

デジタル制御を使った遅い取り出しのスピル改善

中川 秀利^{A)}、持木 幸一^{B)}、阿波寄 弘樹^{B)}、佐藤 皓^{A)}、白形 政司^{A)}、五十嵐 進^{A)}

^{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)} 武蔵工業大学工学部計測制御研究室

〒158-8557 東京都世田谷区玉堤 1-28-1

概要

KEK 陽子加速器の遅い取り出しのスピルの特性を改善する為に DSP を使ったデジタルフィードバックを採用しかなりの特性改善を達成している。従来は、いろんな場所で、主としてフィードバック技術の観点からの報告を行ってきた。ここでは、運転と言う観点からの成果と、従来様々な方法が試されたが、これらの方に関する考察などを報告する。

1 序

KEK の遅い取り出しは建設当時からアナログフィードバックを使用し良好な成果をあげてきた。しかし研究所に於ける加速器の増設の影響で加速器としての特性が悪化し、また、物理実験上の要求が変化し、取り出されるビーム(スピル)がより直流に近い事を要求するように変化し、従来のアナログフィードバックでは要求を満足できなくなってきた。

そこで、調整に際しより柔軟に対応できるように DSP を使ったデジタルフィードバックを採用し、新たなフィードバックシステムを構築した。

この新しいフィードバックシステムは常時リング内のビーム強度を測定して、それを基にフィードバック特性を変更する方式として、その時々で最適なパラメータを使用するようにした。[1][2]

技術的な方法は過去に何度も発表している。ここでは運転という観点からこの方法の利点を検討してみる。

2 SPILL CONTROL

KEK の PS では遅い取り出しのためにビームの水平方向のベータトロン振動数を半整数共鳴に近づけることにより、ビームがリング内に自然にまたは強制的に発生させられた高次の磁場成分の影響で安定軌道から逸れて、取り出し軌道に移行する現象を利用している。

そこで、取り出されるビーム量を一定に保つためにベータトロン振動数を半整数共鳴に近づける速さを調整する。KEK の PS ではラティスの磁石で形成されるベータトロン振動を基にして、さらに EQ と RQ と呼ばれる 4 極磁石の磁場を使い共振周波数を微調整して取り出しの安定化を行っている。

この関係を模式的に表現すると図 1 のようになる。EQ の適正な励磁電流でビームのベータトロン振動数が半整数共鳴の値をとるようにラティスの磁石の電流を大雑把に合わせる。EQ の励磁電流を調整し半整数共鳴状態を作

り出す。RQ の励磁電流を調整することで周波数の高い揺らぎ成分を打ち消し、より直流に近い取り出しビームを作り出す。

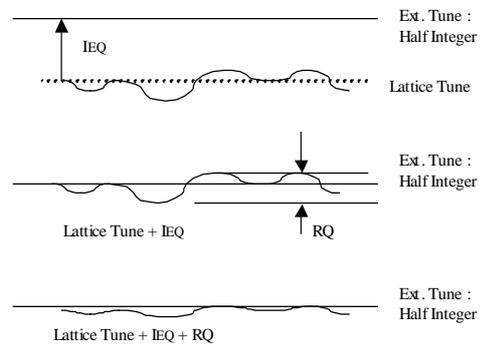


図 1 共鳴制御

しかし、ビームは物理空間や運動量空間の分布において一様ではないため、フィードバック制御に難しい問題を提起する。スピルが EQ の電流変化 (IEQ) に比例しないのである。我々の測定では、IEQ を一定の割合で変化させた場合、加速器の調整に応じて様々な形状を取るが、スピルが図 2 の様になる事が多い。

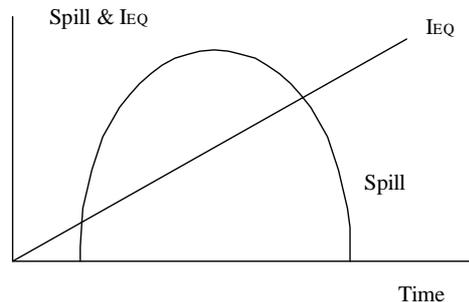


図 2 IEQ を一定の割合で変化させた時のスピル。

これは、フィードバックのループの一部に時間により特性の変化する要素を含んでいることを意味する。スピルを安定にするためのフィードバックの特性を単一の値として決定できないのである。

3 従来の方法（アナログフィードバック）

この加速器ではスピルを安定にするために、アナログフィードバックを使いながら様々な試みがなされてきた。簡単にアナログフィードバックの動作といくつかの工夫を簡単に解説し、後で述べるデジタルフィードバックの考察の参考にする。

3.1 単純アナログフィードバック

特性改善のための様々な時定数はあるが、基本は単純なPI型のフィードバック制御装置である。ここでは、取り出し時間が有限であり、その時間を有効に使う為に取り出し時間を一定にするような操作を行う。具体的には取り出し直前のリング内のビーム量を基にスピルハイト（単位時間のビーム取り出し量）を決定し、取り出し量の測定値との差をフィードバックに使う。

3.2 立ち上がり特性補償型

PI型のフィードバックでは単純化して議論すると、オーバーシュートは避けられない。そこで、積極的にオフセットパターンを加え、特性を補償する試みもあった。図3に概念図を書いてみる。

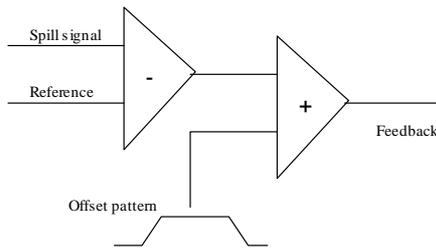


図3 積分特性の依存性を緩和する試み

パターンを印加する事で積分制御の一部を肩代わりしていたらしい。

3.3 過剰反応抑制型

加速器からビームを取り出すには、様々な調整が必要であるが、取り出し効率の調整の都合上IEQを電源の限界まで大きくするとスピルのリップル成分が減少する時もあった。

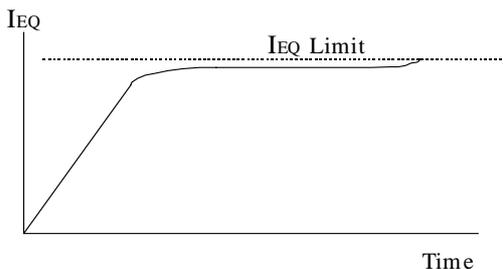


図4 EQ用電源を限界で使う

フィードバックのゲインを高く設定しても、電源装置の飽和のために、発振状態を回避できていると考えられる。一種の非線形フィードバックと考えているが、運転時間の都合で、詳細な確認の実験は行っていない。

4 デジタルフィードバック

デジタルフィードバックでは立ち上がりの特性や取り出し中のビーム分布の変化によるループ特性の変化の補償が容易に行える。また、RQの周波数特性の変更もハードウェアの変更よりは容易である。その結果、最適値の探索を行い、50 - 500 Hzの付近のリップルの除去にRQのフィードバックが効果的であることが確認された。

現在、EQに関しては取り出し前と取り出し末期と取り出し中の3分割で、5組のパラメータをビーム強度の初期値に対する割合から決定し、使い分け最適制御を行っている。

表1 EQのフィードバックにおけるゲイン変更の例

範囲	ビーム残量比	ゲイン
1	> 0.9	0.0003
2	0.9-0.7	0.00023
3	0.7-0.5	0.00021
4	0.5-0.3	0.00021
5	< 0.3	0.0003

5 アナログとデジタルの比較

アナログ回路によるスピルの為のフィードバック制御でも、工夫次第でかなりリップルの少ないスピルを実現できる。時として、DSPを使ったデジタルフィードバックと同等のリップルの少なさを実現しているときもある。

ただ、2.2 や2.3 で示した方法は加速器の変化に対する追従性に難がある。図1で示したように取り出し時の共鳴状態はラティスの磁石で決定される量と取り出し系の磁石で補正される量との合成であり、また、パワーの関係からラティスの磁場の僅かな変化は、取り出し系の電源にとっては大きな変化であり、固定されたパターンの印加や、IEQを電源の限界にラティスの磁場を合わせるような使い方は、長期的安定性という面で無理がある。

DSPを使った取り出し制御では、4章で述べたように取り出し中のビーム量を監視して、フィードバック特性を変えているのだが、これは2.2のオフセットパターンの値にビームがスタートした時の値を入れるようなものであり、常に自動的に最適値を設定していることに相当する。

また、図2で示したようなビーム分布の変化に基づくループゲインの変化の補正を行っているために、デジタルフィードバックではそれぞれのタイミングにおいて適切なフィードバック量を設定できるため、電源の飽和のような無理な特性に依存しなくても発振を回避できる。

2.3型のアナログフィードバックでは、ラティスの僅かな変化が、致命的な影響を及ぼすために、日に何度かの調整が必要になったりする。デジタルフィードバックでは、初期調整に取り出し系の電源が動作する範囲の中央あ

たりに調整しておくために、一度正常に動き始めるとひとつのランで、加速器のパラメータの大幅な変更がない限り再調整の必要がなく運転を続けられる。

ただし、図2で示したようなビーム分布が安定していることを想定している。この分布が大きく変わるような加速器の調整が行われた場合、再調整をしないでは済まされない。

外乱がある場合とない場合のアナログフィードバックとデジタルフィードバックの取り出しビーム中に含まれるリップル成分の比較を図5に示す。ただし、それぞれで上記のような凝った調整ではなく調整時間重視の簡便な調整を行ったときの様子であり、それぞれにとって最適調整がなされた時の様子ではない。

くでは、立ち上げ調整時は比較的調整が楽なのだが、一日の中での安定性に問題があり、また、アーク炉の動作中のような極端に変化する外乱に対処できないために、常時調整依頼が発生することになる。

我々の作ったデジタルフィードバックシステムは途中でも書いたように図2で示されるような基本条件が変わるような大きな変化には自動対応することができない。当面は表1のようなフィードバック係数を人の手で変更し、最適値を求めている。ただ、様々な信号処理で発振やフィードバックのゲイン不足を決定する方法はあり、その方法を実用化に向け現在研究中である。近い将来、表1のようなフィードバック特性すら自動的に決定できるシステムまで進化させたいと考えている。

Ripple (Digital vs Analog)

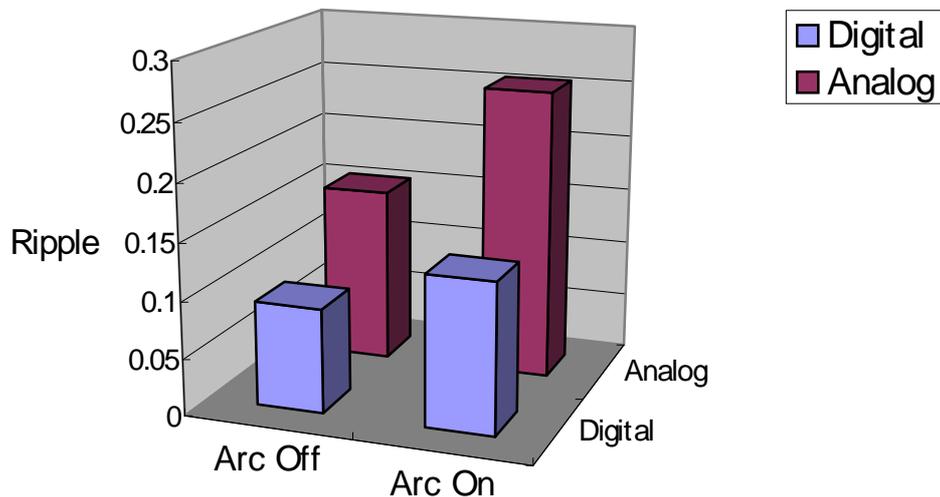


図5 アナログとデジタルのリップルの比較

「Arc On」が外乱のある時で「Arc Off」が外乱の無い時である。約1.5倍の違いがある。

6 まとめ

上記の比較は最初にアナログフィードバックで調整を行い、その後、DSPによるデジタルフィードバックに切り替えた時のデータであるが、そのために要した時間は約1.5時間であり、作業内容は以前作ったプログラムをDSPに入れ起動し、バッファアンプのゲインをDSPに適切な値に合わせることであった。

非常に微妙な物理実験で、スピルのリップルに極端に敏感な実験がある。この様な実験では、DSPを使った場合でも、調整に時間を要する。ただ、一度調整を終えると、日毎の調整の必要はなさそうである。アナログフィードバ

参考文献

- [1] H. Tanaka, H. Nakagawa, et.al. "Spill servo control by DSP", Proceedings of ICALEPCS 1999, Trieste, Italy, Oct 4 - 8, 1999.
- [2] H. Tanaka, H. Nakagawa, et.al. "low Extraction Control using the Digital Feedback System", Proceedings of EPAC 2000, Jun. 26 - 30 2000.