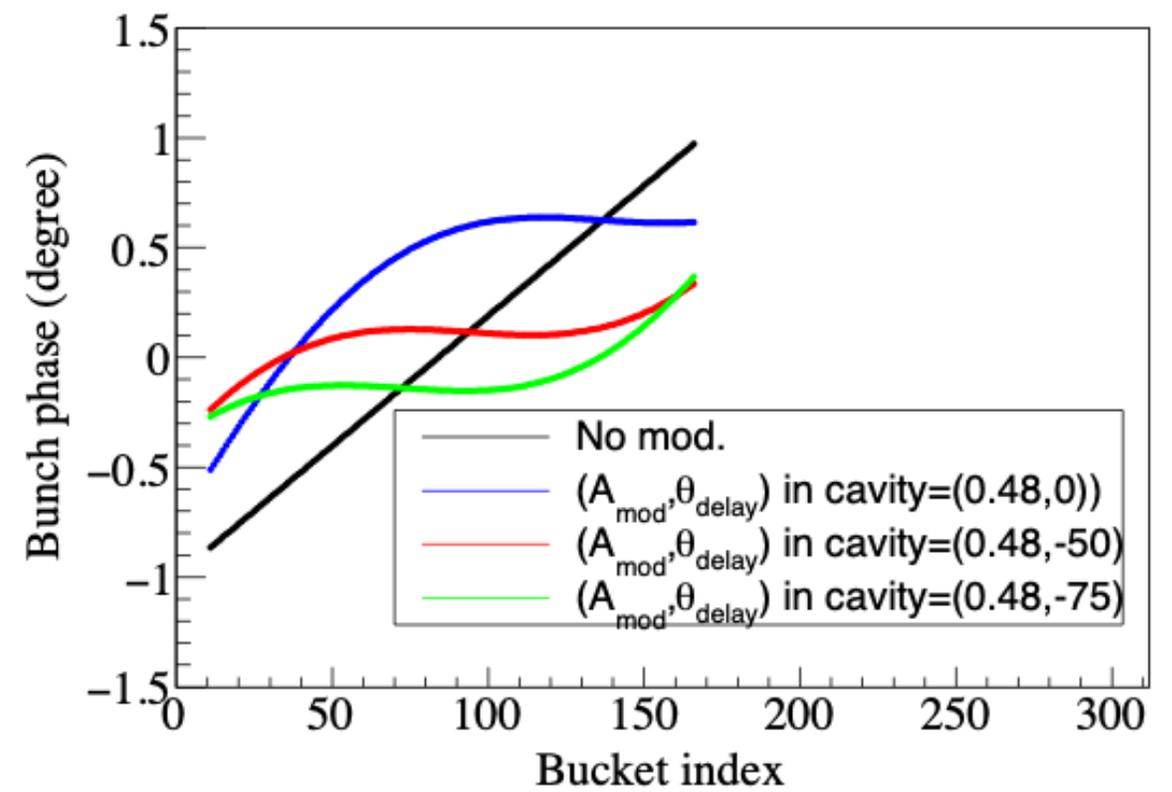
- 位相変動の励起を考慮することにより、 $\theta_{\text{delay}}$ の変更によるバンチ位相の変化を再現。

# 5.2 振幅変動による位相変動励起の導入結果 2

原理実証試験でのバンチ位相変動



数値解析的計算でのバンチ位相



● 位相変動の励起を考慮することにより、振幅変調をかけた時のバンチ位相の変化を再現。

# 6 まとめ

- 過渡的電圧変動はダブルRFシステムによるバンチ伸長に悪影響を与える。  
=> 広帯域のキッカー空洞を用いた補償手法を提案。
- PF 2.5 GeVにて過渡的電圧変動の補償手法について、原理実証試験を行った。  
—新規開発したデジタルLLRFを用いて主空洞の空洞電圧を変調。
- 原理実証試験で留意すべき点  
— 空洞の応答速度より変調の周波数がとても高い。  
— クライストロン内部で振幅変調から位相変調が励起される。
- 変調パターンの振幅/位相のパラメータスキャンを実行。  
— **バンチ位相の変動を $\pm 1.5^\circ$ から $\pm 0.4^\circ$ に抑制**
- 将来の展望  
— 広帯域空洞を導入することにより、少ないパワーでバンチ位相変動の補償が可能になる。  
— クライストロンの代わりに半導体アンプを使うことで、位相変調の励起を解消。