

氏 名 皆 川 康 幸

学位（専攻分野） 博士(工学)

学 位 記 番 号 総研大甲第243号

学位授与の日付 平成9年3月24日

学位授与の要件 数物科学研究科 加速器科学専攻

学位規則第4条第1項該当

学 位 論 文 題 目 Bunch-by-bunch Feedback System Using the Two
Tap FIR Filter

論 文 審 査 委 員 主 査 教 授 平松 成範
教 授 春日 俊夫
教 授 黒川 眞一
教 授 佐藤 康太郎
助 教 授 小林 仁
助 教 授 福間 均（高エネルギー加速器研究機構）

論文内容の要旨

KEKB、PEP II などの B 物理実験用のコライディングマシンでは、高ルミノシティ達成のために数千のバンチを貯蔵する事を計画している。KEKBはバンチ間隔 2 ns、約5000バンチのリングになる予定であり、このようなリングでは、強いcoupled bunch Instabilitiesが励起されやすく、ビームフィードバックを備える必要がある。我々はこのバンチバイバンチフィードバックシステムの信号処理部にデジタルフィルターの一種である 2 tap FIR フィルターを用いることによって高性能のフィードバックを実現しようとしている。

この 2 tap FIR フィルターが担う機能は、検出した振動だけをバンチに返し、余分な振動を返さないためのノイズ成分除去の機能と、バンチから検出された振動の位相を 90° 進ませてその振動を同じバンチに戻すための位相シフトの機能である。

ここで、2 tap FIR フィルターがフィードバックシステムの信号処理部として最適であるかが問題である。2 tap FIR フィルターの処理は貯えられた振動のデータ列から 2 つのデータを引き出し、引き算処理を行うだけである。そのため、その回路構成も他のフィルターに比べて最もシンプルなものになる。一般的に懸念されるのは、このシンプルな構造でフィードバックシステムの信号処理に十分であるか、またこのフィードバックシステムが安定なシステムとなるかという事である。さらに、2 つの tap 位置 (データ列からデータを引き出す位置) をいかに選ぶかも、自明ではない。(transverse のとき)。それは、2 つのデータ間の時間差がデジタル信号処理によりサンプリング間隔の整数倍で表されることに起因する。一般に 2 tap FIR フィルターにおける 2 つのデータ間の時間差は、フィルターを通過させる信号の周波数の逆数の 2 分の 1 に等しくならなければならない (2 tap FIR フィルターはバンドパスフィルターとして働く)。しかし、実際にはデジタル信号処理によって、必要な時間差と完全に等しくすることはできない。longitudinal ではチューンが小さいために、2 tap FIR フィルターの時間差と実際に必要な時間差との差が小さく 2 tap FIR フィルターの設定は一組に決まるが、チューンの小数部の大きい transverse では設定を一組には決定できない。そこで transverse の場合、フィルターが期待通りの十分な機能を持つように 2 tap FIR フィルターの設定方法を考慮する必要がある。

この研究では、これらの問題 (tap 位置の設定方法、フィードバックシステムの信号処理としての能力、フィードバックシステムの安定性) について計算やシミュレーションを用いて解決方法及び 2 tap FIR フィルターの有効性を示す。さらに、2 tap FIR フィルターの試作機を製作して、実際のリングでフィードバックシステムを組み上げ、この 2 tap FIR フィルターの信号処理が実用性があり、広いチューンの範囲で適用可能であることを示す。

論文では、最初に 2 tap FIR フィルターの特性を式で示すとともに transverse においてフィルターの十分な能力を引き出すための tap 位置の設定方法とその方法による最適 tap 位置の計算結果を示している。ここでは、net gain と呼ぶ値を tap 位置の設定の指標として、この値を基に最適 tap 位置を決めている。最適な tap 位置を選択するまで、tap 位置を 4 や 8 まで制限したとしても広いチューンの領域をカバーできることが計算で示された。

つづいて、2 tap FIR フィルターを含んだフィードバックシステム全体の安定性について考察する。フィードバックループの安定性を調べるには、そのループをどこか一ヶ所で切ったときの一巡伝達関数を調べれば良い。加速器内でのビーム自身の振る舞いに対する伝

達関数は振動のチューンに相当する周波数に鋭いピークを持ち、これはシステムの一巡伝達関数にも強く現れている。システムの安定性を調べるためのgainの大きさとしては、この振動のチューン近辺だけを調べれば良いことになる。この結果、システムの一巡伝達関数の位相の変化量だけが2 tap FIRフィルターの設定に強く依存し、tap位置が小さいほどシステム全体の位相の変化はなだらかであり、システムが安定であるループゲインの最大値を大きく取れることを示す。また、ビーム自身の伝達関数が強く反映される事から、2 tap FIRフィルターのノイズ成分除去の機能が必要ないだけでなく、ビーム自身がフィルターの役割をなしていることを示す。

実験はTRISTAN ARにおいてtransverseのフィードバックシステムを組み、上記で提案した2 tap FIRフィルターのtap位置の最適設定によるフィードバックで、damping rateの測定を行った。その結果、damping rateの計算値と実験値が測定誤差の範囲でよく合い、フィードバックシステムが計算どおり働くことを示す。

実験では、システムが不安定になるほどの大きいループゲインを得る事が出来なかったため、システムの不安定性に対する定量的考察はシミュレーションによって行う。実験と同じ条件下でシミュレーションと実験の結果がよく合う事を示した後、システムが安定に動く最大ループゲインやtap位置の大きさに対するシステムの不安定性を調べる。その結果、tap位置の大きさによっては、システムが加速器のチューンの変化に敏感となり不安定になりやすい事を示す。また、このシミュレーションを用いて、システムのデジタル信号処理によって生じるデータ量子化の影響と振動の残留幅の関係を調べる。この結果では、振動の残留幅がデータの1 bit幅に相当する範囲内に収まる事が確認されるとともに、ディザリング効果の併用によって8 bitの分解能でもアナログ信号処理に匹敵する分解能を持つ事を示す。

この論文において2 tap FIRフィルター使用のtransverseのフィードバックシステムを、計算、実験、シミュレーションを通して検証して特性を明らかにし、フィードバックシステムとして十分な性能を保持していることを示すとともに広いチューンで使用できる事を示した。

論文の審査結果の要旨

素粒子物理学の標準モデルを実験的に検証するために現在最も有力な、電子・陽電子衝突型加速器、いわゆるBファクトリーが日米で建設が進んでいる。Bファクトリーでは高いルミノシティが必要なため大きなビーム電流を蓄積し、かつ加速高周波の全周期にビームバンチをトラップさせてフルバンチ運転することを前提をしている。そのため強い結合バンチ不安定性が存在することが予想され、強制的に不安定性を抑制する手段が必須である。例えばKEKBでは約5000バンチの個々のバンチを識別して、不安定性によるバンチ振動を検出し、同じバンチを振動振幅に応じて逆方向にキックして振動を減衰させると云うバンチ・バイ・バンチ・フィードバックを行う必要がある。

皆川康幸君の論文は蓄積リングにおける横方向ビーム不安定性を抑制するための、バンチ・バイ・バンチ・フィードバック・システムの信号処理に必要な信号選択フィルターに、2タップ方式デジタル・フィルターを用いることの有効性を計算及び実験で実証したものである。これまで、高速演算機能を有する点では、2タップ方式デジタルフィルターはバンチ・バイ・バンチ・フィードバック系の信号処理に適しているが、演算処理の単純さからフィードバック系に対する適応性が懸念されていた。本研究では同方式のフィルターを採用したフィードバック系を構築し、高エネルギー物理学研究所のトリスタン蓄積リングのビームを用いた実験とシミュレーション計算との比較を系統的に行い、2タップ方式デジタルフィルターの有用性を実証した。同方式フィルターの自由度の低さから、特に横方向不安定性に対する適応性が懸念されていたが、十分広いベータトロン振動周波数領域をカバーすることが可能であることを、計算及び実験によって示した。また初めて、同方式フィルターを採用したフィードバック・ループの、ビーム伝達関数を含んだ閉ループ伝達関数に関する定量的解析を行ったことで、ループ中のフィルターのノイズ除去能力は必要ないことを示し、閉ループ特性の観点からはアナログ・フィードバック方式と同等の性能が期待できることを明らかにし、2タップ・デジタル・フィルターの適用は何の問題も派生しないことを確認した。更に、デジタル処理における信号量子化から生ずるビームの不安定性振動の残留振幅も、ディザリング技術を応用してビット誤差を平均化することで、無視できる大きさまで抑圧可能なことを計算によって示した。同君の系統的な研究により、同方式フィルターの採用によってバンチ・バイ・バンチ・フィードバック系の性能をアナログ方式に比較して劣化させることはなく、逆にベータトロン振動に対するチューニングの自由度が格段に大きくなる利点が明確となり、実験によってそれを裏付けたことは高く評価できる。

広いベータトロン振動数の範囲に渡って、また種々のバンチ数に対して、2タップ式フィルターを用いたフィードバック方式の有効性を系統的に研究したものは同君の研究が初めてであり、同フィルターの今後の応用に対して重要な指針を与えるものである。また、以上のような極めて高度な高速電子回路技術が要求されるフィードバック実験を準備、遂行した同君の実験技術は、今後研究者として要求される十分なレベルに達していると判定される。以上、平成8年12月12日に行われた論文審査会において、審査員全員による厳正なる審査の結果、本大学数物科学研究科加速器科学専攻の博士学位論文として十分に値するものと判断した。