

[12P-22]

## FEEDBACK CONTROL FOR 324MHZ KLYSTRON

Seiya Yamaguchi<sup>\*</sup>, Shozo Anami, Takuji Aizawa<sup>a)</sup>, and Tamaki Watanabe

High Energy Accelerator Research Organization (KEK)  
1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801 JAPAN

a) Nihon Koshuha Co., Ltd.

1119, Nakayama, Midori-ku, Yokohama, Kanagawa, 226-0011 JAPAN

### Abstract

A feedback control system was constructed and tested to correct errors in the amplitude and phase of the rf field of 324 MHz high-power pulsed klystron. It was demonstrated that the field stability was maintained within  $\pm 1\%$  amplitude and  $\pm 1^\circ$  phase.

### 324MHz クライストロンのフィードバック制御

#### 1. はじめに

高エネルギー加速器研究機構は、日本原子力研究所と共同で大強度陽子加速器の開発を進めているが[1]、入射器となる陽子リニアックでは、後続の3GeV シンクロトロンに入射に要求される、 $\Delta p/p$ が0.1%以下という厳しい条件を満たすために、加速電場に対して非常に高い精度の振幅および位相の制御が求められている。即ち、パルス内およびパルス毎の振幅、位相の変動を $\pm 1\%$ 、 $\pm 1^\circ$ 以下にすることが要求されている。そのための制御方法として、基本的にはPID補償によるフィードバック制御を採用し、ビーム負荷の補償のためのフィードフォワード制御も併用することにする。

陽子リニアックの最上流に位置する324MHz常伝導リニアックの高周波源としてはクライストロン(RFパルス尖頭出力:3MW,パルス幅:600 $\mu$ s,繰返し:50Hz)が採用され、現在その開発が進められているが[2]、クライストロン単体でのパルス内位相回転は数 $10^\circ$ にも達するため、加速空洞に対するフィードバック制御とは独立に、クライストロン出力に対して局所的なフィードバック制御を行なうことにしている[3]。また、現状のデジタル制御ではパルス内(パルス幅600 $\mu$ s)でのフィードバック制御には追従できないのでアナログでのフィードバック制御を行なうことにする。

本稿では、324MHzクライストロン出力の振幅、位相に対するフィードバック制御の試験結果について報告する。

#### 2. フィードバック制御システム

振幅、位相のフィードバック制御の方法としては、

<sup>\*</sup>) S. Yamaguchi, 0298-64-5693,  
Seiya.Yamaguchi@kek.jp

振幅と位相を別々に検出し、減衰器と移相器で制御するという方法が従来多く用いられてきたが、ここでは、最近の例にならってI/Qデバイスを用いる方法を採用することにした。I/Qデバイスを用いる最大の利点は、電場をベクトル量として扱うため振幅と位相を同時に検出、制御できること、その結果としてシステムの構成が非常に単純になり信頼性の向上が得られるということである。欠点は、振幅、位相を知るためには演算が必要なことであるが、フィードバック制御においてはこれらの値を直接知る必要はないので、実際上は欠点とはならない。

本システムでは(ブロック図を図1に示す)、目標

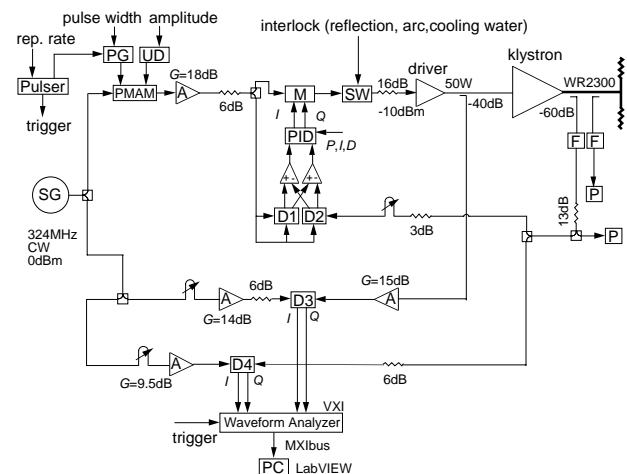


図1 クライストロンのフィードバック制御/モニター回路のブロック図. SG:Signal Generator, F: Low Pass Filter, PG:Pulse Generator, UD:Up/Down controller, PMAM: Pulse&Amplitude modulator, M:IQ Modulator, D:IQ Demodulator, SW:Rf Switch, A:Amplifier, P:Power Meter.

値はドライブアンプ入力の振幅、位相であり、制御量はクライストロン出力の振幅、位相である。目標値、制御量は各々 I/Q デモジュレータ(D1, D2)で I 成分と Q 成分に分解され、それぞれ差動増幅器に入力され、差が零となるように PID 制御器により I/Q モジュレータ(M)の出力が制御される。

一方、ドライブアンプ出力(クライストロン入力)とクライストロン出力の振幅、位相を I/Q デモジュレータ(D3, D4)によりモニターした。各 I, Q 出力を VXI の波形アナライザ(一種の ADC, 8bit)に入れ、パーソナルコンピュータ上のソフトウェア(LabVIEW)により振幅( $=\sqrt{I^2+Q^2}$ )と位相( $=\cos^{-1}(I/\sqrt{I^2+Q^2})$ )に変換した。

### 3. I/Q デモジュレータの特性

前節で述べたように、今回の試験では、振幅、位相の制御、モニターに I/Q デバイスを使用するので、その特性について調べた(デモジュレータのみ、モジュレータについては未了)。測定用回路のブロック図を図 2 に、測定結果を図 3, 4 に示す。位相を  $360^\circ$  変えたときの振幅、位相の誤差がそれぞれ約 4%, 約  $1^\circ$  であること、入力電力が 7dBm を超えると振幅、位相ともに誤差が大きくなることわかる。I/Q デモジュレータを使うにあたっては、電力レベルが適切な値となるように注意を要する必要がある。

がある。

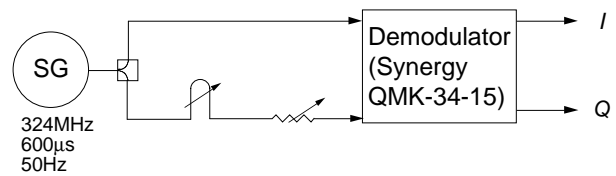


図 2 I/Q デモジュレータ特性測定用回路のブロック図。

### 4. フィードバック制御の試験結果

フィードバック制御試験の結果を以下に示す。図 5 は、クライストロン入力の振幅、位相のパルス波形、図 6 はクライストロン出力の振幅、位相のパルス波形、図 7 はクライストロン出力の振幅、位相のトレンドグラフ(30 分間)であり、それぞれフィードバック OFF のときと ON のときの結果を示している。図 6 から明らかなように、クライストロン出力の位相、振幅はパルス内で  $\pm 1\%$ ,  $\pm 1^\circ$  の安定性を有している。また、30 分間の間であるが、振幅、位相の変動は  $\pm 1\%$ ,  $\pm 1^\circ$  以下におさまっていることがわかる。

図 8 はクライストロン出力の振幅の立上がり部分の波形であるが、立上がり時間は  $0.53\mu\text{s}$  である。

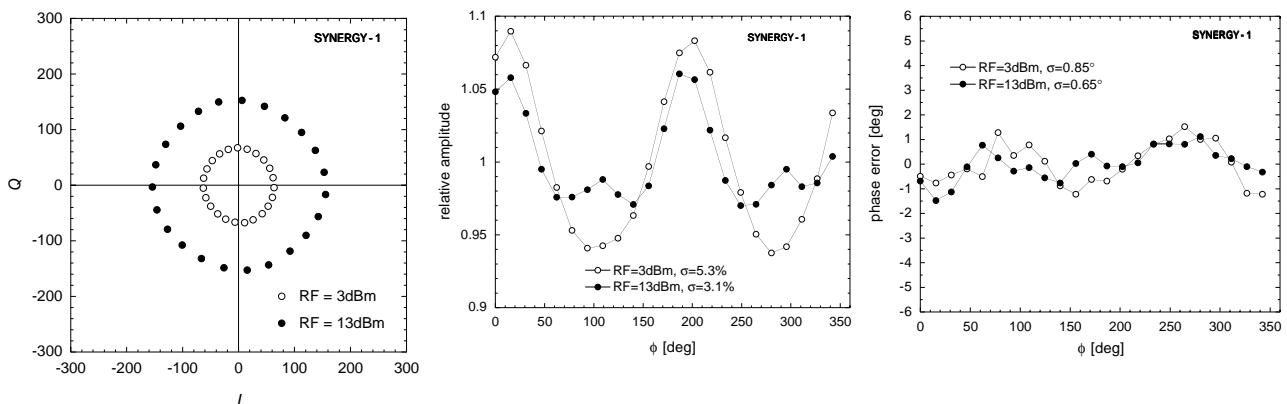


図 3 I/Q デモジュレータの RF 特性(振幅、位相誤差の位相依存性)。

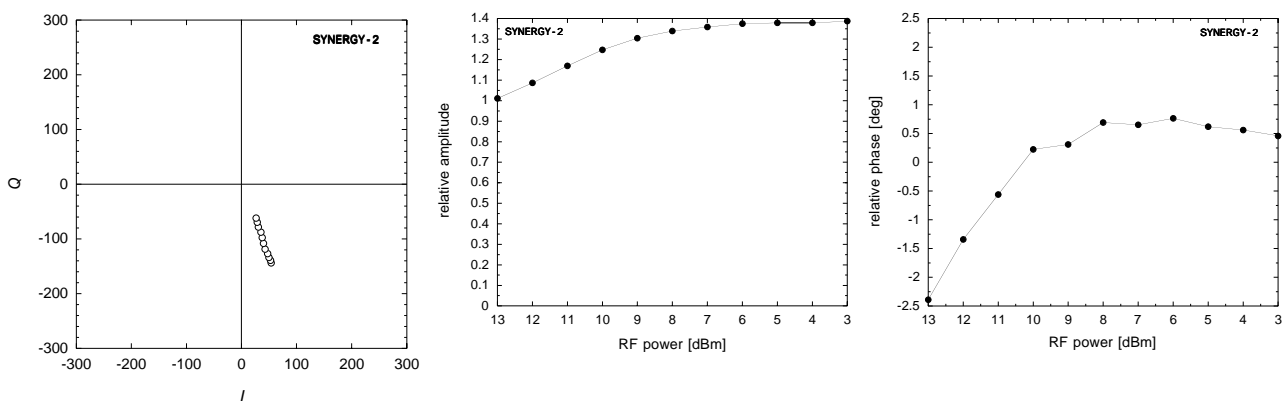


図 4 I/Q デモジュレータの RF 特性(振幅、位相誤差の振幅依存性)。

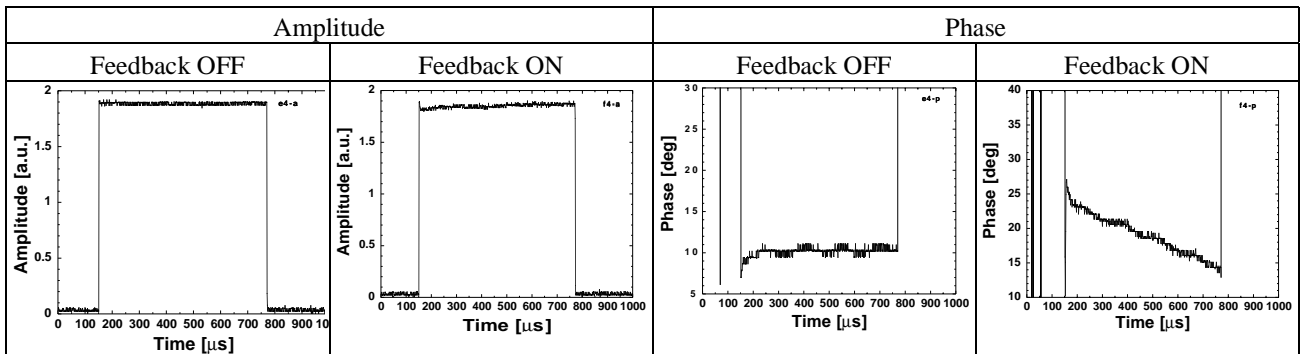


図5 入力パルスの波形.

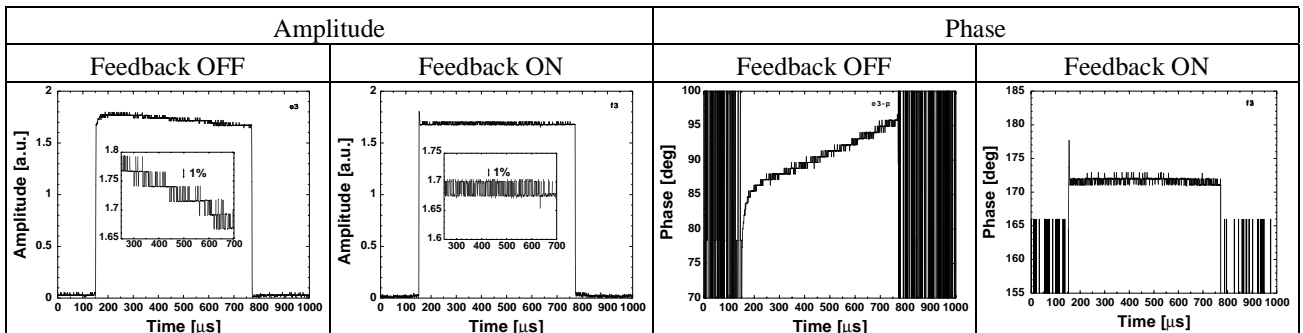


図6 出力パルスの波形.

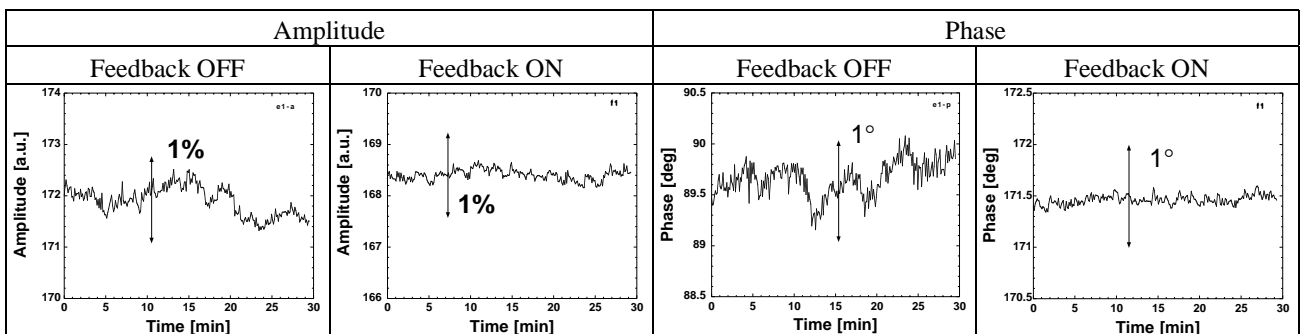


図7 出力パルスのトレンドグラフ.

立上がり時間( $T_r$ )と周波数帯域幅( $f_B$ )の関係を与える,

$$f_B = \frac{1}{2T_r}$$

から  $f_B$  を算出すると、940kHz となる。この値は過渡特性から見積もったものであるが、現実的な値は、周波数応答の測定から求める必要がある。

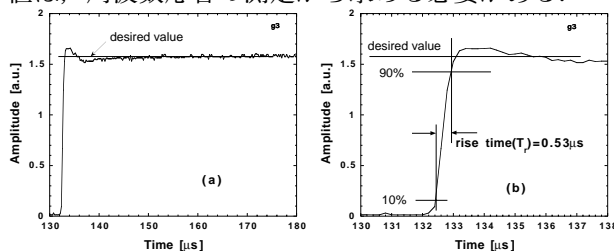


図8 振幅パルスの立上がりの波形.

## 5.まとめ

324MHz クライストロンの振幅、位相に対する

フィードバック制御システムの動作試験を行なった結果、パルス内、パルス毎の振幅、位相すべてにおいて、 $\pm 1\%$ 、 $\pm 1^\circ$  以下の安定性を有することが示された。今後は、

- 空洞内電場の振幅、位相に対するフィードバック制御の試験、
  - 周波数領域における帯域幅の測定、
  - I/Q デバイスの温度特性の測定、
  - I/Q デバイスの寿命の評価、
- 等を行なっていく予定である。

## 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. Fukuda, et., al, “The RF source of the 60-MeV Linac for the KEK/JEARI Joint Project”, Proc. of 20<sup>th</sup> Int'l Linac Conference, (2000) to be published.
- [3] 穴見昌三, 他, “JHF 60-MeV リニアック高周波源のデジタルフィードバック”, 本研究会予稿集.