

SuperKEKB ダンピングリング用バンチフィードバックシステムの建設

CONSTRUCTION OF BUNCH FEEDBACK SYSTEMS FOR SUPERKEKB DAMPING RING

飛山真理[#],

Makoto Tobiyama [#],

KEK Accelerator Laboratory and SOKENDAI, 1-1 Oho, Tsukuba 305-0810, Japan

Abstract

The position damping ring (DR) for SuperKEKB LER will start its commissioning by the end of 2017 before the Phase-II operation of the SuperKEKB. Though the expected growth rate of the transverse coupled-bunch instability is much slower than the radiation damping time due to long bunch separation, low bunch charge and few bunch configuration, the transverse bunch-by-bunch feedback system has been constructed using current digital technology to damp the injection and extraction kicker related oscillation. The design performance of the bunch feedback systems and the related system such as the bunch current monitor, betatron tune monitor are shown.

1. はじめに

SuperKEKB 陽電子リング(LER)は Phase 2 実験開始後は衝突点でのベータatron関数が大幅に絞られることにより衝突点領域での非線形効果が増大し力学口径が大幅に減少する。十分な入射効率を確保し、また検出器への入射ノイズを低減するためには低エミッタンス陽電子ビームが必要となる。線形加速器陽電子標的で生成された大エミッタンスビームを冷却し、必要な低エミッタンス入射ビームを生成する、陽電子ダンピングリング(DR)の建設が進んでおり、2017 年中に運転開始予定である。DR には、陽電子標的後 1.1 GeV まで加速された 1 パルス最大 2 バンチ(98 ns 間隔)の陽電子ビームが入射され、40 ms 以上の周回後、水平鉛直エミッタンスが減衰したビームを再び線形加速器に戻し 4 GeV まで加速し、LER に入射する。

DR の蓄積ビームは、最大でも 4 バンチ、バンチ間隔も 96 ns 以上なので、真空容器のインピーダンスが十分に管理されている DR で危険な横方向バンチ結合不安定性が起きる心配は大きくない。しかしながら、入射機器のパルスの漏れによって不要なキックを受け、大きな振動が誘起される可能性があることから、横方向個別バンチフィードバックシステムを DR でも導入することとなった。個別バンチフィードバックシステムを使えば、バンチ振動を減衰するだけでなく、横方向 beam transfer function や、定常的なベータatron振動を誘起してビーム光学を測定することが容易になるため、通常の運転のみならず、ビームコミッショニング時に大きな貢献をされると考えられる。

本論文では、DR に設置した横方向個別バンチフィードバックシステムの設計、構成、また動作に必要な基準信号の伝送システム、また運転前に行うタイミングなどの調整、コミッショニング手順について紹介する。また、個別バンチフィードバックシステムの応用として設置した、ベータatronチューン測定装置、バンチ電流モニター装置についても紹介する。Table 1 に SuperKEKB ダンピン

グリングの主要パラメータを示す。

Table 1: Main Parameters of SuperKEKB Damping Ring

		unit
Energy	1.1	GeV
Maximum bunch charge	8	nc
No. of bunch trains/bunches per train	2/2	
Bunch spacing	>96.3	ns
Circumference	135.5	m
Maximum stored current	70.8	mA
Horizontal rad. damping time	10.9	ms
Beam emittance(injection)	1700	nm
Equilibrium emittance(h/v)	41.4/2.07	nm
Maximum x-y coupling	5	%
Energy band width of inj. beam	±1.5	%
Energy spread	0.055	%
Natural Bunch length	6.53	mm
Momentum compaction factor	0.0141	
RF voltage	1.4	MV
Bucket height	1.5	%
RF frequency	508.89	MHz
Harmonic number	230	
Revolution frequency	2.213	MHz

2. 個別バンチフィードバックシステム

Figure 1 に DR 用横方向個別バンチフィードバックシステムのブロック図を示す。多くの要素は SuperKEKB

[#] makoto.tobiyama@kek.jp

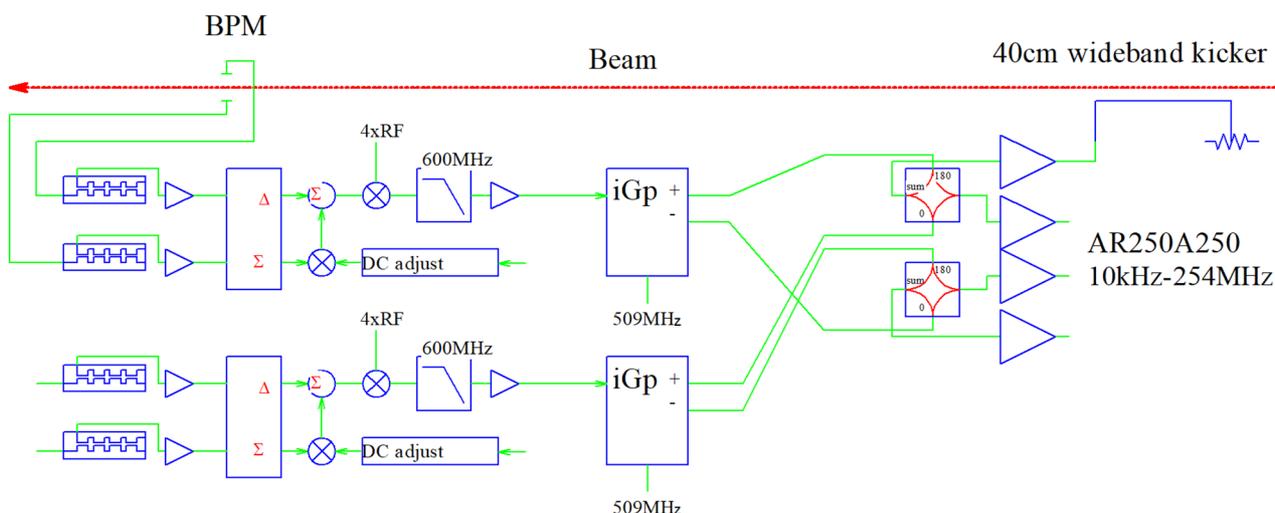


Figure 1: Block diagram of bunch-by-bunch feedback system for SuperKEKB damping ring.

主リング(LER, HER)フィードバックシステムで開発された技術をもとに構築され[1], 主にコストと開発期間を短縮するため主リング機器の再利用を積極的に行っているが、真空機器などに関しては、新規開発したものである。すべてのフィードバック真空機器は、DR 入射点(北側直線部)直前の直線区間に設置した。

つきは標準偏差で 9 mm であった。Figure 3 にフィードバックモニターチェンバーの写真を示す。

2.1 ビーム位置検出電極とモニターチェンバー

位置検出電極は、SuperKEKB フィードバックシステム用に開発した $\epsilon_r=4$ のガラスを真空シールとして用いたもの[2]を採用した。ボタン径 6 mm で、金メッキされた SMA-R 型の RF コネクタを有する。モニターチェンバーはフランジ間 220 mm で、Fig. 2 のような八角形型内径を有し、30 mm 間隔に上下左右に 16 個、斜めに 4 個、計 20 個の電極を取り付けた。斜め電極は、ベータatron チューン測定など特殊用途用である。このモニターチェンバーの最低次カットオフ周波数は 3.7 GHz である。

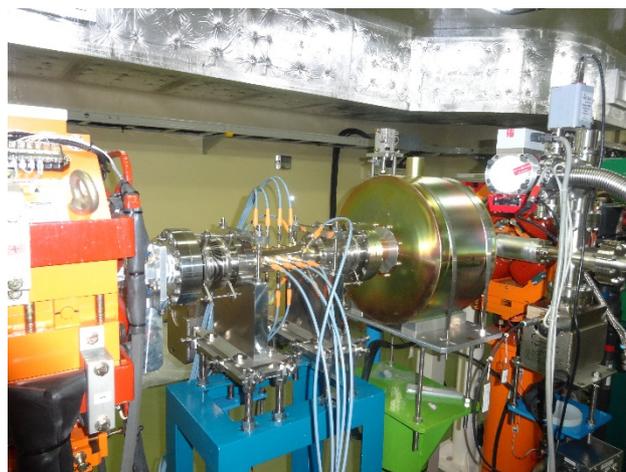


Figure 3: Photo of FB monitor chamber.

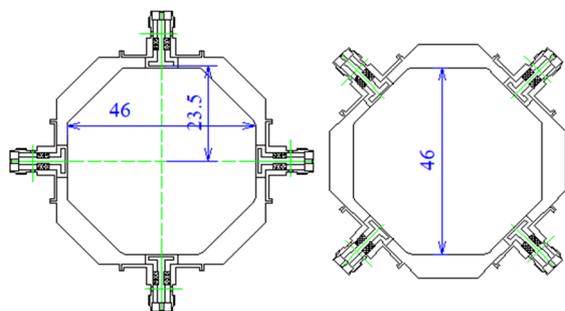


Figure 2: Cross sectional views of the feedback monitor chamber. Totally 20 electrodes are welded to the chamber.

ボタン電極全体でのインピーダンス整合を改善するため、SMA-R コネクタと通常の SMA コネクタとの接続を行うため、片側 SMA-R, 反対側 SMA-J の 3dB 減衰器(ノンハロゲンタイプ)を各電極に取り付けている。電極信号はその後中継ケーブル、8D 高発泡ケーブルを通して地上部フィードバックステーションまで伝送する。特に厳密な等長敷設、あるいは等長加工の管理はしなかったが、TDR で測定したケーブル長は平均 37.2 m、20 本のばら

2.2 バンチ位置検出回路

バンチ位置検出回路も、SuperKEKB 主リングバンチフィードバックシステムで開発されたものと全く同一の回路を採用した。ボタン電極からの信号を RF 信号の 4 通倍である 2 GHz を中心周波数とする 3 tap ストリップライン結合型バンドパスフィルタを通して全幅 2 ns 以内のバースト信号にする。上下あるいは左右に対向する電極信号を 180° Hybrid 回路を通して差信号と和信号に分離する。なお、対向電極間信号のタイミングのずれは、検出回路に内蔵するストローク 100 mm 可変長同軸管を使って微調する。和信号をダブルバランスドミキサー(DBM)を使って正負を含めた振幅を変えた信号を同一タイミングで差信号と合成することで、バンチ電流に依存しない DC オフセット除去回路を構成する。なお、このオフセット基準レベルは、一旦 COD が定まった後はそれほどは変化しないと考えられるので、手動あるいは遅い DAC 経由の DC 信号で制御する。

差信号を RF 信号を 4 通倍した信号でダウンコンバータし、800 MHz Bessel 型低域濾波器を使い DC に近い成

分のみ取り出し、帯域 DC-1 GHz の DC アンプで増幅し、後段のフィードバックデジタルフィルターに供給する。

この検出回路は信号の差信号を用いるためタイミングの誤差にきわめて敏感であるので、製造時にはステップリカバリーダイオード(SRD)を使った 127 MHz パルサーからの信号を使い和信号と差信号の合成タイミングを合わせる調整を行っている。また、実際の対向電極からの信号のずれ(主に途中のケーブル長の差)は、実際の周回ビームを使って合わせるのが一番確実であり、検出回路も運転中に引き出して内部可変長同軸管を調整できる構造にしてあるが、ケーブル長だけについては、同じく SRD の信号をフィードスルー出力に接続し、回路各点の信号を広帯域オシロスコープで観測することで運転前に調整した。電極経路によっては、内蔵可変長同軸管の範囲に入らないものもあったが、これについては検出回路入り口に短い同軸ケーブルを追加することで可変範囲に入れた。この追加ケーブルが必要な箇所は TDR 測定結果から予測された通りであった。

2.3 フィードバックデジタルフィルター

フィードバック用デジタルフィルターとして、KEKB 用に開発し、KEKB 運転後期に実用試験された iGp[3] デジタルフィルターを、DR 用に FPGA ファームウェアを改造したものを用いる。iGp は MAX108 8bit ADC、Virtex2 FPGA、MAX5889 12bit DAC からなるデジタルフィルターで、日米協力事業のもと SLAC と共同で開発した第 1 世代の汎用フィードバックデジタルフィルターである。

KEKB 加速器用構成では、Virtex2 FPGA のスイッチング能力の限界近くで、ハーモニック数が多いため多くの DSP スライス、FIFO を使うため、タイミングマージンがほとんど確保出来ず、iGp 内での ADC タイミング、DAC タイミングの可変機能を使用することは出来なかったが、DR 用のファームウェアではハーモニック数が大幅に減少した結果、Fig.4 の濃紺の領域(RMS ジッタが十分低い領域)が示すように ADC、DAC とも iGp だけで十分な可変範囲を実現出来ている。

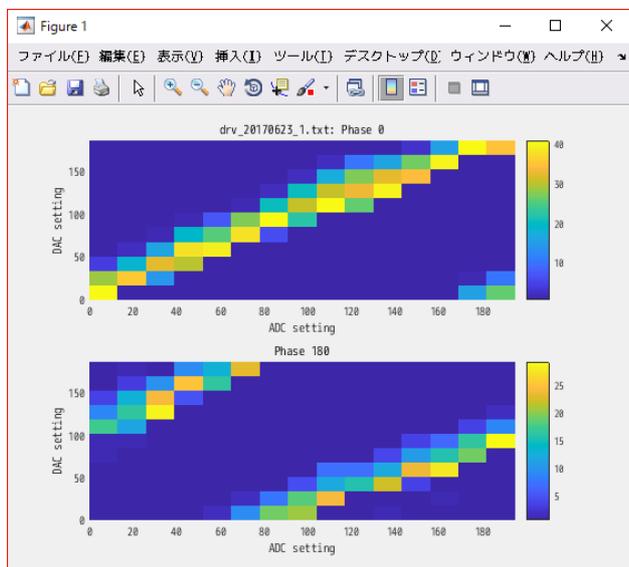


Figure 4: Stable region of iGp ADC and DAC.

現有の iGp はハードウェアとしては製造してから既に 10 年以上たっており、電源、制御系(組み込みプロセッサ)ともに既に製造中止になった物が多く、予備機を保有していても長期安定使用には大きな不安がある。また、SuperKEKB で使用している第 2 世代の汎用デジタルフィルターである iGp12[4]と比べ、フィードバック応用の機能、特に PLL を使って特定バンチのベータatron 振動を一定振幅で連続で励振する機能などを組み込む余地がない。このため、主リング iGp12 の予備体制が確保され次第、主リングで使用している iGp12 を DR に移行することも計画している。これが実現すれば、まずは ADC の分解能が 8 ビットから 12 ビットに増大することによりダイナミックレンジが増大し、フィードバック位置検出回路のオフセット管理が大幅に緩和されフィードバックシステム運転が容易になるとともに、iGp で起きている、外来ノイズによる通信不良などの不具合発生も大幅に抑制できると期待している。

iGp は出力としてプラス側とマイナス側の complementary 出力を有している。本フィードバックシステムで使用する横方向キッカーは、45° 配向型なので、iGp の正負出力を使い、1 段の 180° Hybrid を使いそれぞれの電極に必要な出力を作る。フィードバックするバンチとの時間同期は、iGp の RF 周期(2 ns)ステップのディレイ(主に 1 周遅れを合わせる delay)と、DAC へのクロック delay を調整することで合わせる。運転開始後、横方向キッカー出力を広帯域オシロスコープで観察し、ビームが誘起する信号とフィードバック信号のタイミングを合わせることで実現する。

2.4 横方向フィードバックキッカーと高出力増幅器

横方向キッカーは、長さ 40 cm の 4 本の電極が 45° 配向しているストリップラインキッカーを用いる。DR は真空チャンバーの物理アパーチャーが狭いため、SuperKEKB で用いているような、通常のチャンバー面から電極を突き出すような形のキッカーの採用は困難である。このため、キッカー電極が通常のチャンバー面に位置するように設計し、チャンバー外壁をその分外に後退させるように設計とした。Figure 5 にキッカー内部写真を示す。チャンバー及び電極はステンレス鋼で出来ているが、その上に 10 μm 厚以上の銅メッキをかけている。

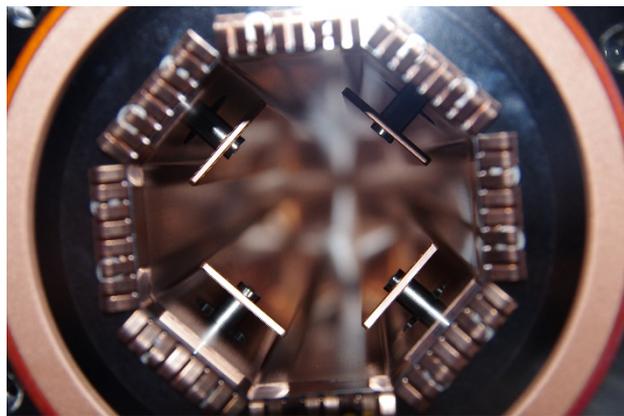


Figure 5: Picture of transverse stripline kicker.

チェンバー内径の変換はキッカーより外で緩やかなテーパを使っておこなう。GdfidL[5]を使って計算した、バンチ長 5 mm に対する進行方向ロスファクターは、テーパ込みで 0.58 mV/pC となった。Figure 6 に横方向キッカーの GdfidL モデル図を、Fig. 7 に上流側ポート出力例を示す。

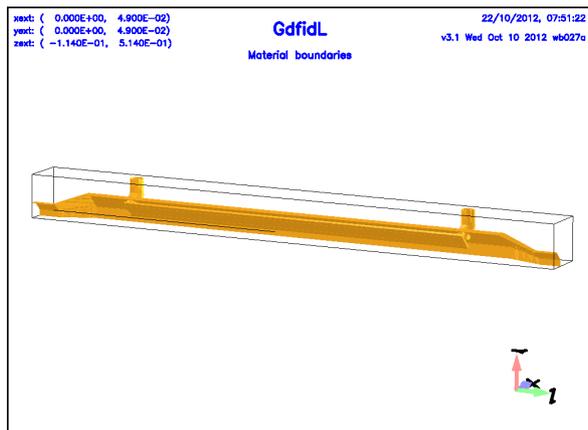


Figure 6: GdfidL model for transverse kicker.

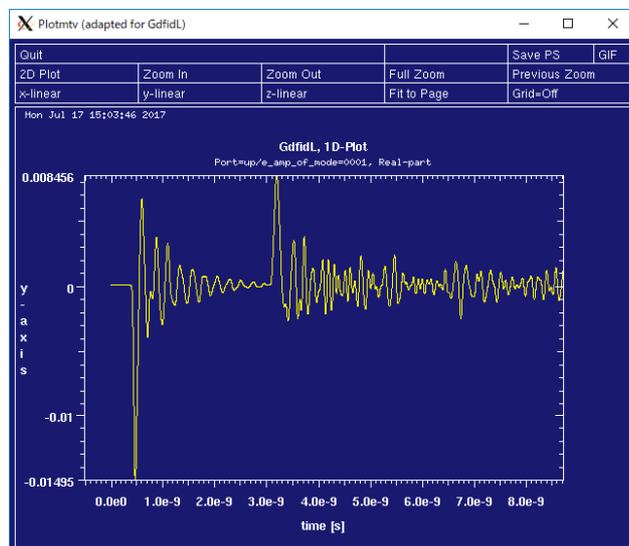


Figure 7: Example of beam output from upstream port.

フィードスルーは N-R(J タイプの中心導体をピンにした物)を採用した。バンチ数もバンチ電流も少ないことから通過ビームパワーも大きくなく、フィードスルーのセラミックス部の強制冷却はしていないが、測温抵抗体を使った温度測定は行う予定である。入力側(ビーム下流側)はすぐ横に入射ラインが迫っている関係で L 型の NR-NJ 変換コネクタ(絶縁体にポリエチレンを使用)を、出力側はストレートの NR-NJ 変換を使い 10D 高発泡ケーブルに接続し、キッカー架台下に設置した最大パワー 500 W の広帯域減衰器(WA-500)に接続する。この出力は 8D 高発泡ケーブルを使い地上のフィードバックステーションまで伝送し、タイミング観測及びキッカーの健全性検証に用いる。広帯域減衰器及びその直前の 10D ケーブルは、減衰器故障に伴う焼損事故の拡大を防止するため温度監視を行う。

フィードバック信号を増幅するための広帯域増幅器は、KEKB 加速器で横方向フィードバック用増幅器として用いていた AR250A250 広帯域増幅器を 4 台用いる。この増幅器は帯域 10 kHz~250 MHz で最大飽和出力 200 W 以上の出力が可能である。リモートインターフェースとしては、同じく KEKB 加速器で用いていた VME バス用のインターフェースカード(Digitex 18K46)を流用する。このカードを用いて、増幅器の進行波及び反射波、アラーム状態を監視し、例えば反射波が増大した際には、キッカーあるいは広帯域減衰器に異常が発生した可能性があるため、ビーム運転停止要求を出す予定である。

4 つの広帯域大出力増幅器の内部遅延は個別に異なり、かつ広帯域増幅器からキッカーまでのケーブル長も管理していないため、広帯域増幅器の入力前にストローク長 40 cm の可変長同軸管を入れ、タイイング合わせが出来るようにしている。iGp 出力の水平あるいは鉛直側の出力部から、標準信号発生器からの 1 MHz あるいは 100 MHz 信号を送り、キッカー入力部それぞれに減衰器をつなぎ、4 本の等長ケーブルで接続した広帯域オシロスコープで信号波形を観測する。はじめに 1 MHz 信号でゼロクロス点が一致するよう粗く可変長同軸管を調整、その後、周波数を 100 MHz まで上げ精密調整を行った。同時に、4 台の増幅器内蔵のゲイン調整つまみも合わせ、ほぼ同じ出力が出るようにした。

使用予定の広帯域増幅器は、パルスの立ち上がり特性は問題ないが、立ち下がり特性は理想的ではなく、立ち上がりパルス幅などは独立の周波数の長いリングングが出る事が知られている。DR で使用する際は、後続バンチまでの間隔は最短でも 96 ns 以上あるし、たとえ近くにバンチがあってもフィードバックループを閉じている限りリングングの影響は抑制されるので、大きな問題ではないが、必要であれば iGp デジタルフィルターの出力フィルター機能を用いてリングングを抑制することも可能である。

3. フィードバック関連モニター

3.1 バンチ電流モニター

DR 内バンチ配置は、すべて入射器側タイミングシステムにより決定され、また on axis 入射なので通常運転時は DR 側でフィルパターンやバンチ電流を制御することはない。しかし、DR 単独運転時、特に RF タイミングを主リングと切り離して行う分散関数測定、あるいは色収差測定では、入射器側タイミング系からは DR 内バンチ位置がわからなくなってしまうため、DR 用のバンチ電流モニターを使ってバンチ電流、バンチ位置を測定することが必要となる。

DR 用のバンチ電流モニターは SuperKEKB 主リングで使用しているものと全く同じ VME ボード(Digitex 18K10)を、内部 FW を切り替えてハーモニック数 230 用として用いる。バンチ電流検出ディテクタも、主リングと同様の回路を用いる。

主リングでは、バンチ電流平滑化のため、入射繰り返し毎にバンチ電流情報をシェアードメモリーを用いてバケットセレクションシステムに送っている。DR では、その必要がないためシェアードメモリーシステムは使用していない。最大繰り返しは主リングと同じく 50 Hz である。

DR は主リングと異なり、場合によっては非常に早いサイクル(50 Hz)で入射バケツが入れ変わることがある。制御に用いている EPICS システムと MVME5500 下の Vx-Works を使った VME バスシステムでは、50 Hz で安定的にデータ転送、データ表示を実現するのはきわめて困難であるが、ある程度のデータ抜けを許容するなら、表示ソフト側で ca モニター機能を使うことで、ある程度のリアルタイム表示は可能である。Figure 8 に、Delphi を使って作成したバッチ電流表示例を示す。ここで、入力としては Revolution 信号を用いている。

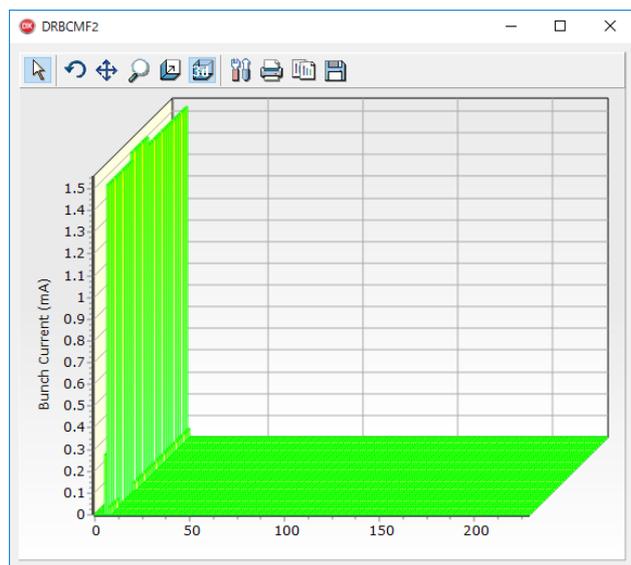


Figure 8: Example of bunch current view with trigger rate of 25 Hz. The input was revolution signal with width of 2 ns.

3.2 ベータトロンチューンモニター

ベータトロンチューンを測定する方法として、主リングで使用しているのと同じく、スペクトラムアナライザのトラックングジェネレータ出力をダウンコンバートしてビームを励振し、電極出力を直接スペクトラムアナライザで観測するシステムを設置した。Figure 9 にブロック図を示す。

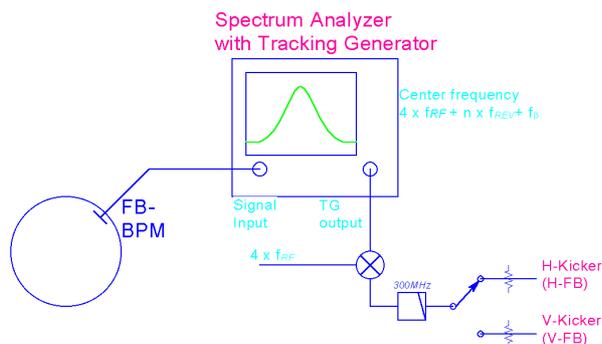


Figure 9: Block diagram of betatron tune meter.

水平、鉛直の信号を切り替えなしに観測するため、スペクトラムアナライザ入力には、 45° 電極を用いる。ベースバンドにダウンコンバートされた励振出力は、水平、鉛直の iGp 出力のプラス側に 6dB 合成器を入れ、フィード

バック信号と合成する。マイナス側にはパワーバランスをとるため 6dB 減衰器を入れる。結果として、励振信号はプラス側電極にしかかけられず、キッカーの差動動作はしないが、周長が短いリングで、かつエネルギーも主リングに比べて低いため、励振に問題はないと考える。

デジタルフィルターとして iGp12 を使用出来るようになると、iGp12 の PLL を使った励振機能を使用出来るようになるため、マシンスタディなどで入射バッチが固定している場合には iGp12 を使った励振、及び PLL 周波数直読による高精度チューン測定が可能となる予定である。

4. まとめ

SuperKEKB ダンピングリング用に個別バッチフィードバックシステムを建設し、ビーム周回前に出来るタイミングなどの調整を行った。各種機器の健全性も確認した。また、バッチフィードバックシステム関連システム(バッチ電流モニター、ベータトロンチューン測定システム)も建設し、ビームなしでの動作確認を行った。

2017 年 12 月から開始されるコミッショニングでは、比較的早期にフィードバックシステムタイミング合わせ、フィードバックシステム調整を行い、早期の性能実現に寄与したいと思っている。

謝辞

ダンピングリングフィードバックシステムの開発及び建設においては、KEKB モニターグループ及び真空グループの皆様が多大な協力をいただきました。感謝します。

本研究は日米科学技術協力事業(高エネルギー物理学分野)「SuperKEKB と高ルミノシティコライダーのための開発研究」から一部助成を受けています。

参考文献

- [1] M. Tobiyama, J. Flanagan and A. Drago, "Bunch by Bunch Feedback Systems for SuperKEKB Rings", in proceedings of the 13th Annual Meeting of PASJ, 2016, Chiba, Japan, TUOM06.
- [2] M. Tobiyama and J. Flanagan, "Development of Button Electrode with Improved Time Response", in proceedings of BIW08, 2008, Tahoe City, CA, TUPTPF042.
- [3] R. Takai *et al.*, "Bunch by Bunch Feedback System using iGp at KEK-PF", in proceedings of DIAPC09, 2009, Basel, Switzerland, MOPD08.
- [4] DimTel Inc.; <http://www.dimtel.com>
- [5] GdfidL; <http://www.gdfid.de/>