

Study of spill feedback using DSP for the J-PARC slow extraction

Takeshi Ichikawa^{1,A)}, Koh-ichi Mochiki^{A)}, Akio Kiyomichi^{B)}, Hidetoshi Nakagawa^{B)}, Masahito Tomizawa^{B)},
Toshikazu Adachi^{B)}, Hirohiko Someya^{B)}, Ryotaro Muto^{B)}, Hikaru Sato^{C)}, Koji Noda^{D)}

A) Musashi Institute of Technology

1-28-1, Tamazutsumi, Setagaya-ku, Tokyo, 158-8557

B) High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

C) Tsukuba University of Technology

4-3-15 Amakubo, Tsukuba, Ibaraki, 305-8520

D) National Institute of Radiological Science

4-9-1 Anagawa, Inage-ku, Chiba, 263-8555

Abstract

The slow extraction beam from J-PARC 50GeV Main Ring is used in various nuclear and particle physics experiment in J-PARC Hadron Experimental Facility. The beam spill is required flat structure and low ripple noise. We therefore are developing the spill feed back system using Digital Signal Processor (DSP) for Slow extraction beam. Here we report software Algorithm execute on DSP.

J-PARC遅い取出しにおけるDSPによるスピルフィードバックの研究

1. はじめに

J-PARC 50GeV MRリングでは加速された高強度の陽子ビームを作り出し、遅い取出しビームラインで原子核・素粒子実験施設、および速い取出しビームラインでニュートリノ実験施設に供給する。遅い取出しビームは原子核・素粒子実験に利用される。

遅い取出しビームにおいて、ビームが取り出されている間は、ビームスピルが一定量で安定していることが求められる。

そこでJ-PARC遅い取出しビームのスピル制御を目的として現在DSP (Digital Signal Processor) を用いたフィードバック制御装置の開発が進んでいる。

本装置で、リング内のビーム強度やスピルの情報をもとに、取出し電磁石を駆動に必要な信号をソフトウェアで演算を行い。

この報告ではDSPによるスピルフィードバックで有効な制御を行うソフトウェアのアルゴリズムについて述べる。

2. スピルフィードバック

供給されるビームに関して実験側からは取出しビームの時間構造であるスピルが平坦で安定していることが求められている。J-PARCではリングを周回するビームを"かんな"で削るように少しずつ取出す手法「遅い取出し」を用いてMRリングから原子核・素粒子実験施設へのビーム供給が行われる。

遅い取出しはMRリングに設置されている取出しQ磁石(Extraction Q Magnet: EQ)および、リップル除去用Q磁石(Ripple Q Magnet: RQ)を用いて行う。EQの励磁電流を調整することで周回中のビームを外側にずらし、取出しビームスピルのマクロ成分を形成する。RQの励磁電流を調整することで高周波数リップルを打ち消し、より直流に近い取出しビームを作る。図1にEQ、RQの動作の様子を示す。

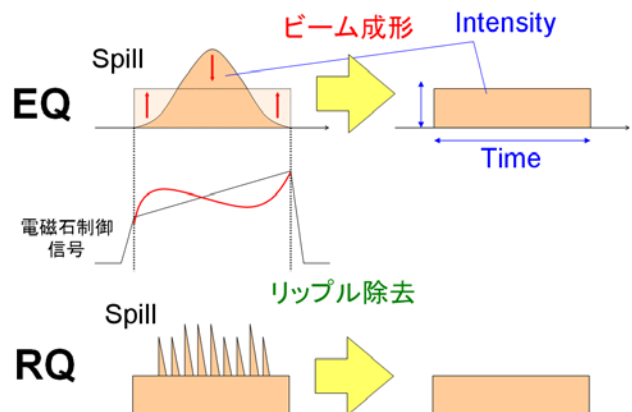


図1 EQ、RQ電磁石の動作

J-PARC遅い取出しのスピルフィードバック装置として現在開発中のシステム構成を図2に示す。

EQおよびRQの励磁電流はフィードバック装置によって作られる制御信号を入力とする。回路の動作

¹ E-mail: takeshi.ichikawa@mc.cs.musashi-tech.ac.jp

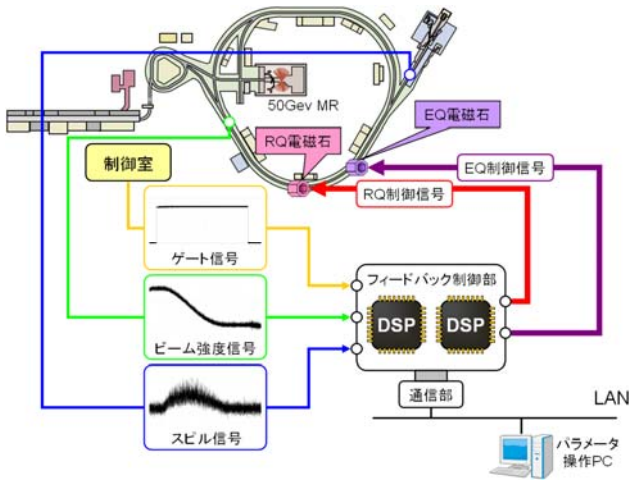


図2 フィードバックシステム構成

時間を決める「ゲート信号」、リングに設置したビームモニタから得られる加速器内のビーム残量を示す「ビーム強度信号」、取り出し直後に設置するスピルモニタから得られる取出しビーム量を示す「スピル信号」の3種類をフィードバック装置の入力信号とし、EQ,RQの励磁パターンを出力する。また、LAN通信機能を持たせ、EPICSによる制御パラメータの変更を実現する。

3. 制御系全体

遅い取り出しスピルフィードバックの制御系を図3に示す。2台のDSPによりそれぞれ点線で囲まれた部分の演算を行っている。

取り出し直前の周回ビーム強度と取り出し時間から理想の目標値($ref = \text{ビーム強度} / \text{取り出し時間}$)を計算し、維持できるようにフィードバックを行う。

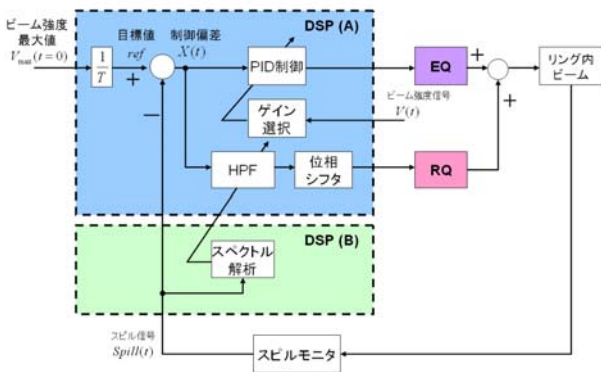


図3 制御系全体図

DSPによるフィードバック制御を行うにあたり、TI社製の高速32ビット浮動小数点演算DSPを搭載したDSPボードTMS320C6713DSKを採用した。また、共有メモリを使用することで制御演算用、スペクトル解析用のデュアルDSP環境を構築している。

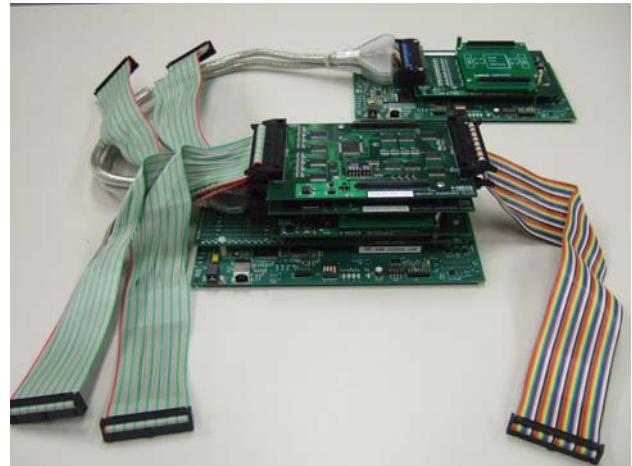


図4 デジタルフィードバック装置

4. EQ制御演算

EQ制御演算に使用される、PI制御、ゲイン選択アルゴリズムについて解説する。EQ制御により、スピルの大まかな外形を形成する。

4.1 PI制御

取り出し直前に算出された目標値にスピルを近づ

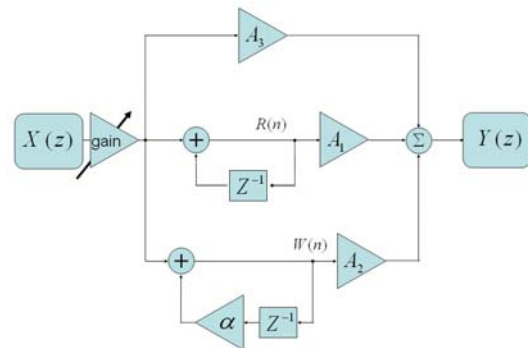


図5 EQ制御演算(PI制御)

ける働きを持っている。図4に制御演算のブロック図を示す。

取り出し開始、終了時は、偏差が大きくなるので比例要素が利き、スピルの立ち上がりとしち下がりエッジ部を形成する。

取り出し中は目標値に近づいているため、発生する残留偏差が積分要素に利き、さらに目標値に近づける働きを持つ。また、時間経過とともにループゲインの選択も行う。

4.2 ゲイン選択アルゴリズム

KEK-PS時代の経験から、EQ制御演算には時間依存性を持たせることが効果的であるとわかっている。

そこで、ビーム強度の最大値からの割合に応じて区間を設定し、区間ごとにループゲインを選択させている。図6にゲイン選択の概念図を示す。特にスピルのエッジ部を鋭くするのに効果的である。

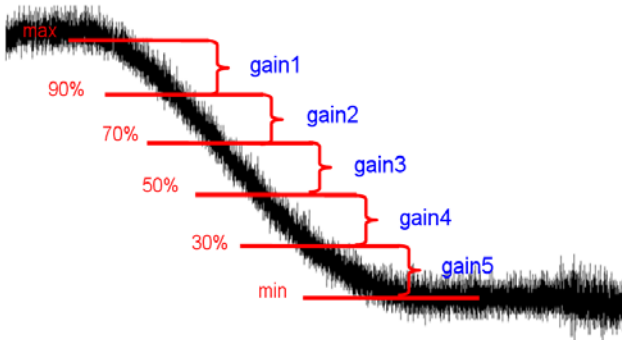


図6 ゲイン選択アルゴリズム

5. RQ制御演算

RQ制御演算に使用される位相シフタ、スペクトル解析について解説する。RQ制御により、スピルにのるリップル成分を除去する。

5.1 位相シフタ

RQでは制御偏差をHPFに通すことでリップル成分のみを検出し、リング内のビームに対して逆位相つまり反転した信号をかけて、発生するリップルを除去する制御を行う。

そのまま信号を利用すると、フィードバックループの遅延があり、位相差が生じてしまうので任意の位相にシフトして位相差を補正する。図7に位相シフタのブロック図を示す。

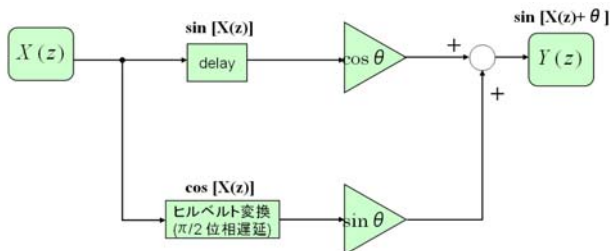


図7 位相シフタのブロック図

この位相シフタは加法定理に基づいている。対象信号に対してヒルベルト変換を行い、 $\pi/2$ 位相をずれた信号を得る。ヒルベルト変換はすべての周波数領域に対して $\pi/2$ 位相をずらすことができる。また、変換された信号と元の信号との同期を取るため、元の信号をディレイさせる。さらに、任意の位相の係数をそれぞれの信号に掛け合わせ、最後に2つの信号同士を足し合わせることで位相シフトを実現する。

5.2 スペクトル解析

現在、DSPによるスピルフィードバックの検証を放射線医学総合研究所の重粒子がん治療用加速器HIMACで行っている。スピルのスペクトルを解析すると、 $0 \sim 1.5\text{kHz}$ までの範囲にリップル成分が強く現れていることが確認されている。スピルのスペクトル解析結果を図8に示す。

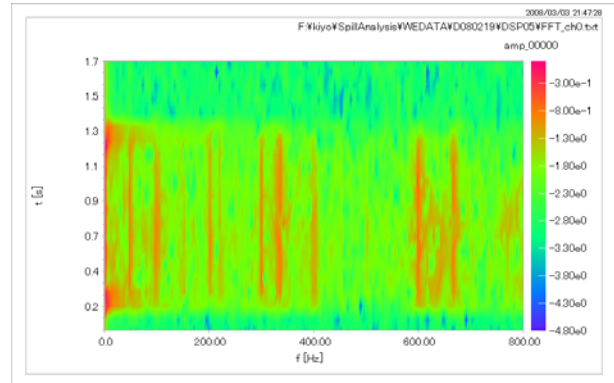


図8 スピルスペクトル解析結果

J-PARCでは取り出し制御中にスペクトル解析用のDSPによりリアルタイムでスペクトルを解析し、即時制御に利用しようと考えている。

ただし、本研究ではリップルが発生している特定の周波数に対して解析を行う。FFTではデータ取得後に演算を開始するのに対し、解析周波数の一周期経過するごとにスペクトル値が更新される。この結果を使用してHPFの通過域可変などを予定している。

6. まとめと今後の展望

J-PARCの遅い取り出しビームのスピル制御のためにDSPを用いた制御装置を使用することが予定されている。EQ,RQの両電磁石の制御信号を作り出すためのソフトウェアアルゴリズムが決まり、EQ制御に関しては動作した。

今後はRQ制御を完成させるため、スペクトル解析部、位相シフト部の構築、デュアルDSP環境下での動作確認を行う。

参考文献

- [1] A.Kiyomichi, et al., "The research on the spill feedback using DSP for J-PARC", Proceeding of the 4th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Wako, August. 1-3, 2007, 410-412
- [2] M.Tomizawa, et al., "Design and development for slow beam extraction from J-PARC main ring", Proceeding of the 4th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Wako, August. 1-3, 2007, 91-93