

Suppression of Longitudinal Coupled-bunch Instabilities at the KEK-PF

Takashi Obina^{1,A)}, Makoto Tobiyama^{A)}, John W. Flanagan^{A)}, Mikito Tadano^{A)}, Toshiyuki Mitsuhashi^{A)}
W. X. Cheng^{B)}, J. D. Fox^{B)}

^{A)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK), 1-1 Oho, Tsukuba, 305-0801, Japan

^{B)} Stanford Linear Accelerator Center, 2575 Sand Hill Rd, Menlo Park, CA 94025, U.S.A.

Abstract

A bunch-by-bunch feedback system has been developed to suppress longitudinal coupled-bunch instabilities at the KEK-PF. A longitudinal kicker based on a DAFNE-type overdamped cavity has been designed and installed in the ring, and a general purpose signal processor, called iGp, has been developed by the collaboration of the KEK, SLAC, and INFN-LNF. The entire feedback loop has been closed by the end of June 2007, and the feedback system has successfully suppressed the longitudinal dipole-mode instabilities up to 450 mA, which is a nominal operating beam current at the PF.

KEK-PFにおける進行方向バンチ結合型ビーム不安定性の抑制

1. はじめに

KEK-PFリングではマルチバンチ運転時に比較的低電流である50 mA程度から進行方向カップルドバンチ不安定現象が発生している。RF加速空洞の高次モードに起因する不安定は空洞の設計段階から注意深く避けられており、不安定の閾値は十分高いと考えられている。RF空洞以外のインピーダンス源としてはシールドされていないベローズ内壁や、ビームダクト壁面のステップ構造、真空フランジ部のギャップなども候補である。2003年に実施した直線部改造によっていくつかの進行方向不安定モードが無くなった。これはPF建設当時からあったベローズにはシールドが無かったのに対し、直線部改造でシールド付きのものに改良したことや、フランジのギャップにRFコンタクトを取り付けてビームからみて壁面のギャップをなくしたことによる効果である。一方、直線部改造後にもいくつかの不安定モードが依然として存在している。いくつかインピーダンス源の候補はあるものの未だ特定するには至っていない。

通常のユーザーランでは加速RFにシンクロトロン振動数の2倍の周波数で位相変調をかけることで進行方向不安定性を安定化する手法をとってきた[1]。この方法の利点はシステムが単純で安価に実現可能であること、調整が容易であることが挙げられる。またバンチの実効的な体積を増やすことによってビーム寿命が延びるという効果をもたらすことは大きな利点である。しかしながら、この位相変調法ではビームのエネルギー広がりも同時に大きくしてしまうため、結果としてビーム輝度が犠牲になってしまうという欠点もあった。実際にビームラインによっては位相変調のかかり具合によってビーム強度が変動してしまうという現象も観測されており、特

にディスパージョンのある場所に存在する挿入光源ビームラインBL17やBL5ではこのRF位相変調に起因する強度変動が観測されていた。このためビーム輝度を犠牲にしない進行方向の個別バンチフィードバックシステムを開発してきた。

2. フィードバックシステム

2.1 システム概略

システムの概略を図1に示す。大別すると位置検出部、信号処理部、補正部となる。位置検出にはRF信号の3倍である1.5GHz成分を同期検波している。なお、各部の詳細については参考文献[2-4]を参照して頂きたい。

進行方向キッカーはDAFNEで設計された空洞タイプをもとに設計・製作した。通常のビルボックス型空洞の横に導波管をとりつけて外部とのカップリングを大きくすることで進行方向の電場を出すTM010モードのQ値を下げて必要なバンド幅を確保している。PF用には設計を変えて2ポート入力、2ポート出力として計4ポートとした。真空へのフィードスルー部分を減らすのが大きな目的の1つである。空洞のシャントインピーダンスはピークで700、1-1.25GHz帯域にわたって500以上を確保した。空洞設計の詳細は参考文献[3]に詳しい。

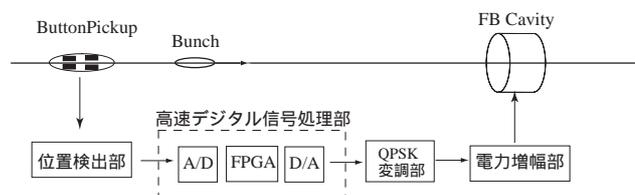


図1：フィードバックシステム概略図

¹ E-mail: takashi.obina@kek.jp

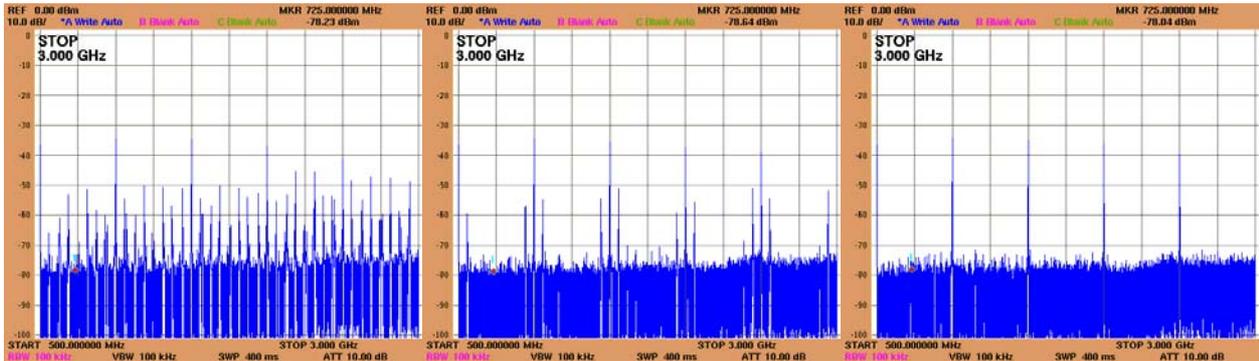


図2：ビーム電流200mAにて、フィードバックと位相変調をON/OFFした際のビームスペクトル。フィードバック、位相変調ともに無し(a)、位相変調のみ使用(b)、フィードバックのみ使用(c)の3つのケースを表示している。フィードバックシステムによって不安定が抑制できていることがわかる。測定にはボタン電極を使用した

2.2 信号処理回路

検波回路からの出力を信号処理するにはKEK, SLAC, Frascati共同で開発している信号処理システムである”General Purpose Signal Processor” (iGp)を使用した[5,6]。1GHz サンプリング8bitADC, Xilinx Vertex-II FPGA, 1GHzサンプリングDAC から構成され、横幅19インチラックサイズ、高さ4Uのシャーシ内にFPGAボードとLinux端末を内蔵するall-in-oneのモジュールになっている。PFでのフィードバック用にはADCを500MHzで動作させるが、最高周波数は約550MHz程度までは対応可能となっている。制御用ソフトウェアはEPICSへの対応がなされており、GUIによって周波数フィルターや位相シフト、ディレイ調整など各種パラメータ設定を行うことができる。

3．進行方向フィードバック結果

3.1 ビーム電流200mA以下での結果

今回構築したフィードバックシステム(FB)と、従来の位相変調法(PM)を比較するため、ボタン電極からの信号を0～3GHzの周波数範囲で測定した結果を図2に示す。測定時のビーム電流は200mAである。FB, PMともにオフの場合、図2(a)に示すようにRFのハーモニクス成分(500MHz, 1GH, 1.5GHz,...)の他に多くのスペクトルが観測されており、カップルドバンチビーム不安定性が起きていることが分かる。位相変調のみを使用した場合を図2(b)に示す。(a)に較べると多くのスペクトルは消えており、ビームの安定化されていることがわかる。しかしながら特定のモードについては依然残っており、完全に抑制することは出来ていないことが分かる。一方、フィードバックシステムを使用した場合、RFのハーモニクス以外はスペクトルに現れず、不安定抑制に成功している(図2(c))。

3.2 不安定モード解析 (Grow/Damp測定)

高速デジタル信号処理装置であるiGpはデータ解析用に8Msample分のデータを保持するSRAMも装備しており、フィードバックをON OFFすることで不安定の成長時間測定やモード解析をすることが可能である。ビーム電流200mA, リング内全てのバケットに均一電流値で入射し、フィードバックをOFFにした結果を図3(a)に示す。最初にモード-36(またはモード276)が成長していることが分かる。その後、小さいながらモード120やその他いくつかのモードが成長を始めている。また、200mAではモード-36が最大であるが、400mA付近ではモード-37が最も速く成長することも判明した。なんらかの原因(熱負荷等)でインピーダンス源の特性が変わったと推定されるが、詳細については今後も究明を続ける。

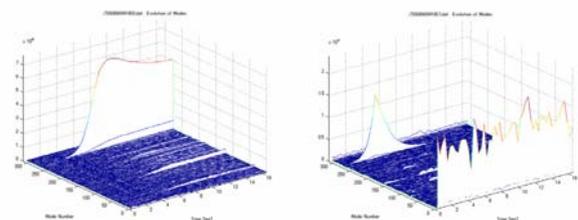


図3：FB ON->OFFした場合の不安定モード成長の様子(a)と、ON->OFF->ONとして再びビームを安定化した場合のモード解析。

iGpではフィードバックをON OFF ONとすることでフィードバックシステムの減衰時間測定の他、デジタルフィルターの周波数・位相特性とビーム不安定の周波数が合致しているかどうかを検証し、フィルターの特性を最適化することが可能である。図3(b)ではシステムの減衰時間は約1.7msであった。

3.3 ビーム電流270mA以上での振る舞い

フィードバックシステムを有効にした状態のまま

ビームを入射して蓄積電流を上昇させたところ、電流値270mA以上になるとビームが進行方向の4極振動不安定振動を起こすことが判明した。このときモード番号-36に相当するビームスペクトル(1.94271GHz = 1212 × f_{rev})部分を拡大して測定した結果を図4に示す。図の中心周波数がf_{rev}の整数倍に相当し、パンチ電流が完全に均一ではないため、小さなピークが観測されている。図4(a)ではFB, PMともにOFFの状態であり、f_s成分及び2 × f_s成分の両方が観測されている。一方、図4(b)はFBをONにした状態である。フィードバックによってビームの進行方向の重心振動は抑制出来ているが、4極振動に相当する2 × f_s成分が大きく出ていることが分かる。

この現象をより直接的に検証するため、ストリークカメラによって進行方向ビームプロファイルを測定した。結果を図5に示す。上図がビーム安定化無しの場合、下図が個別バンチフィードバックをかけた場合のバンチプロファイルである。フィードバックによってバンチの重心振動が抑制出来ていることがわかる。同時にバンチが伸び縮みしているモードが起きている。この4極振動を抑制することは今後の課題である。

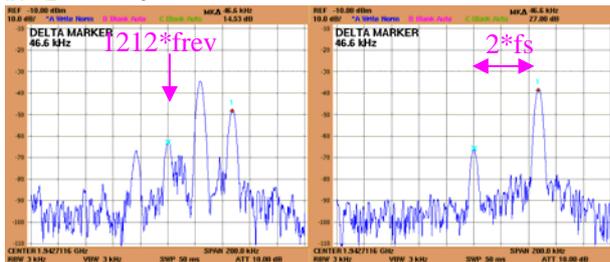


図4：モード番号-36の拡大。FB OFF状態(a)ではf_s成分が見えるのに対し、FB ON状態(b)ではf_s成分は抑制出来ていることが分かる。CF=1.9427116GHz, SPAN=200kHz。

3.3 放射光ユーザーへの効果

進行方向フィードバックが放射光ユーザーに与える効果について検証するため、従来の位相変調(PM)およびフィードバック(FB)をそれぞれON/OFFにした計4通りの運転状態を約2時間ごとに切り替え、各ビームラインにて強度や軌道安定度等を測定する実験を行った。その結果、ビームラインBL17やBL5といった、ディスパージョンが完全にゼロではない場所に設置された挿入光源からの光を利用するビームラインにおいて、それぞれ30%および50%といった非常におおきな強度上昇が観測された。また、強度変動も通常のユーザーラン時に比べて小さくなっており、フィードバックが非常に有効であることが分かった。

さらに長時間の安定性や運転への影響を検討するため、2008年2月にはフィードバックをかけたままの状態連続1週間のユーザー運転を実施した。その結果、特に問題は発生せず、安定して重心振動を抑制できた。これらの実験時には最終段のアンプ出力が1台あたり100Wであったため最大蓄積電流値

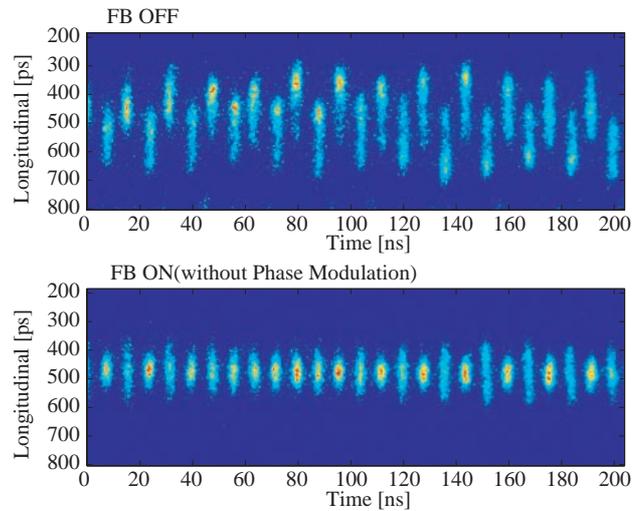


図5：FB OFF時(a)、ON時(b)のストリークカメラによるビーム進行方向プロファイル測定。FBによってバンチ重心振動が抑えられていることと、バンチが伸縮する4極振動が起きていることがわかる。

は430mAまでに制限されていた。その後アンプを500Wまで増強し、現在では450mAまで安定して不安定を抑制することに成功している。

4. まとめと今後の予定

進行方向の個別バンチフィードバックシステムの開発研究を行い、ユーザー運転で要求される450mAまでの蓄積電流に対してバンチの重心振動を抑制することに成功した。

バンチが伸縮する4極振動を抑制することが次に重要な課題と位置づけている。4極振動を抑えるには、もう1組進行方向フィードバック系を構築する方法が考えられる。キッカーについても、4極振動を抑えるにはバンチが通過する際にバンチ前方と後方で異なるキックを与えることが必要であるため2極用とはタイミングが搬送波の位相で90度異なる。新たな空洞設計を進めるのと並行して現用の空洞1台で2極・4極両方を同時に抑える解があるかどうか検討を進める。4極振動を抑制するにはより高い周波数を使用する方が効率的である。新たな空洞の設計まで視野にいれて検討を続ける予定である。並行してインピーダンス源の特定を目指す。

参考文献

- [1] S.Sakanaka, et al., Phys. Rev. ST Accel. Beams 3, 050701 (2000)
- [2] T. Obina, et al., to be published in Proc. BIW (Beam Instrumentation Workshop 2008), TUPTPF015
- [3] W. X. Cheng, et al., Proc. EPAC06 (2006) 3009
- [4] T. Obina, et al., Proc. PAC07 (2007) 233
- [5] D. Teytelman, et al., Proc. PAC07 (2007) 584
- [6] M. Tobiyama, in these proceedings