

Multi-bunch feedback using IPBPM (FEATHER3)

Y.Inoue, Y.Honda, H.Shimizu

2008/2/8

概要

Signal decaying time of the low-Q type IPBPM is short enough to separately detect each bunch of a multi-bunch beam with ~ 150 nsec spacing. This enables us to build a simple feedback system to stabilize the second bunch using the adjustable-gap strip-line kicker. Output of the single stage homodyne processor of the IPBPM, which should be proportional to the beam position and charge, was applied to the kicker electrode after proper delay time and an amplifier. Adjusting the loop gain by beam charge, we have demonstrated to reduce given position variation of the incoming beam by 1/10 at the BPM.

1 はじめに

LowQ type IPBPMは ~ 150 nsec間隔のマルチバンチの信号を十分に分離して測定することが出来る。この信号を利用して後続のバンチにキックを与えることで軌道安定化を行う。

今回は最初の試みとして 154nsec 間隔の 2バンチビームの場合を考え、単に、1バンチ目の BPM で測定した信号に比例した電圧で 2バンチ目をキッカーで蹴るという方式で行う。補正を与えた結果、入射軌道に依らず、2バンチ目は必ず決まった位置 (BPM のゼロ点) を通るように出来ることを示すことを目標とする。

2 セットアップ

2.1 レイアウト

取り出しライン下流部分のレイアウトを図1に示す。実験時このセクションの4極マグネットは全てオフにしたので基本的にドリフトスペースである。図2に示す可変ギャップストリップラインキッカー及び LowQ type IPBPMを使用した。

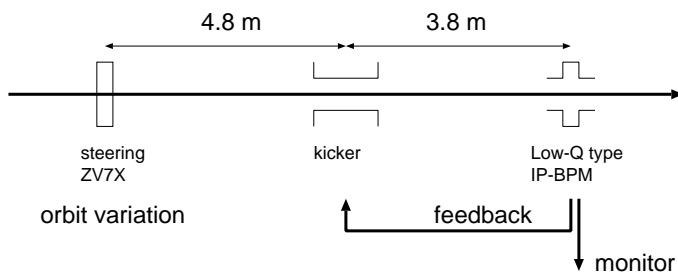


図 1: ビームラインのレイアウト

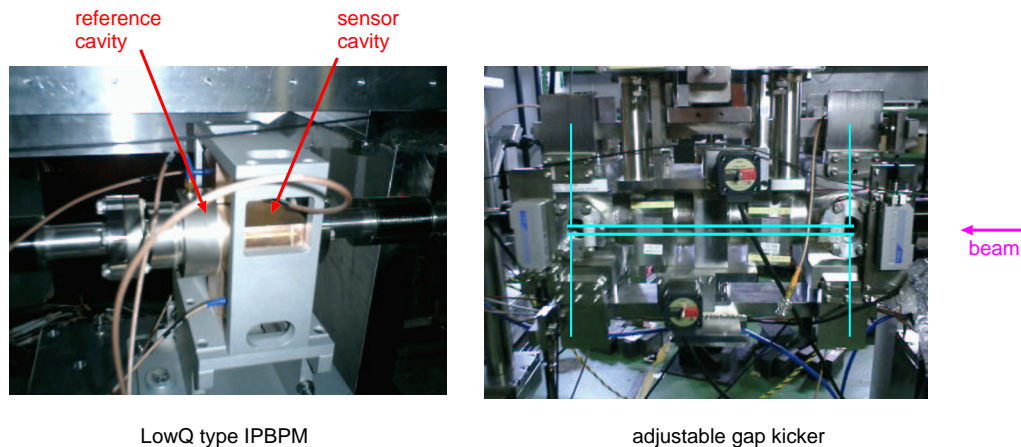


図 2: キッカーと BPM

2.2 BPM の処理回路

次のバンチが来る前に信号を生成しなければならないので、BPM の処理回路は全てトンネル内に置く必要がある。レファレンス空洞の信号を L.O. として用いると位相調整やビーム強度が変わった時の振幅調整等が行いにくいので、DRRF の基準信号 (714MHz) から作ったビーム同期 L.O. を使用してダウンコンバータを動かすことにした。直接ビーム位置 (と電荷) に比例した信号を生成する為に、図 4 内に示されているようなシングルステージホモダイン検出のスキームを構成した。L.O. の位相は DRRF からの 714MHz を送る段階に位相シフタを入れて、BPM 信号の波形を見ながら調整した。遠隔操作で感度をスイッチ出来るように初段アンプの前に可変アッテネータを入れたが、10dB 刻みでしか設定出来ないで今回の実験ではこれは 10dB に固定し、感度を微調整する必要がある場合はビーム電荷を変えることによって行うことにする。

ビーム電荷はレファレンス空洞の信号を検波してモニターする。

2.3 キッカー用アンプ

mini-circuit 製のハイパワーアンプ (型番 LZY-1, 図 3) を用いて上記 BPM から生成した信号を増幅し、キッカーに入力する。カタログによると、このアンプは帯域が 20-512MHz、ゲイン 39dB、最大出力+44dBm である。LowQ-IPBPM の信号の帯域はもう少し低いところまであるので、やや波形は崩れてしまうことになるが、次のバンチのビームが通過する一瞬でなんらかの位置に比例した電圧があればよいと考えれば問題にはならないはずである。例として 200nsec 幅の矩形パルスを入力したときの出力を図に示した。

図 4 内に示されているように、キッカーの一方の電極の下流側端子から入力し、上流側端子からの透過をオシロスコープでモニターすることにする。もう片方の電極は使用せず、両端子とも終端してある。

2.4 フィードバックシステム

図 4 にフィードバックシステムの全体構成を示す。レファレンス空洞によるビーム電荷の信号、BPM 処理回路の出力、キッカー透過信号、の 3 つをトンネルの外に取り出し、オシロスコープで観測する。BPM からキッカーアンプへの経路に遠隔操作できるスイッチを設け、フィードバック OFF と ON の状態を切替えて実験出来るようにしてある。

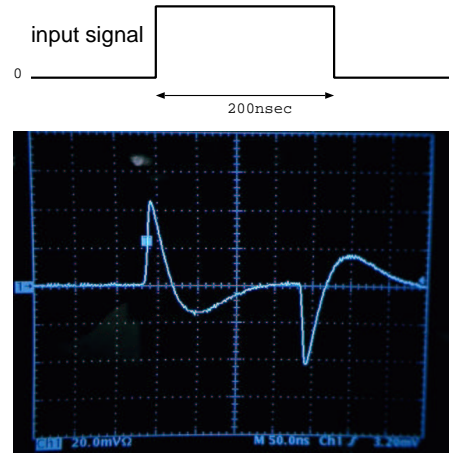
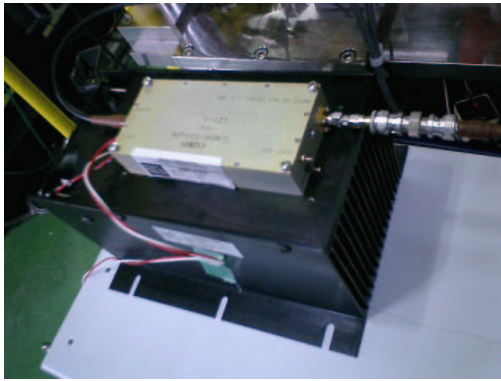


図 3: キッカー用アンプとその特性

今回は 2 バンチでのテストなのでフィードバック量のメモリーに相当する delay loop は無しにした。

3 測定

3.1 キッカーパルスのタイミング調整

BPM の出力からアンプした信号をキッカーに送る際、丁度次のバンチがキッカーを通過するタイミングに合っていないなければならない。キッカー透過信号を観測することによってタイミングを確認することが出来る。ビームがキッカーを通過する際にストリップライン BPM の原理でキッカー電極からビームピックアップ信号が出力される。オシロスコープで観測するキッカー透過信号で、キッカーアンプからの信号のピークにビームピックアップ信号が重なるようにケーブルの長さを微調整した(図 5)。

3.2 キッカーのギャップの調整

最近の典型的なビーム状態では、取り出しラインのビームは $10\mu\text{m}$ 程度のジッターあるいはドリフトを持っているので、フィードバックの効果を有意に観測するにはこれより十分大きい量の変動を加える必要がある。つまり、BPM の位置で $100\mu\text{m}$ 程度になる蹴り角をキッカーで作る必要がある。手持ちのアンプで出せる電圧がせいぜい 60V 程度しかないので、キッカーのギャップを出来るだけ狭めることで蹴り角を稼がなければならない。

はじめに、取り出しラインをせいぜい調整 (orbit, dispersion correction) した後、LowQ-IPBPM の信号を見ながら軌道を微調整し BPM の中心付近を通るようにした。こうして初期調整されたビーム軌道に対して図 6 に説明する手順でキッカー電極の調整を行った。LowQ-IPBPM に付属のレファレンス空洞の信号を見てビーム通過を確認しながら、まず電極 1 を少しづつビームに近づけて行き、電極がビームを遮りはじめる点を決定した。次に電極 1 は一旦ビームから遠ざけておいたうえで電極 2 について同じことを行いビームを遮りはじめる点を決定した。こうして決めた点から 0.25mm の距離に各電極をセットすることで、 0.5mm ギャップ (理想的な場合) に調整したつもりである。

運転終了後に望遠鏡でビューポートから中の電極を覗いて電極のアライメントを確認した所、両電極とも 0.2mm 傾いていることが判明し、実際は図 6(A) のような具合 (実効的に 0.6mm ギャップ) になっていたものと思われる。

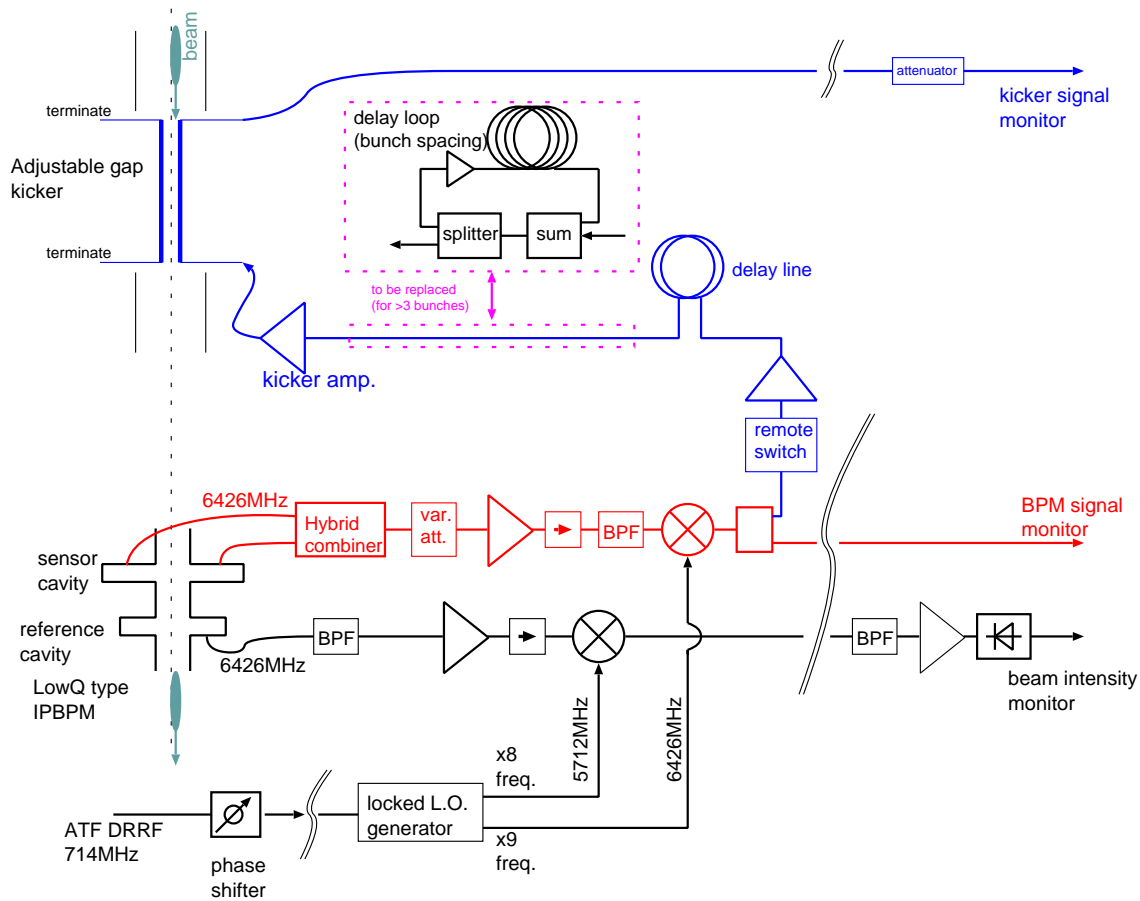


図 4: フィードバックシステムの構成

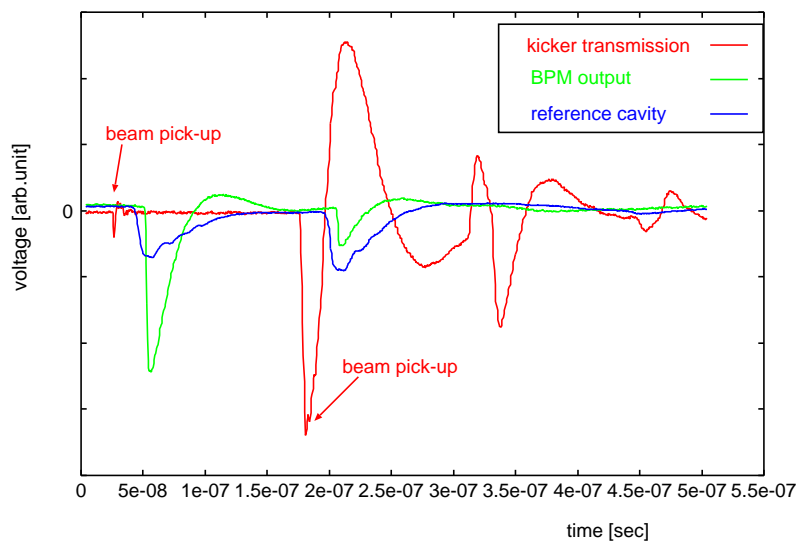


図 5: 観測する波形の例

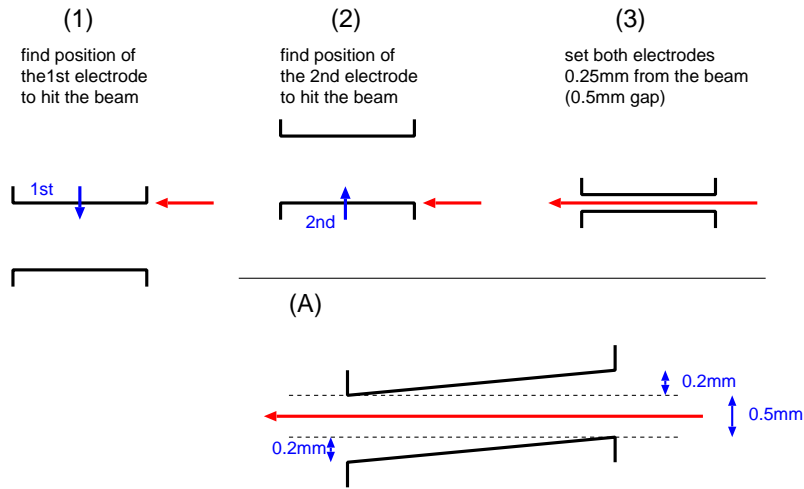


図 6: キッカー電極ギャップの調整

3.3 各バンチの軌道の一致について

フィードバック OFF の状態で各バンチが同じ軌道を通っていることがフィードバック方式が正しく動作するための前提である。以前の経験から、154nsec 間隔、3バンチの場合は、取り出しキッカーのタイミングをどう調整しても各バンチで $200\mu\text{m}$ くらいの軌道のずれが出てしまうことが分かっている。これは取り出しキッカーのフラットトップの長さが足りないせいと考えられる。今回の実験は2バンチに限って考えているので、原理的にはうまく2つの軌道が一致する解があるはずである。測定を始める前に取り出しキッカーのタイミングを微調整しておいた。(ただし、時間とともに少し状態が崩れていったようである。)

3.4 測定手順

上流の steering magnet ZV7X を用いて入射ビーム軌道を変化させてみて、フィードバック ON、OFF の場合での1バンチ目、2バンチ目の BPM 信号を観測する。ビームジッターが $20\mu\text{m}$ 程度あり、1ショットのデータではばらつきが大きく、比較出来なかった為、オシロスコープは16データのアベレージモードで動作させ、波形を記録した。

フィードバックのゲインを変えたセットでこの測定を繰り返し、2バンチ目で丁度補正が完全になる条件を探す。BPM の感度はビーム電荷に比例することから、ビーム電荷を RF ガンのレーザーパワーによって調整することでフィードバックゲインを調整することにした。表1にまとめたように RF ガンのレーザーパワーを変えた5セットの RUN を行った。ビーム電荷(フィードバックゲイン)はレファレンス空洞の信号の電圧から相対的に知ることができる。

4 結果

各 RUN について、steering magnet ZV7X を変化させて行ったときの BPM 信号の波形データを以下に示す。

steering magnet の蹴り角については以前に wire-scanner と照らし合わせて確認をとっており、 $334\mu\text{m}/\text{A}$ と分かっている。図1に示した位置関係によると、例えば ZV7X を 0.01A 刻みで変化させると、BPM の地点におけるビーム位置は $28.7\mu\text{m}$ 刻みで動くことになる。

表 1: 各 RUN のビーム強度

RUN	RFgun laser power (%)	reference cavity (mV)
1	2	4
2	6	30
3	10	65
4	15	75
5	30	100

図 7,8 は RUN1 のフィードバック OFF 及び ON のときのデータである。115 μm 刻みで入射軌道を振っている。FB OFF の場合 2 つのバンチは同じ動きをしているのに対し、FB ON の場合は 2 バンチ目は少し補正されて動きが減少しているのが分かる。

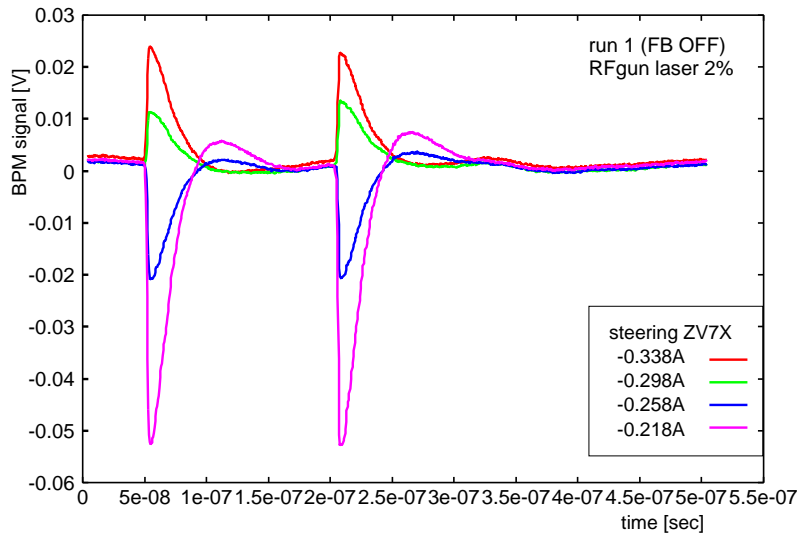


図 7: RUN1 (FB OFF)

図 9,10 は RUN2 のフィードバック OFF 及び ON のときのデータである。115 μm 刻みで入射軌道を振っている。RUN1 よりも補正量が大きくなっているが、まだ足りない。

図 11,12 は RUN3 のフィードバック OFF 及び ON のときのデータである。29 μm 刻みで入射軌道を振っている。全体で 115 μm 程度入射軌道を変化させたが、2 バンチ目の変動は 10 μm 程度におさまっており、フィードバックによる 1 桁程度の安定化がなされている。取り出しキッカーの状態がドリフトしたのか、FB OFF の場合でも少し 1 バンチ目と 2 バンチ目の位置に違いがみられ、そのせいでフィードバックされた先が BPM のゼロ点から少しずれた結果になっていると思われる。

図 13,14 は RUN4 のフィードバック OFF 及び ON のときのデータである。29 μm 刻みで入射軌道を振っている。RUN3 よりもさらにフィードバックゲインが上がった為、補正量が少し過多になってきている。

図 15,16 は RUN5 のフィードバック OFF 及び ON のときのデータである。29 μm 刻みで入射軌道を振っている。さらにフィードバックゲインが上がってしまい、逆方向まで行きすぎて補正した例がある。

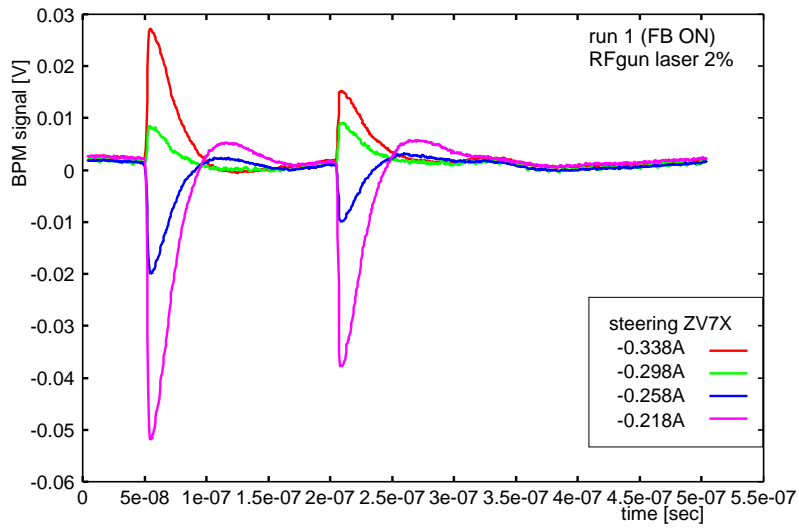


图 8: RUN1 (FB ON)

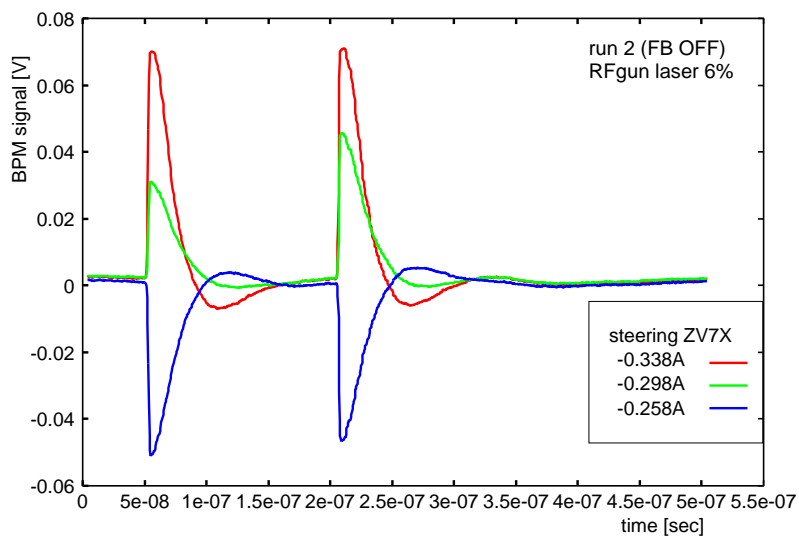


图 9: RUN2 (FB OFF)

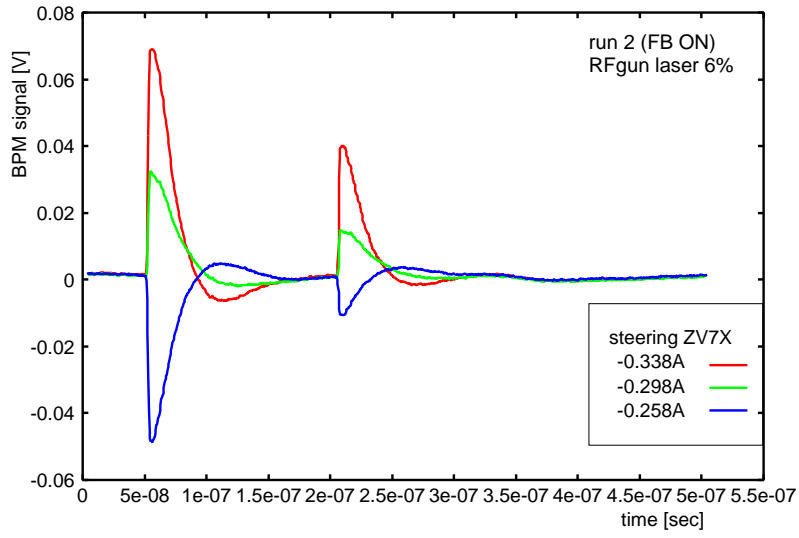


图 10: RUN2 (FB ON)

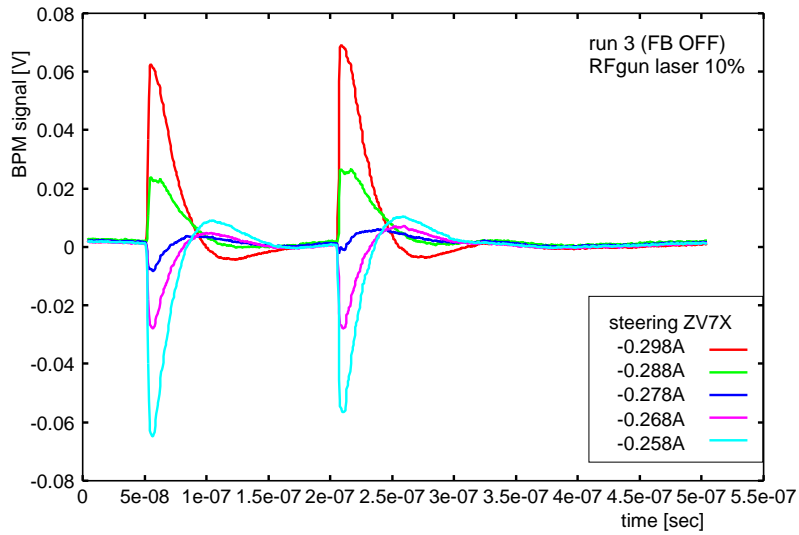


图 11: RUN3 (FB OFF)

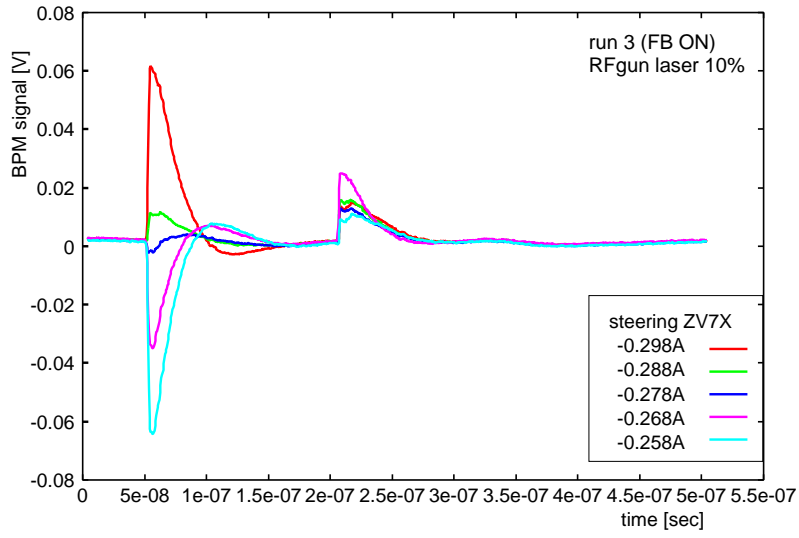


图 12: RUN3 (FB ON)

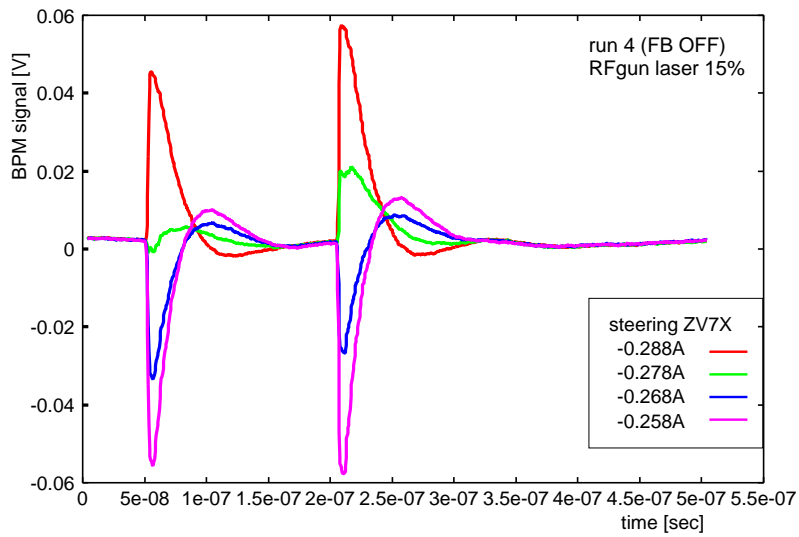


图 13: RUN4 (FB OFF)

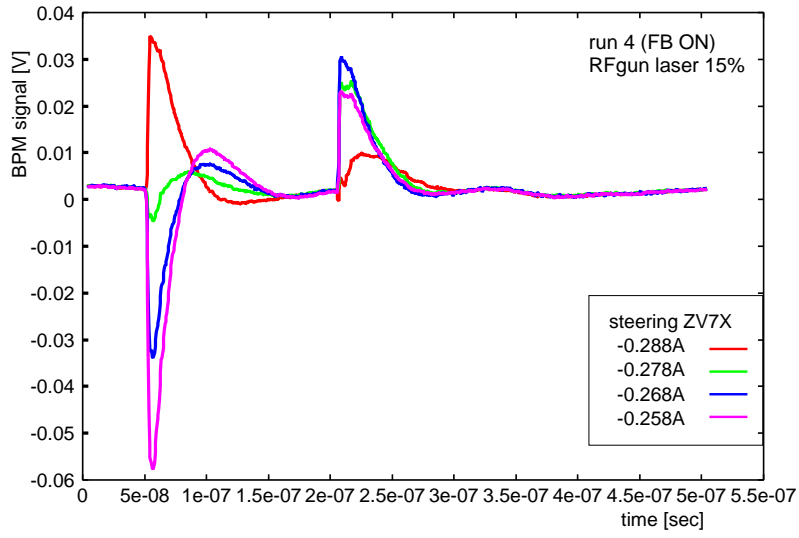


图 14: RUN4 (FB ON)

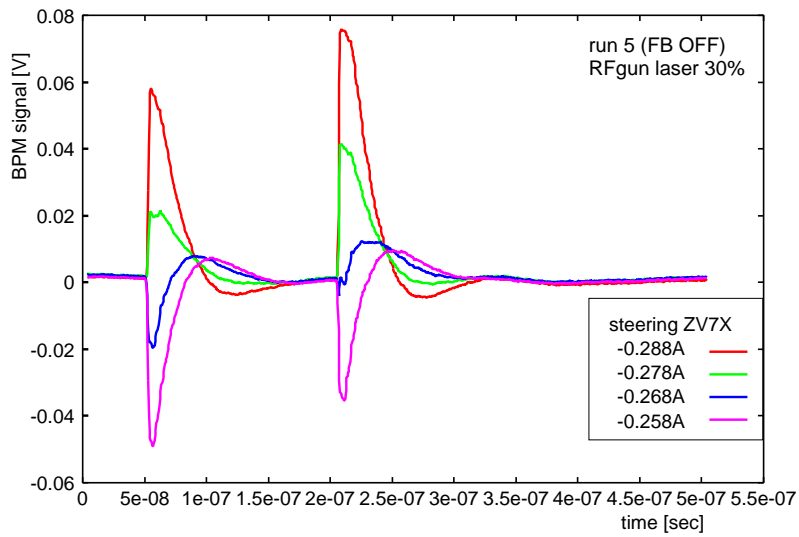


图 15: RUN5 (FB OFF)

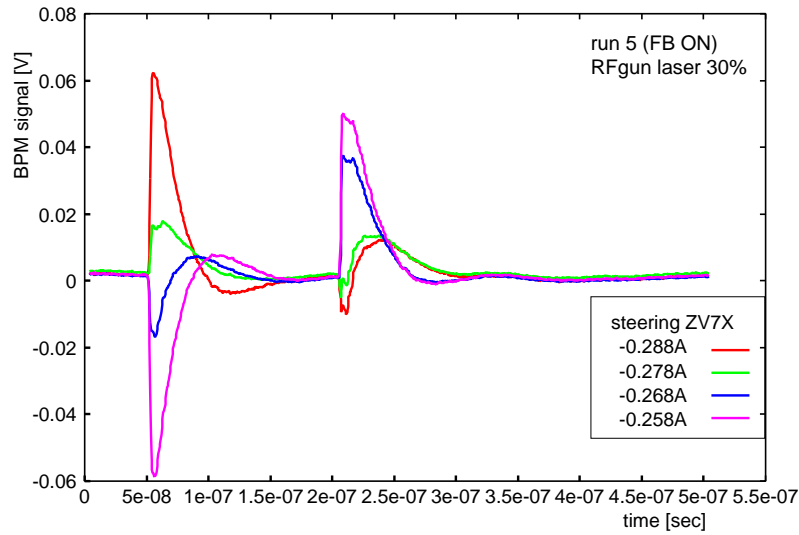


図 16: RUN5 (FB ON)

5 まとめと次の課題

空洞 BPM の信号をストリップラインキッカーにフィードバックすることにより、154nsec 間隔の 2 バンチビームの 2 バンチ目の位置変動を入射時の $100\mu\text{m}$ から $10\mu\text{m}$ に低減できた。

次はフィードバックシステムに delay loop を追加し、3 バンチ以上のフィードバックのテストを行う。ただし、取り出しキッカーのフラットトップの問題があり 154nsec 間隔 3 バンチでは苦しいので、例えば 100nsec 間隔 3 バンチとかを試す必要があるかもしれない。