

順応型フィードフォワード制御による 偏光スイッチング型アンジュレータが引き起こす軌道変動の抑制

公益財団法人高輝度光科学研究センター
加速器部門 正木 満博

Abstract

SPRING-8 蓄積リングには、高速キッカーシステムを搭載した偏光スイッチング型アンジュレータと呼ばれる挿入光源が実装されている。この偏光スイッチングのためのキッカー駆動が、蓄積リングの電子ビーム軌道に周期的な摂動を与え、その結果、光源の安定度が劣化してユーザー実験の支障となっていた。この問題を解決するために加速器グループでは、順応型フィードフォワード制御 (Adaptive Feedforward Control) による新たな軌道補正システムを導入した。これにより、キッカーの駆動を実験ユーザーが気付かないレベルにまで、軌道の安定状態を保持することができるようになった。本稿では、この新しい軌道補正システムの概要を紹介する。

1. はじめに

SPRING-8 蓄積リングに設置されている高速偏光スイッチング型アンジュレータは、ID23 と ID25 の 2 台である。それらは図 1 に示すようなツインヘリカルアンジュレータシステム^[1,2]となっており、右回り円偏光と左回り円偏光を生成するヘリカルアンジュレータがそれぞれ上下流に並んでタンデム配置されている。右回り、左回りの円偏光スイッチングは、5 台の高速キッカーを用いて電子ビーム軌道に動的な局所バンブ軌道(図 1 の Orbit bump A と Orbit bump B)を生成し、それらを周期的に切り替えることで実現している。スイッチング周波数は、ID23 については 1 Hz、ID25 については 1 Hz または 0.1 Hz である。電子ビーム軌道が Orbit bump A にスイッチされている時、上流側アンジュレータからの右偏光放射光は水平に軸外しとなり、フロントエンドアブソーバーにより止められる。一方、下流側アンジュレータからの左

偏光放射光はビームライン光軸に沿って伝播し、実験ステーションまで到達する。電子ビーム軌道が Orbit bump B にスイッチされている時は、状況は逆となる。このように 2 つの軌道 A と B を交互に切り替えることで、実験ユーザーに左右円偏光の放射光を交互にスイッチして提供している。軌道 A と B における放射光ビームの空間的な分離角は、ID23 については 300 μrad 、ID25 では 100 μrad である。

局所バンブ軌道 A 及び B は、ID セクションの中だけで閉じているのが理想的であるが、実際には高速キッカーにキック誤差があるため、その外側の軌道にも若干漏れ出している。このバンブ軌道の漏れによる軌道変動を補正するために、ID23 及び ID25 セクションの両端には空芯コイルからなる高速補正ステアリング電磁石が設置されており、キッカー駆動と同期したフィードフォワード軌道補正が、挿入光源グループによって元々実装されていた。しかしながら、この

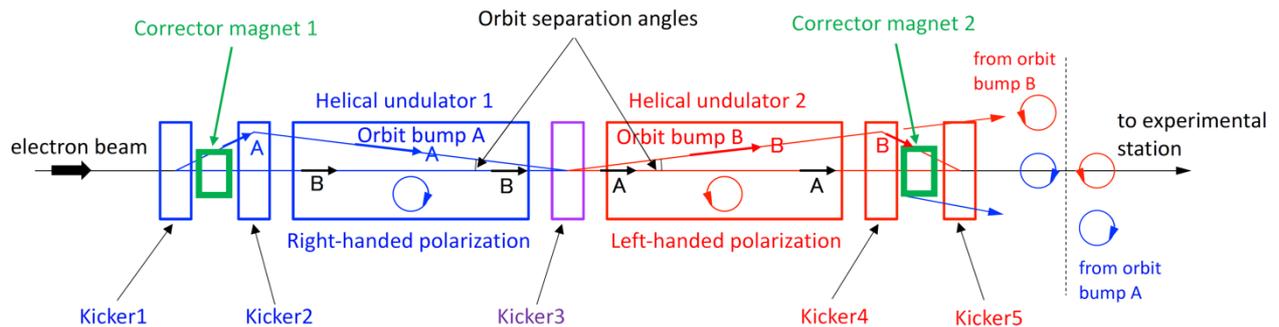


図 1 ツインヘリカルアンジュレータシステム

フィードフォワード補正は、時間経過とともに補正精度が徐々に劣化し、キッカー駆動に同期した周期的な軌道変動が、補正テーブル調整後から次第に増加していく傾向にあった。いわば一度調整した補正テーブルがすぐに有効期限切れになってしまうような状況であった。この劣化の原因は挿入光源グループによって長年調査されてきたが³⁾、様々な要因が複雑に関係しており、原因を取り除くには至らなかった。このような状況を解消するために、軌道補正精度劣化の原因除去は一先ず脇に置き、キッカー駆動による周期的軌道変動パターンを常時検出し、その変動パターンからフィードフォワード補正テーブルを動的にアップデートする、いわゆる順応型フィードフォワード制御 (Adaptive Feedforward Control: AFC) による軌道補正システムの導入に舵を切った。この新しい AFC 補正システムは加速器グループで開発され、現在ユーザー運転で実運用されている。この AFC システムの詳細については、参考文献[4]の論文を参照して頂くとして、本記事では簡単に概要のみを紹介する。

2. 軌道補正スキーム

偏光スイッチングのための局所バンパ軌道は水平方向に生成されるため、キッカー駆動時に誘起される軌道変動の主成分は水平方向である。従って、AFC による軌道補正は水平方向に対して適用している。開発した AFC 補正システムは、キッカー駆動時のビーム

振動パターンを高速 BPM により一定の時間間隔で測定し、そのビーム振動パターンを打ち消すための ID23 及び ID25 両端の空芯補正ステアリングにフィードするカウンターキックパターンをリアルタイムに算出する。このカウンターキックパターンを元のフィードフォワード補正テーブルに逐次加算して補正テーブルを動的にアップデートすることにより、キッカー駆動時でも軌道変動が抑制された状態を常時保持するものである。図 2 に AFC 補正システムの全体概略図を示す。このシステムをうまく機能させるために、設計上考慮した点を以下に述べる。

1) 高速 BPM

軌道変動はキッカー駆動の繰り返し (1 Hz or 0.1 Hz) に同期して周期的に発生するが、1 周期中の変動パターンには数十 Hz の周波数成分が含まれている。従って、この変動パターンを正確に捉えるために、10 kHz の高速サンプリングレートでデータ取得が可能な MTCA.4 ベースの専用 BPM⁵⁾をリングの 4 箇所に設置した。キッカー駆動に同期した BPM データを取得するために、ID23 及び ID25 用の VME からそれぞれ独立に出力されるキッカーパターントリガー信号を MTCA.4 のデジタイザボードに入力し、制御ネットワークを介してそれらのパターントリガー信号の入力タイミングのタイムスタンプと 4 箇所の BPM データを紐付けし、駆動に同期したデータを抽出する仕組みとなっている。

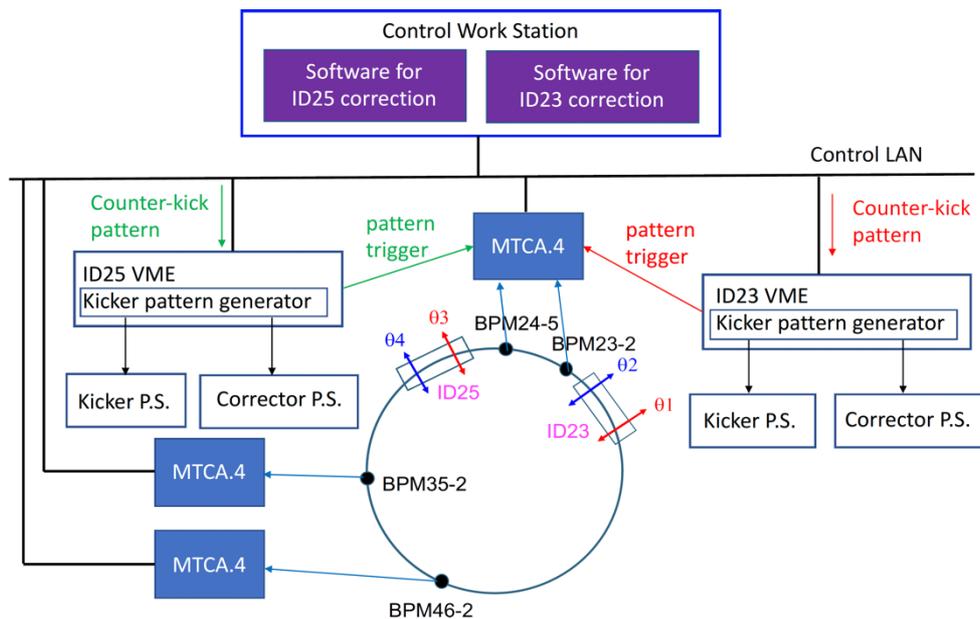


図 2 AFC 補正システムの全体概略図

2) BPM 配置

BPM の配置は、ID23 及び ID25 でのエラーキックに対する応答が大きい場所、つまりキッカー駆動によるビーム振動の検出感度が高い（振動の腹に近い）場所を 4 箇所選択した。選択した BPM は、ID23 でのエラーキックに対して感度が高い BPM23-2（23 セルの 2 番目）と BPM46-2（46 セルの 2 番目）、及び ID25 でのエラーキックに対して感度が高い BPM24-5（24 セルの 5 番目）と BPM35-2（35 セルの 2 番目）の合計 4 箇所である。また、選択した BPM 間のベータロン位相の関係は、ID23 と ID25 のキッカーが同じ繰り返し周波数 1 Hz で同時駆動している場合でも、それぞれに対するカウンターキックが分離よく抽出できる位相関係となっている。つまり、ID23 に対して感度が高い BPM23-2、BPM46-2 と、ID25 に対して感度が高い BPM24-5、BPM35-2 の位相差は、理想的な条件の直交関係に近くなっている。

3) データ処理

4 台の BPM で測定されたビーム振動パターンから、ID23/25 におけるエラーキックに起因する成分のみを高精度かつ効率的に抽出することも肝となる。BPM データのランダムノイズが、計算されるカウンターキックの誤差に直結し補正性能をリミットしてしまうからである。従って、BPM データの S/N 比を向上させるための適切なフィルタリング処理が必須である。キッカー駆動による軌道変動は、駆動の繰り返しに同期した周期的変動という特徴を持つ。その周期性を利用して効率的に目的の振動成分のみを高 S/N 比で抽出する。そのためにまずキッカー駆動中の BPM データを数十周期分取得し、それを FFT 演算により周波数領域に変換する。その周波数スペクトルにはキッカー駆動の繰り返し周波数とそのハーモニクス周波数に応じたピークが現れる。これらピークは駆動により誘起されたビーム振動成分のみの情報を持っているので、高周波ノイズを除去するための適当なカットオフ周波数のローパスフィルタ演算を施した上で、ピークのみを拾い上げて逆 FFT 演算し、時間領域に戻すことで S/N 比が向上した 1 周期のビーム振動パターン（取得した周期数分の BPM データが 1 周期の時間幅に折り畳まれ平均化されたパターン）が得られる。

1 Hz でのキッカー駆動の場合、60 周期分の BPM データを取得し FFT 演算をする。得られた FFT スペクトルに 100 Hz カットオフのローパスフィルタ演算を施し、1 Hz とそのハーモニクス周波数のピーク値のみを拾い上げ、逆 FFT 演算することにより、1 周期長に折り畳まれたビーム振動パターンを得る。この振動を打ち消すためのカウンターキックパターンを計算し、ID 両端に配置された空芯補正ステアリングにフィードする。これら一連の処理を一定時間間隔で繰り返すことで、軌道変動が抑制された状態を維持している。

3. 軌道変動の抑制とその効果

AFC 補正の効果を示すために、ID23 キッカーが 1 Hz 駆動している場合を例として取り上げる。図 3 は、2020 年 1 月に実施した AFC 補正のビーム試験において、ID23 のギャップが 15.3 mm の時に蓄積リング 15 セルアーク部のビーム振動監視用 BPM で観測されたデータである。AFC 補正適用前の状態では、キッカー駆動時の水平ビーム振動が peak-to-peak で 16 μm 程度観測されていたが、AFC 補正適用後には劇的にビーム振動が減少し、キッカー駆動時でも停止状態とほぼ同レベルにまで変動が抑制されていることが分かる。

このビーム振動を各 ID 光源点での振動レベルに相当する量に換算し、水平方向の光源位置変動と光軸角度変動（peak-to-peak）の推定値を求めたものを図 4 に示す。エラーキックのソースである ID23 とのベータロン位相の関係で、ID によって影響の度合いが異なるが、AFC 補正適用前では光源位置変動が最大 60 μm (p-p)、光軸角度変動が最大 2 μrad (p-p) に達していたビームラインがあったと考えられる。この光源振動は、AFC 補正によって 1 桁以上低減させる

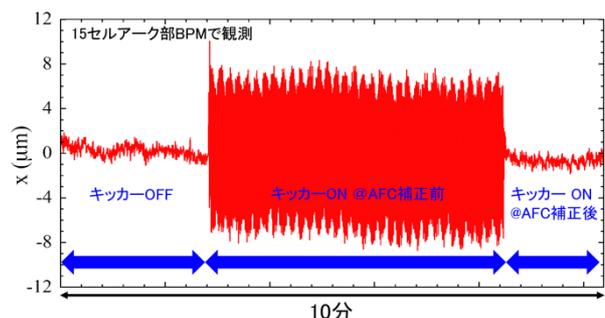


図3 ID23 キッカー1 Hz 駆動時に、15 セルアーク部 BPM で観測した AFC 補正前後での水平ビーム振動。

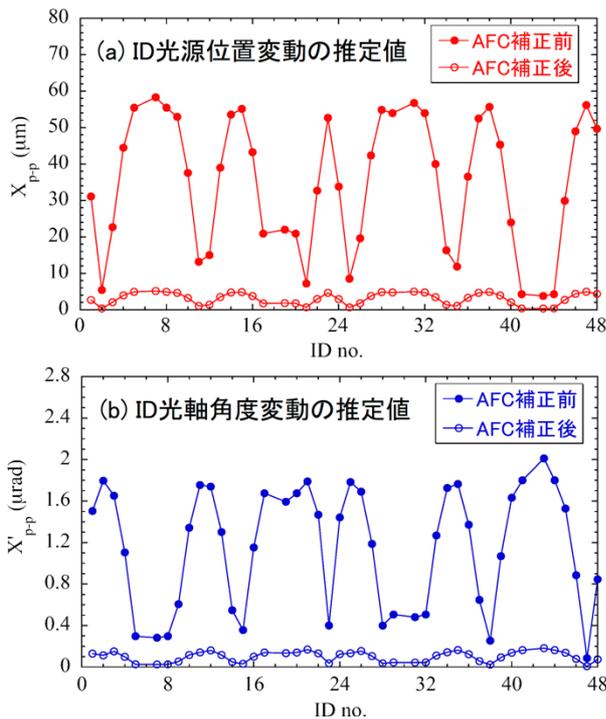


図4 ID23 キッカー駆動時における AFC 補正適用前後での各ID光源の水平振動 (peak-to-peak) の推定値。(a)は光源位置変動、(b)は光軸角度変動を示す。

ことができ、かつその状態を常時維持することができる。ID25 キッカー駆動においても、エラーキックとの位相関係により影響の大きいビームラインが ID23 の場合と異なるが、同様に AFC 補正によって光源振動が低く抑えられることが確認できている。また ID23 と ID25 の両方のキッカーが同時に駆動している状況でも、この AFC 補正がうまく機能することがビーム試験やユーザー運転中の運用において確認できている。

図4に示した AFC 補正適用前の ID 光源位置変動及び光軸角度変動の大きさは、ID 中心での水平方向の光源サイズ約 1.3 mm (p-p)、アンジュレタ放射の典型的な角度発散 (例えば、X 線波長 1 Å、ID 長 4.5 m の場合、13 μrad (p-p)) に比べて十分に小さく、実験に支障をきたすレベルの変動ではないようにも思える。しかしながら、ビームラインに設置された狭いスリットを仮想光源に見立て、フレネルゾーンプレート (FZP) 等の光学素子で X 線を集光するような実験セットアップにおいては、光源の位置変動が FZP 焦点面での光軸角度変動となって現れる。例えば ID23 キッカー駆動時に、図4(a)に示すように光源位

置が 60 μm (p-p) で変動した場合、実験試料上に入射する X 線の光軸角度は、数 μrad (p-p) のオーダーで 1 Hz 変動することになり、精密な X 線散乱実験等の支障となり得る。AFC 補正適用後には、この角度変動が 1 桁以上抑制され、実験に悪影響を与えないレベルに安定化された。

4. まとめ

開発された順応型フィードフォワード制御 (AFC) による軌道補正システムは、ユーザー実験の支障となっていた ID23/25 の偏光スイッチングキッカー駆動に起因する軌道変動の問題を解消し、ユーザーにその駆動をほとんど意識させないレベルまで軌道安定状態を保持できている。SPRING-8-II 等の次世代放射光源の性能を最大限に生かすためには、究極の軌道安定化が求められる。今回のケースのように、軌道変動を引き起こすエラーソースの場所とその特性が明確に分かる場合は、標的となるエラーキックをその直近で常時正確に打ち消すことができる AFC システムを導入することで、高効率かつ高精度の軌道補正を実現することができ、次世代放射光源においても非常に有効な軌道安定化ツールの一つとして活用が期待できる。

参考文献

- [1] T. Hara *et al.*: *J. Synchrotron Rad.* **5** (1998) 426-427.
- [2] T. Hara *et al.*: *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* **498** (2003) 496-502.
- [3] R. Kinjo *et al.*: *Proceedings of PASJ* (2018) 366-370.
- [4] M. Masaki *et al.*: *J. Synchrotron Rad.* **28** (2021) 1758-1768.
- [5] H. Maesaka *et al.*: *Proceedings of IBIC* (2019) 471-474.

正木 満博 MASAKI Mitsuhiro

(公財) 高輝度光科学研究センター 加速器部門
 (旧) : (公財) 高輝度光科学研究センター 光源基盤部門
 〒679-5198 兵庫県佐用郡佐用町光都 1-1-1
 TEL : 0791-58-0886
 e-mail : masaki@spring8.or.jp