

J-PARC intra-bunch feedback system に向けた stripline BPM の製作 FABRICATION OF TAPERED COUPLER FOR INTRA-BUNCH FEEDBACK SYSTEM IN J-PARC MAIN RING

仲村 佳悟 *A)

外山毅^{B)}、岡田 雅之^{B)}、陳 榮浩^{B)}、飛山 真理^{B)}、帯名 崇^{B)}、久保木 浩功^{B)}、小関 忠^{B)}

菖蒲田 義博^{C)}

Keigo Nakamura* A)

Takeshi Toyama^{B)}, Masashi Okada^{B)}, Yong Ho Chin^{B)}, Takashi Obina^{B)}, Hironori Kuboki^{B)}, Tadashi Koseki^{B)}

Yoshihiro Shobuda^{C)}

^{A)}Kyoto University

^{B)}KEK

^{C)}JAEA

Abstract

We are developing intra-bunch feedback system for J-PARC (Japan-Proton Accelerator Research Complex) Main Ring (MR) to suppress intra-bunch motion (the bandwidth up to around 100MHz) which leads to head-rail instabilities. The new wide-band Beam Position Monitor(BPM) is required because the current BPM system has the frequency bandwidth below 10MHz. The BPM is also required to have the frequency sensitivity as wide as possible to observe the motion caused by high impedance sources such as electron cloud. We developed new type of BPM equipped exponentially tapered electrodes which enable it to wider frequency sensitivity (up to 1GHz) than ordinary stripline BPMs. We calibrated this BPM by using stretched wire and observed the beam. We also developed tapered pipe to calibrate more accurately. We achieved transfer impedance $6.5 \pm 0.97\Omega$ (frequency <1GHz), position sensitivity 37.17 ± 0.08 (frequency 1MHz-1GHz) as the performance of the BPM.

1. はじめに

J-PARC(Japan-Proton Accelerator Research Complex)メインリング(MR)では不安定性によるロスによってビーム強度が制限されている。現在はバンチ毎フィードバックシステム^[1]及びクロマティシティの補正を弱めることで運転をしているが、より強度を上げるにはクロマティシティを0に近づけての運転が不可欠になる。不安定性の最中にはバンチ内振動が観測されており、この振動を抑えるためにワイドバンド(100MHz程度)のフィードバックシステム(バンチ内フィードバックシステム)を開発している。現在のBPMシステムは周波数帯域が10MHz以下のため、このフィードバックシステムのために新しく広帯域に感度を持つBPMを作成する必要がある。また、今後強度が上がるに連れて電子雲不安定性(600-800MHz)など高周波での不安定性が問題になる可能性もある。これらの動きを観測するためにもできるだけ高周波まで感度をもつBPMが必要である。そこで電極にexponentialにtaperを施すことで広帯域に感度を持つstripline BPMを製作、設置した。ここでは設計、シミュレーション、ワイヤー法によるキャリブレーション及び問題点とその解決策について述べる。

2. TAPERされた電極を持つ STRIPLINE BPM

文献^[2]を参考に、exponentialにtaperされた電極を持つstripline BPMを作成した。BPMの伝達関数はス

テップ応答 $s(t)$ を用いて

$$F(\omega) = i\omega \int_0^{\frac{2l}{c}} s(t)e^{-i\omega t} dt \quad (1)$$

とかける。ステップ応答 $s(t)$ と z 方向のビームの結合 $K(z)$ には $s(t) = \frac{1}{2}K(\frac{ct}{2})$ の関係がある。ステップ応答がハイパスフィルタと同じ特性を持つ様にビームとの結合をexponentialに変化させた場合 ($K(\frac{ct}{2}) = K \exp(-\frac{cta}{2l})$)

$$|F(\omega)| = \frac{\frac{K\omega l}{c}}{\sqrt{a^2 + \frac{4\omega^2 l^2}{c^2}}} \left(1 + e^{-2a} - 2e^{-a} \cos \frac{2\omega l}{c} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

$$\text{Arg}(F(\omega)) = \arctan \left(\frac{\frac{2\omega l}{c} \sin \frac{2\omega l}{c} + a(e^a - \cos \frac{2\omega l}{c})}{\frac{2\omega l}{c}(e^a - \cos \frac{2\omega l}{c}) - a \sin \frac{2\omega l}{c}} \right) \quad (3)$$

となる。 l は電極の長さ, c は光速, a はexponentialの定数, K は転送インピーダンスの定数である。 a が大きい時には

$$|F(\omega)| = \frac{K\omega l}{\sqrt{a^2 + \frac{4\omega^2 l^2}{c^2}}} \quad (4)$$

と実際にハイパスフィルタと同じ特性を持ち、広い範囲で感度を持つことができる。ビームとの結合は電極の幅に比例するので電極にtaperを施せばこの状態を実現

* nakakei@post.j-parc.jp

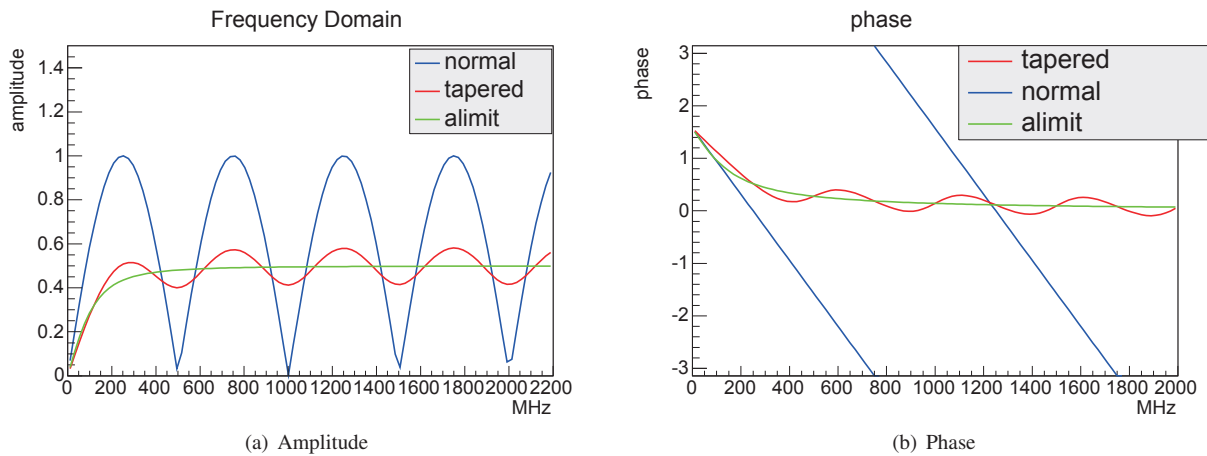


Figure 1: Frequency characteristics.

することができる。Fig.1は通常のBPM($a=0$), taperされた電極のBPM($a=-1.7$), a の極限をとった場合についてそれぞれ位相と amplitude を書いたものである。

特性インピーダンスが 50Ω になるよう境界要素法及び有限要素法を用いて直径 148mm, 上流の電極の幅 30mm, 電極とビームパイプの距離 7mm と決定した。下流側は電極の幅を 5mm と設定し, $l = 300$ とした。この時 $a = 1.7917$, $K = 5.4$ となる。また、インピーダンスを 50Ω に保つために上流と下流で徐々に電極とビームパイプの距離を縮めてある。

3. CST STUDIO を用いたシミュレーション

以上の設定で CST studio^[3] でシミュレーションを行った。3次元モデルの形状は Fig.2 のとおりである。

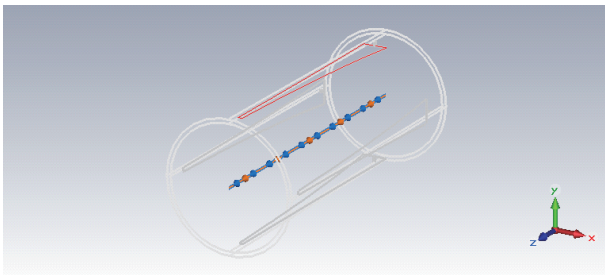


Figure 2: BPM model.

$\sigma = 1(ns)$ のガウス波形の電流 (Fig.3 の赤線) を入力した際の出力電圧は Fig.3 の青線ようになった。

入力と出力の周波数スペクトルの比をとることにより、検出器の伝送インピーダンスを算出した (Fig.5 の緑線) なお、シミュレーション結果は BPM 較差の影響に合わせて実験値に規格化してある。

4. STRETCHED WIRE METHOD による較正

シミュレーションを元にこの BPM を作成し (Fig.4) 以下に述べる較正を行った後、設置した。

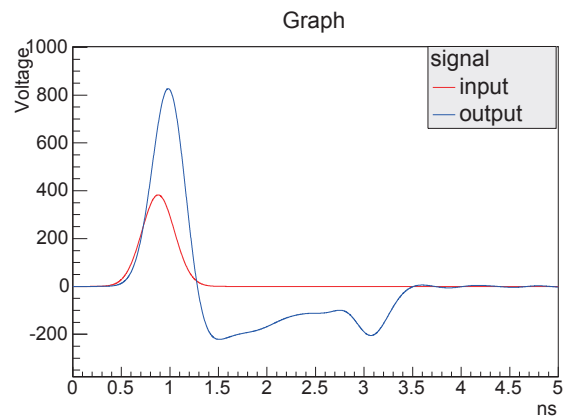


Figure 3: Signal.

この BPM の性能を確認するためにワイヤーによる較正をおこなった^[4]。被測定物の両端に長さ 800mm, 500mm のパイプを取り付け、 $\phi 260\mu m$ の銅コーティングピアノ線を張り、電流を流してネットワークアナライザ (Agilent technology, E5071C ENA) で測定した。この際ワイヤーと BPM ダクトが作る同軸構造の特性インピーダンスは 375Ω なので反射をなくすためにポートとワイヤーの間に 320Ω 程度の抵抗を挟んである。この方法ではダクト同士の接続部などで起きた反射波が測定に影響を与える。この影響を取り除くため Time Domain Gate 法 (TDG) を用いた^[5]。TDG は一度ネットワークアナライザの信号を逆 FFT することで時間領域に戻す。この時に反射波の影響がないであろうと思われる部分のみを選択し再度 FFT をかけることで反射の影響を取り除く方法である。この方法を用いて、BPM の応答を調べた。

4.1 伝送インピーダンス

シミュレーション同様入力と出力のスペクトル比を取ること伝送インピーダンスを導出した。それぞれ、青線が測定値、赤線が計算値、緑線が CST のシミュレーション結果である。Fit の結果から $K=6.5$ となった。この値は $K=5.4$ とずれているが、電極とパイプの距離が

PASJ2014-SAOM03

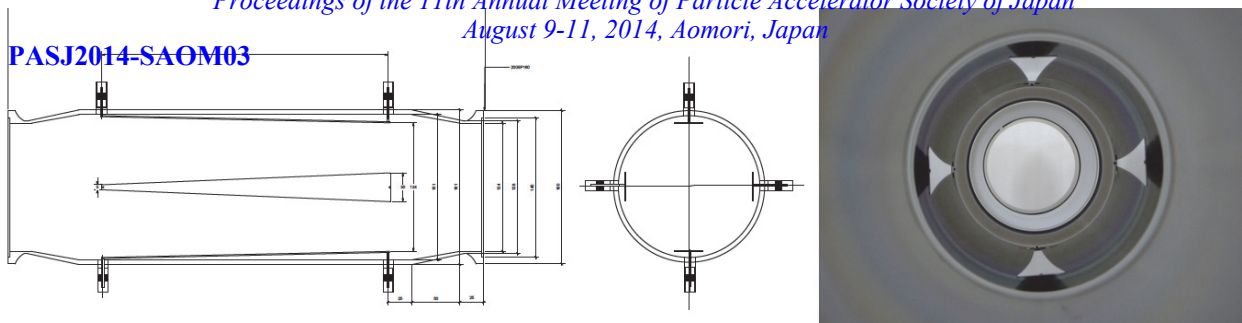


Figure 4: Stripline BPM.

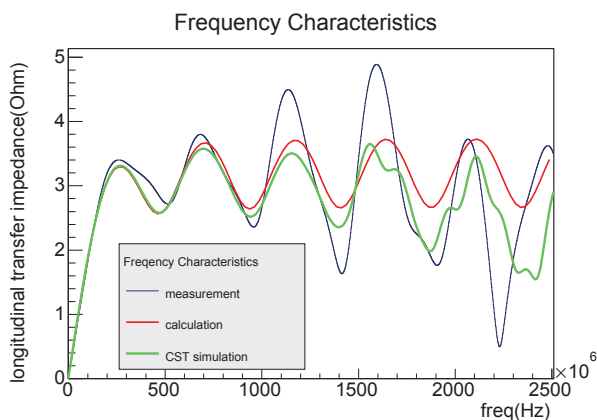


Figure 5: Transfer impedance.

0.5mm ほど大きくなっていたためとかがえられる。Fig.5 から 1GHz までの範囲で計算との誤差 15% 程度で感度を持つことを確認した。

4.2 位置感度係数

中心からの距離を-30mm から 30mm まで変化させた時の周波数毎の位置係数を調べ 1MHz-1GHz の範囲で平均 37.17 ± 0.08 を得た。これは計算値の 36.9 と 7% の精度で一致する。

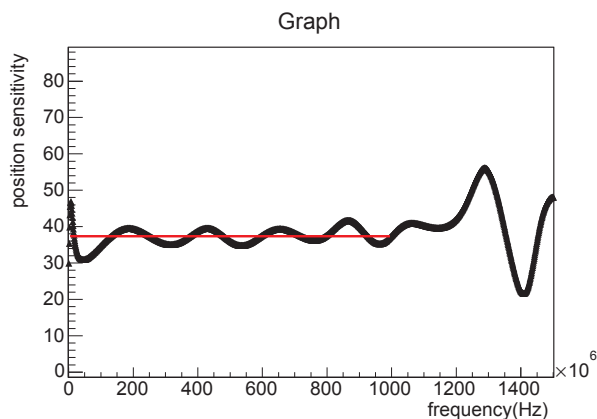


Figure 6: Position sensitivity.

4.3 ビームからの信号

この BPM をインストールし実際にビームを観測した。フィードバックシステムのモジュールである iGp12^[6] を用いてバンチ内振動の様子を観測したものが Fig.7 である。垂直方向の Δ 信号を 5 ターン毎に 10 回重ね書きをしている。

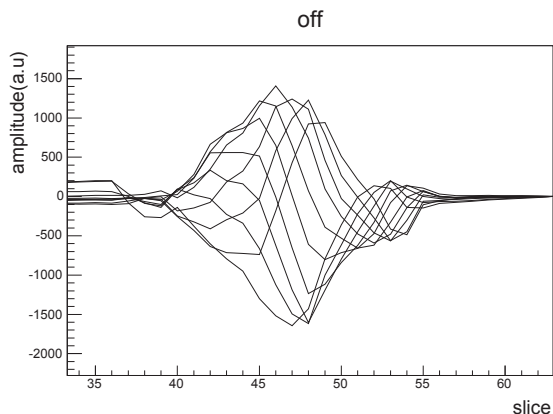


Figure 7: Beam signal.

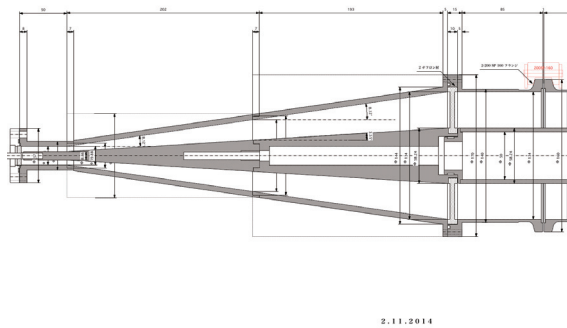
5. 議論

5.1 インピーダンスミスマッチ

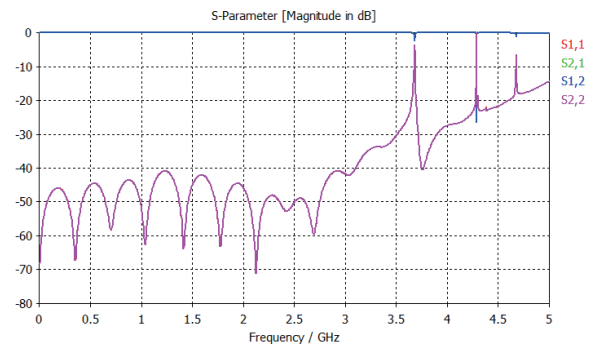
1GHz 以上では計算値と測定値が大きく異なっている。また、1GHz 以下でも誤差が 15% と少し大きい。原因は主にインピーダンスミスマッチ、反射波の見積りりの 2 つあると考えられる。図 8 は TDR で測定した BPM 電極の測定値である。入射部で 90Ω 程度のミスマッチがあり更に電極部でも 10Ω の変動があるのがわかる。これらの原因として以下の物があげられる。

5.1.1 コネクタ フィードスルーの作る同軸構造が外導体 25mm, 内導体 3mm で特性インピーダンスを調べたところ 127Ω であった。これが最初の 90Ω の変動の原因と考えられる。50 Ω になるように内導体の径を変更する必要がある。

5.1.2 電極とパイプの距離 特性インピーダンスは電極の幅、厚さ、電極とビームパイプの距離で決まるため、電極の幅が変わると適切に厚さ、距離を変える必要がある。一般的にパイプとの距離が離れるとインピーダンスは高くなる。今回は製作の都合上パイプと電極の距



(a) Over View



(b) S Parameters

Figure 9: Tapered pipe.

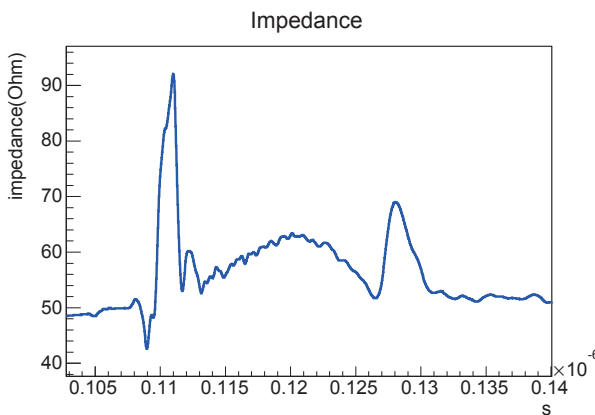


Figure 8: Impedance mismatching.

離は 1 次関数的に変化しているため、距離が exponential の時と比べると中心付近の距離の差が大きくなるため、インピーダンスも中心が膨らんでしまっている。そのため幅と同時に高さも指数関数的に変える必要がある。対策としては電極を曲げる、3 次元的に厚さを変えていくなどがある。

5.2 taper 管

TGD 法では除き切れない反射波があると測定に影響を及ぼすため、対策として反射の影響を抑えるために反射係数が 1% 以下の taper 管を作成中である。CST Studio を用いたシミュレーションでは 2.5GHz まで反射係数は 1% 以下である。

6. まとめ

exponential に taper した BPM を作成し応答特性を調べた。1GHz まで理想的な特性と 15% の精度で一致することを確認した。フィードバックシステムとしての要求 (~100MHz) は今のところ満たしているため利用運転でも使われている。今後は更に広帯域で高精度なモニタのために上記のような改良を加えた改良機を作っていくたい。また現在は信号を積分することで BPM の特性を補正しているが高周波では補正できない。この位相特性やケーブルによる信号の歪みの補正も現在の課題である。

本研究は MEXT 科研費 25105002 新学術領域研究「ニュートリノフロンティアの融合と進化」の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] Y. Kurimoto et al., "Bunch by bunch feedback system in J-PARC MR", DIPAC2011, Hamburg, May 2011, p482 (2011).
- [2] T. Linnekar, "The high frequency longitudinal and transverse pick-ups used in the SPS", CERNSPS/ ARF/78-17 (1978).
- [3] CST-STUDIO SUITE™
- [4] F. Caspers, in Handbook of Accelerator Physics and Engineering, edited by A.W. Chao and M. Tigner (World Scientific, Singapore, 1998), p. 570.
- [5] 各メーカーの解説書、例えば、Agilent technology, "Time Domain Analysis Using a Network Analyzer", Application Note 1287-12.
- [6] Dimtel, Inc., San Jose, USA, <http://www.dimtel.com>