

LOW LEVEL RF CONTROL SYSTEM FOR J-PARC RCS

Fumihiko Tamura*, Alexander Schnase, Masahiro Nomura, Masanobu Yamamoto
JAERI, Tokai-mura, Ibaraki-ken, Japan 319-1195

Masahito Yoshii, Shozo Anami, Eizi Ezura, Keigo Hara, Chihiro Ohmori, Akira Takagi
KEK, Tsukuba, Ibaraki-ken, Japan 305-0801

Abstract

We describe the low level RF (LLRF) control system for the J-PARC Rapid Cycling Synchrotron (RCS). The LLRF system is required to be very stable and precise to achieve the high accelerating beam current. The system has the functions of the multi-harmonic RF generation, the feedback loops, the beam loading compensation, and other miscellaneous functions. The fully-digital LLRF system of the RCS is now under construction. The preliminary test results are also shown.

J-PARC RCS のローレベル RF システム

1. はじめに

J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex^[1,2]) は、メガワット級の陽子ビームを加速、供給する加速器複合体であり、400 MeV のリナック、3-GeV の速い繰り返しのシンクロトロン、および 50-GeV のシンクロトロン (MR) から構成される。この発表では、J-PARC RCS のローレベル高周波制御 (Low Level RF, LLRF) システムについて述べる。大強度の陽子ビームをロスなく安定に加速するためには、非常に安定かつ精密な LLRF 制御システムが必須である。

J-PARC シンクロトロンの RF パラメータを表 1 に示した。高い加速勾配を実現するために、金属磁性体 (Magnetic Alloy, MA) コアを装荷した加速空洞が用いられる。MA 空洞は低い Q 値を持ち広い帯域を持つため、チューニンググループの必要がなく、LLRF 制御システムはより単純になる。

RCS では、空洞の Q 値として 2 が選ばれている。RCS では、単一の加速空洞が、基本加速周波数 ($h = 2$) 信号および 2 倍高調波信号 ($h = 4$) を重畳した信号により駆動される。基本波は陽子ビームの加速に用いられ、2 倍高調波は RF バケツを操作することにより、バンチ形状の制御に用いられる。

LLRF 制御システムは、DDS (Direct Digital Synthesis) を基にしたデジタルシステムである。LLRF 制御の各ブロックについては以下の節で述べる。

現在、RCS の LLRF システムが製作途中であり、一部のモジュールの preliminary な試験についても述べる。また、MR の LLRF 制御システムについても、同様のコンセプトで製作される予定である。

2. LLRF 制御ブロック

RCS の LLRF 制御システムのブロック図を図 1 に示した。LLRF システムは、以下のブロックから構成される。

- DDS による、ビーム加速、バンチ整形、および基準信号としてのマルチハーモニック RF 信号の

parameter	RCS	MR
circumference	348.3 m	1567.9 m
energy	0.181-3 GeV	3-50 GeV
Accel. freq.	0.94-1.67 MHz	1.67-1.72 MHz
harmonic number	2	9
max RF-voltage	450 kV	280 KV
repetition period	40 msec	3.64 sec
duty (power)	30%	60%
No. of cavities	12	6
Q-value	2	10-20
No. of gaps	3 per cavity	3 per cavity
average power	120 kW/cavity	240 KW/cavity

表 1: J-PARC シンクロトロンの RF パラメータ

生成

- ビーム安定化のためのフィードバック (位相、電圧、軌道)
- ビームローディング補償のためのビームフィードフォワード
- その他、シンクロナイゼーション、リナックチョップタイミングモジュール等

マルチハーモニックの RF 信号は、空洞を駆動するためだけでなく、I/Q モジュレーション等の RF 信号検出にも用いられる。DDS の概念図を図 2 に示した。パターンジェネレータから各クロックサイクルごとの位相加算量が読み出され、それに応じた位相アキュムレーターは、ビームの周回周波数での鋸波状の位相信号を生成する。この位相信号はコーディネートトランスフォーマーにより、適切な振幅をもったサイン波に変換される。ビーム周回周波数の位相信号から、非常に基本的な算術演算 (足し算、ビットシフト) により、高次のハーモニックの位相信号を生成することができる。つまり、DDS により、PLL なしでマルチハーモニックの RF 信号を生成することができ、また、それぞれの高次のハーモニックの同期を取ることも容易に実現できる。

* ftamura@linac.tokai.jaeri.go.jp

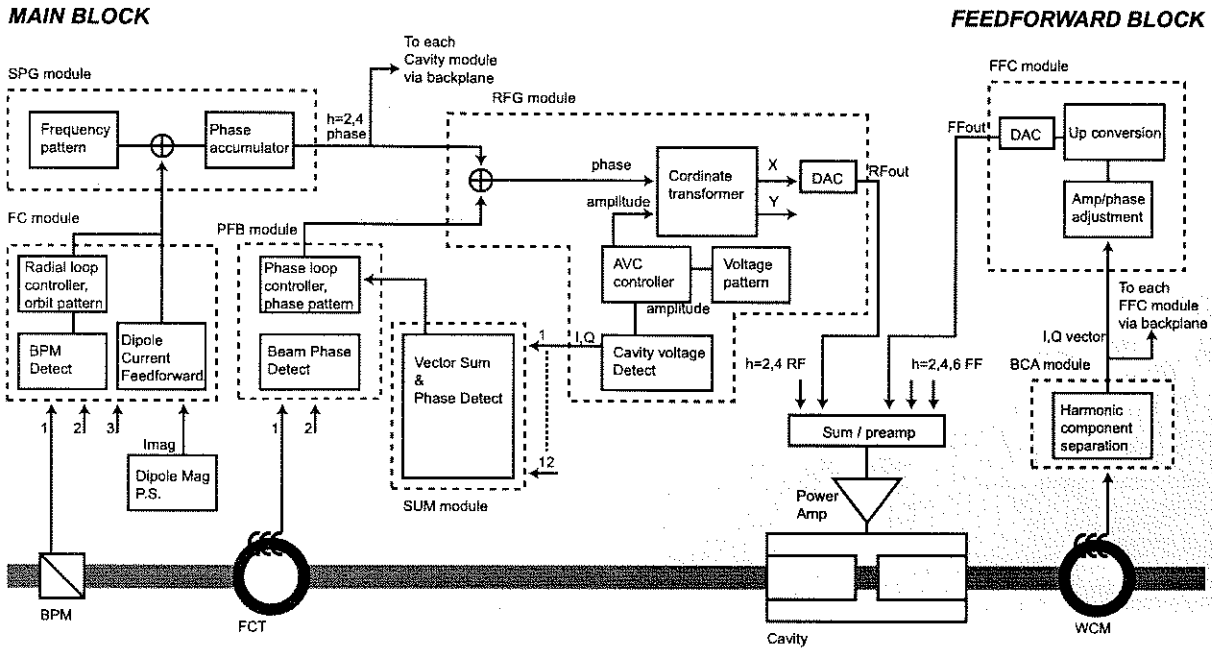


図 1: RCS の LLRF システムブロック

これらの機能は、図 1 のブロック図中では「SPG (main synthesizer)」および「RFG (RF generator)」モジュールに実装されている。

J-PARC RCS の RF フィードバック制御は、特殊なものではなく、従来からよく知られたフィードバックである。各 RF 空洞は、自動電圧制御 (Auto Voltage Control, AVC) を持ち、基本波 ($h = 2$) および 2 倍高調波 ($h = 4$) のそれぞれの振幅を、プログラムされた電圧パターンにより制御する。軌道フィードバックは、ビーム軌道に応じて RF 周波数を制御する。RCS では、3 つのビームポジションモニター (BPM) が軌道フィードバックのために使用されるが、これらの BPM からの位置信号は、適切な重みづけのうえ平均され、軌道フィードバックに使われる。

位相フィードバックは、シンクロトロン振動を減衰するために必須である。位相フィードバックでは、ファストカレントトランスフォーマー (FCT) によるビーム信号、および、12 個の加速空洞の RF 電圧信号のベクトル和の位相が比較される。

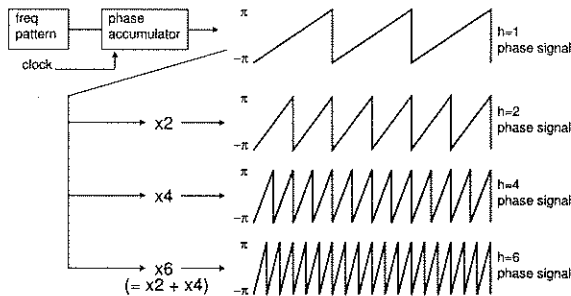


図 2: Direct Digital Synthesis (DDS) の概要

ブロック図中で、AVC の機能は RFG モジュールに、また位相フィードバックおよび軌道フィードバックはそれぞれ、「PFB (phase feedback)」および「FC (frequency control)」モジュールに実装されている。

J-PARC RCS では大強度の陽子ビームを加速するため、ビームローディングの影響についてよく検討しなければならない^[5]。RCS ではビームフィードフォワードによりビームローディング補償を行う^[6,7]ことを検討している。

ビームローディング補償のための RF 信号は、ウェーク電圧をちょうどキャンセルするような電流を最終段アンプが出力するよう、ウォールカレントモニター (WCM) からのビーム電流信号を基にして生成される。RCS では空洞の Q 値が低く帯域が広いいため、ウェーク電圧は基本加速 RF 成分 ($h = 2$) だけでなく、高次のハーモニック ($h = 4, 6$) の成分ももつ。補償信号は、ビーム電流を各成分に分けたうえ、それぞれの成分について RF システムの周波数振幅に応じ振幅と位相を適切に調整して生成されなければならない。「BCA (beam current analysis)」モジュールで、ビーム信号より各ハーモニックが検波され、各 I/Q ベクトルは、12 台の空洞ごとの「FFC (feedforward cavity driver)」モジュールに送られ、FFC モジュールにより適切な RF 補償信号に復調される。

RCS にビームをリナックより適切に入射させ、また取り出したビームを J-PARC の他の施設へ送るために、いくつかの機能が必要である。リナックのビームチョッパーのタイミング信号は、RCS の RF システムで生成される。また、取り出し時に MR の RF および MLF の中性子チョッパーに位相が合うよう、加速中よりシンクロナイゼーションが行われる。これらの機能の詳細は現在検討中である。

LLRF モジュールは、FPGA を多用して製作されている。最新の FPGA の高性能な算術演算の機能は、RF 信号検出に必須な FIR フィルタの実現のために非常に重要である。また、FPGA は再プログラミングが可能であるため、デバッグの効率も高い。図 3 に RFG モジュールの写真を示した。RFG には 2 つの VertexII-pro FPGA が使用されている。

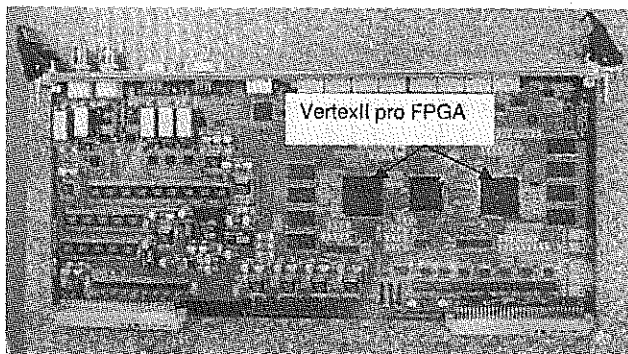


図 3: RFG (RF generator) ボード

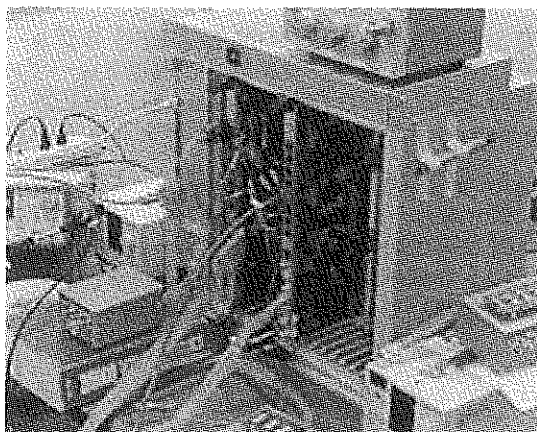


図 4: 9U VME シャーシ、SPG/RFG モジュール (試験中の様子)

3. AVC の試験

SPG および RFG ボードの組み合わせで、AVC の preliminary な試験を行なった。組み合わせの写真を、図 4 に示した。この試験では、RFG の RF 出力を外部のアッテネーターを介して空洞電圧入力に接続し、試験時には周波数を 1 MHz に設定した。AVC は PID 制御を行っており、比例、積分、微分要素のゲインをそれぞれ X_p , X_i , X_d と設定できる。

図 5 に、AVC のエラー信号のステップ応答の例を示した。この試験の場合、PID のゲインをそれぞれ $X_p = 1$, $X_i = 0.2$, $X_d = 0$ と設定した時に系は安定で、エラー信号はリングングなしに 50 μsec 以内に 0 に収束した^[3]。今後、より現実的な条件での試験を行なっていく予定である。

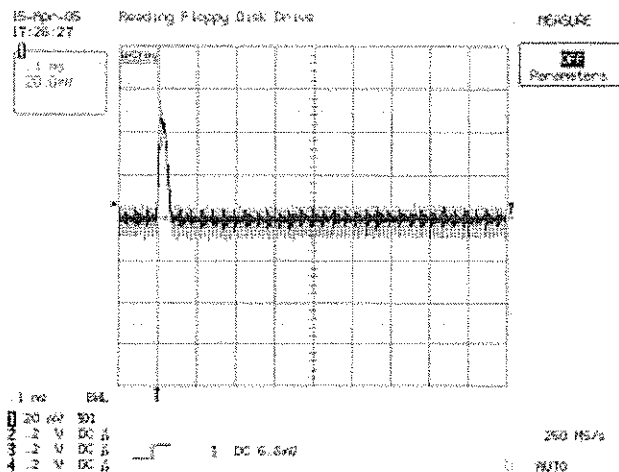


図 5: 安定条件での応答

4. まとめ

- J-PARC RCS では MA 空洞が用いられる。
- 大強度ビームの安定した加速のため、DDS を基にした、フルデジタルの LLRF システムが採用される。マルチハーモニック RF は PLL なしで生成される。
- 主なフィードバックは、AVC、位相および軌道フィードバックである。
- ビームローディング補償には、ビームフィードフォワード方式が用いられる。
- 現在、製作中であり、基本的な試験が行なわれている。

参考文献

- [1] "Accelerator Technical Design Report for High-Intensity Proton Accelerator Facility Project (TDR)", KEK-report, 2003
- [2] JHF Project Office, "JHF Accelerator Design Study Report", KEK Report 97-16 (JHF-97-10)
- [3] A. Schnase et al., "Control loops for the J-PARC RCS digital low-level RF control", in the proceedings of PAC'05, 2005
- [4] F. Tamura et al., "Low Level RF Control System of J-PARC Synchrotrons", in the proceedings of PAC'05, 2005
- [5] F. Pedersen, "Beam Loading Effects in the CERN PS Booster", IEEE Trans. Nucl. Sci. vol. NS-22 No.3, p1906, 1975
- [6] F. Tamura et al., "Digital RF Feedforward Systems for Beam Loading Compensation in J-K Synchrotrons", in the proceedings of the Eighth European Particle Accelerator Conference, Paris, 2002
- [7] F. Tamura et al., "Multi-harmonic RF control systems of J-PARC RCS", in the proceedings of PAC'03, p. 1216-1218