

324MHz 高周波源のフィードバック制御系の応答特性

山口 誠哉^{1,A)}、穴見 昌三^{A)}、道園 真一郎^{A)}、小林 鉄矢^{B)}

^{A)} 高エネルギー加速器研究機構

〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1

^{B)} 日本原子力研究所

〒319-1188 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4

概要

大強度陽子線型加速器の加速電場の振幅・位相の変動は $\pm 1\%$ 、 $\pm 1^\circ$ 以下に制御することが要求されており、そのためにフィードバックおよびフィードフォワードを用いた高周波制御システムの開発が進められている。本稿では DTL テスト空洞を用いたフィードバック制御システムの応答特性の測定結果について報告する。

1. はじめに

高エネルギー加速器研究機構と日本原子力研究所が共同で建設を進めている大強度陽子加速器施設^[1]の入射器として用いられる陽子線型加速器では、リングへのビーム入射の際のビーム損失を極小にするために、加速電場の振幅、位相に対する安定性を $\pm 1\%$ 、 ± 1 度以下に維持することが要求されている。この要求を満たすために、フィードバック、フィードフォワード制御が使われるが^[2,3]、この条件が実現可能かどうかを確認するために、DTL のテスト空洞^[4]に大電力クライストロン^[5]からの電力を投入し、空洞内電場に対するフィードバック制御の試験を行った。

2. フィードバック制御システム

フィードバック制御システム全体のブロック図を図 1 に示す。クライストロン出力のパルス内の振幅、位相のドループが大きいため、空洞内電場に対するフィードバックループとは別に、クライストロン出

力に対するフィードバックループも用意した。各フィードバック制御器は、I/Q 変調器・復調器を用いた PI 制御方式を採用している。また、各ループの循環時間は約 $1\mu\text{s}$ である。測定は、クライストロン出力 800kW (空洞入力 400kW)、パルス幅 $620\mu\text{s}$ 、繰返し 20Hz で行なった。

3. 過渡応答

フィードバックシステムの時間領域での応答特性を調べるために、フィードバック OFF のときと ON のときのステップ応答の比較を行なった。測定結果を図 2 に示す。フィードバックをかけた場合のパルス内での振幅および位相の安定度を表 1 に示す。FB2 を OFF にして FB1 のみを働かせた場合も同様な結果は得られるが、PI 制御の調整範囲が狭かった。

表 1：パルス内の振幅、位相の安定度*

	振幅	位相
rms	0.38%	0.24°
p-p	0.95%	0.71°

*RF の立上がり立下がり部分を除く

4. 時間変動

振幅、位相のトレンドグラフを図 3 に示す。始めの 60 分間 (この間、周囲の温度変動は $\pm 0.2^\circ\text{C}$ 以下) の安定度を表 2 に示す。その後ギャラリーのシャッターを開けて温度を約 4°C 下げたところ (外気温: 8°C) 位相は変わらなかったが、振幅は 0.6% 増加した。

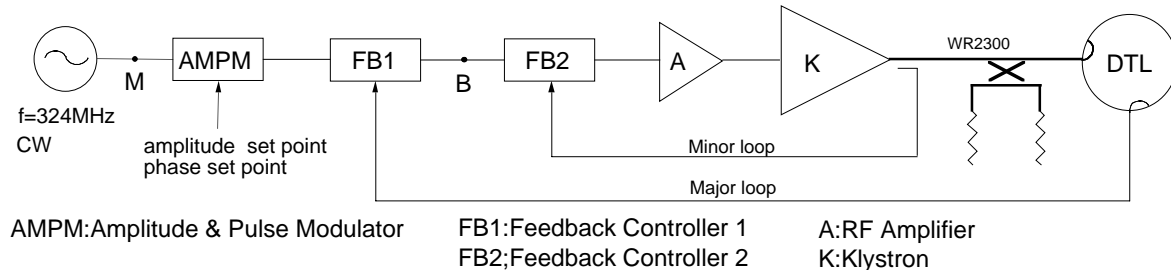


図 1：フィードバック制御システムのブロック図。周波数応答の測定の際には、“M”より左側を図 4 の回路に置き換える。ビーム負荷補償の効果を調べる際には、“B”に BLTB (第 6 章参照) を入れる。

¹ E-mail: seiya.yamaguchi@kek.jp

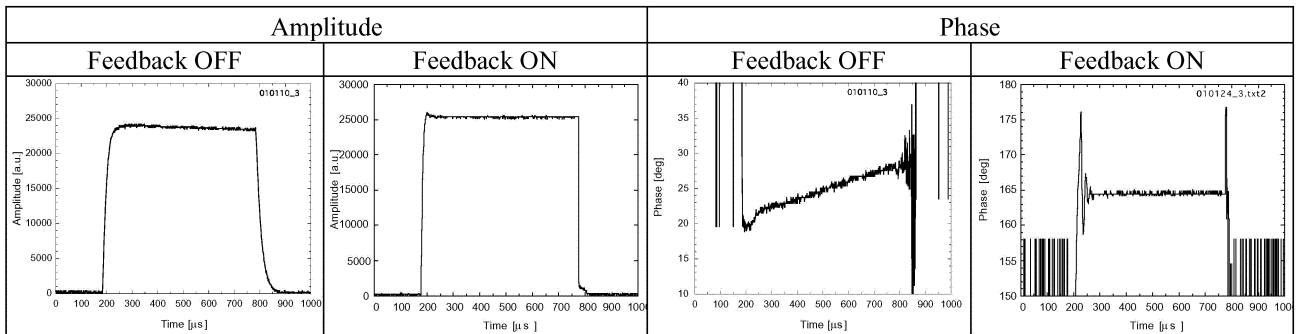


図 2：DTL 内電場のステップ応答

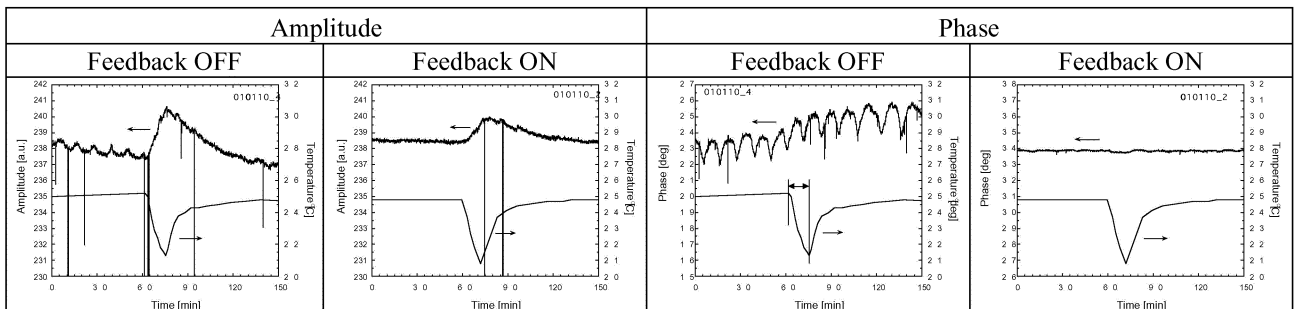


図 3：DTL 内電場の振幅、位相および周囲温度の時間変動。←→はシャッターが開いている時間。垂直方向の直線はインターロックによるトリップを表す。

この変化は、立体回路、ケーブル等システム全体の温度変化に起因するものと思われる。なお、フィードバック OFF 時の周期的 (約 10 分間隔) な変動は、クライストロン冷却水の温度変動によるものと思われる。

表 2：60 分間の振幅、位相の安定度

	振幅	位相
rms	0.030%	0.033°
p-p	0.18%	0.28°

5. 周波数応答

フィードバックシステムの周波数領域での応答特性を調べるために、324MHz の搬送波に対して正弦波 (10kHz~100MHz) による振幅変調をかけた信号を入力し(図 1, 4 参照)、RF アンプ単独、クライストロン(RF アンプ+クライストロン)、DTL 空洞内電場(RF アンプ+クライストロン+空洞) に対しフィードバックをかけたときの各信号の振幅の変化を調べた。測定結果を図 5 に示す ($f=5\text{kHz}$ のゲインを 1 とする)。これより、各機器の帯域幅はそれぞれ、53MHz、1.2MHz、18kHz であることがわかる。クライストロンの帯域幅は、ステップ応答から算出した値 ($=940\text{kHz}$)^[3] と、また、DTL の帯域幅は Q_L 値^[5] ($=23000$) から算出した値 ($=14\text{kHz}$) とほぼ一致する。ゲイン曲線の傾きは、DTL が 1 次系、クライストロンが 2 次系であることを示している。

6. ビーム負荷の補償

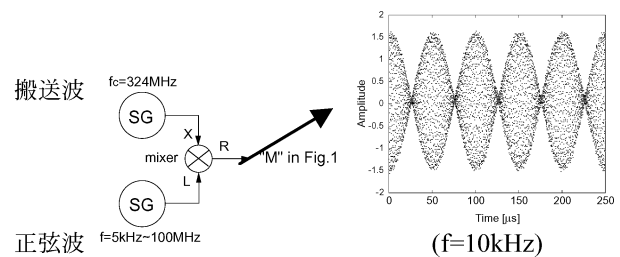


図 4：周波数応答の測定方法

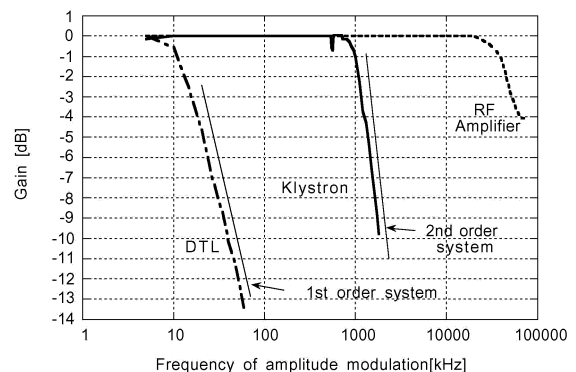


図 5：アンプ、クライストロン、DTL の周波数特性

ビーム負荷がある場合のフィードバックの効果を調べるために、ビーム負荷を模擬する電気回路 (BLTB: Beam Loading Test Box)^[6] を製作し、パルス応答を調べた。BLTB は図 1 の FB1 と FB2 の間(“B”の位置)にいた。ビーム負荷の大きさは振幅で 15%、

位相で 15 度に設定した。測定結果を図 6 に示す。ビーム負荷があるときでもフィードバック制御によりパルス内ではほぼ一定の振幅、位相が得られて

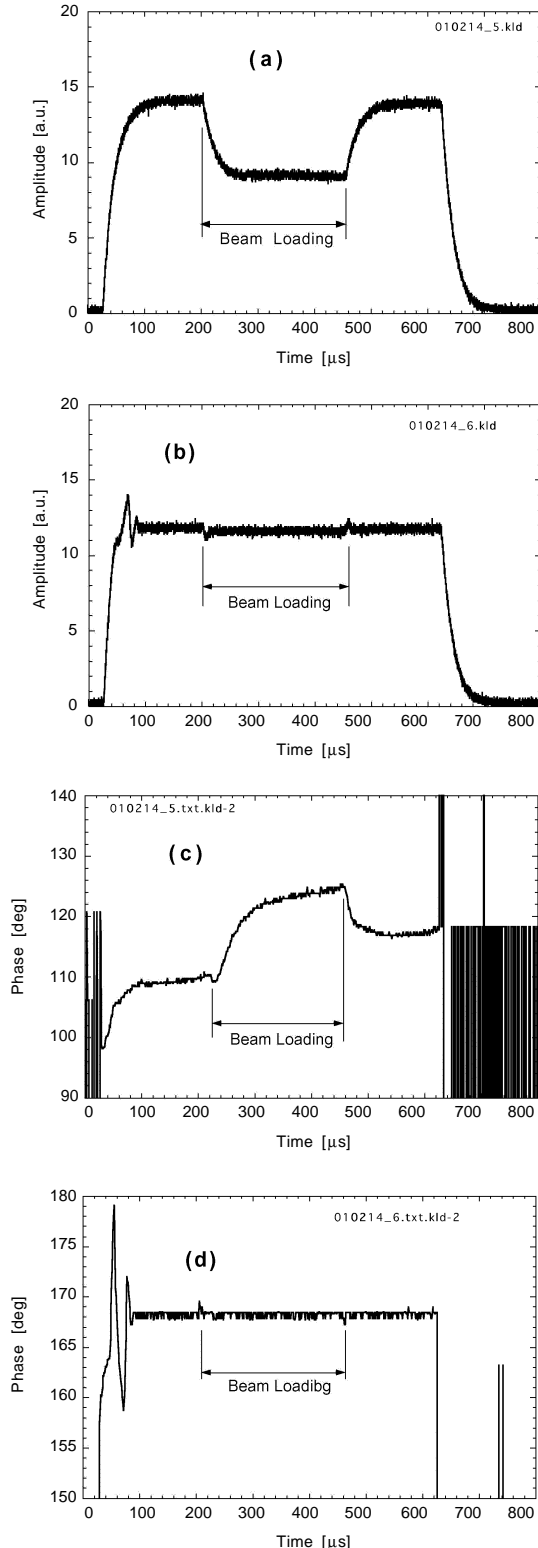


図 6：ビーム負荷に対するフィードバックの効果
 (a) 振幅 (フィードバック OFF),
 (b) 振幅 (フィードバック ON),
 (c) 位相 (フィードバック OFF),
 (d) 位相 (フィードバック ON)

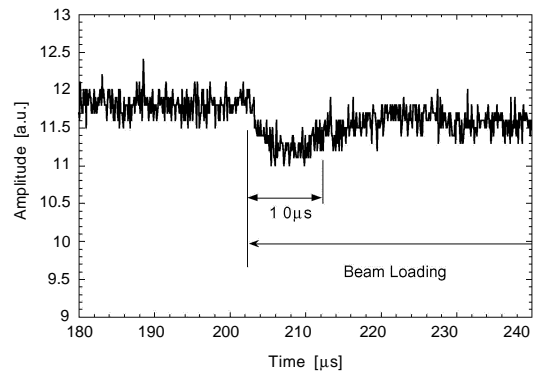


図 7：ビーム立上がり部分の拡大図

いる。立上がり 1 μ s の急峻なビーム負荷変動の影響により、ビームの立上がりと立ち下りのところに約 10 μ s の時間幅で”ヒゲ”が残るが (図 7 参照)、これを除去するためにはフィードフォワード制御が必要となる。

7. まとめ

大電力クライストロンと DTL テスト空洞を用いて空洞内電場に対するフィードバックシステムの試験を行なった結果、パルス内、パルス毎の振幅、位相の変動を $\pm 1\%$ 、 ± 1 度以下に制御することが可能であることが実証された。また、帯域幅の測定、ビーム負荷存在時のフィードバック制御の有効性の確認も行った。

今後、システムのデジタル化^[7]を進めるとともに、空洞のトリップ時の立ち上げ手順、チューナーの制御方法、フィードフォワード法、高周波ケーブルの温度調整法等の確立を進めていく予定である。

DTL テスト空洞を使用するにあたっては、KEK の内藤富士雄氏にお世話になった。

参考文献

- [1] “大強度陽子加速器計画”, KEK Report 99-5, JAERI-Tech 2000-003, JHF-99-4.
- [2] S. Anami et al., Proceedings of the 25th Linear Accelerator Meeting in Japan, Tsukuba, July.12-14, 2000, pp. 207-209, URL:<http://www.spring8.or.jp/JAPANESE/conference/li-me00/PDF/12p-27.pdf>.
- [3] S. Yamaguchi et al., Proceedings of the 25th Linear Accelerator Meeting in Japan, Tsukuba, July.12-14, 2000, pp. 192-194, URL:<http://www.spring8.or.jp/JAPANESE/conference/li-me00/PDF/12p-22.pdf>.
- [4] S. Fukuda, et al., Proc. 20th Int'l Linac Conf. Monterey, August. 21-25, 2000, URL:<http://www.slac.stanford.edu/econf/C000821/THE02.pdf>.
- [5] F. Naito, et al., Proc. 20th Int'l Linac Conf. Monterey, August. 21-25, 2000, URL:<http://www.slac.stanford.edu/econf/C000821/TUD08.pdf>.
- [6] R. J. Rasquinelli, B. Chase, “Linac Low Level RF (LLRF) Operating Procedure”, (1994).
- [7] S. Michizono, et al., these proceedings.