

KEKB 入射器における陽電子生成用一次電子のビームタイミング安定性の計測 BEAM TIMING STABILITY DIAGNOSTICS OF PRIMARY ELECTRONS FOR POSITRON PRODUCTION AT THE KEKB INJECTOR LINAC

諏訪田剛*

Tsuyoshi Suwada*

Accelerator Laboratory, High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

Abstract

A new beam-timing monitor (BTM) has been developed in order to diagnose longitudinal beam dynamics and bunching characteristics at the pre-injector of the KEKB injector linac. The BTM is a conventional stripline-type monitor with two pickup electrodes. It measures a relative delay time between arriving time of the beam signal and zero-cross time of the fundamental accelerating rf signal (2856 MHz) immediately after the beam signal. The beam tests were performed to evaluate the performance and characteristics of the BTM with primary single-bunch electron beams with charges of ~ 8 nC/bunch for positron production. It is found that the test results show that the measurement resolution (or limit) of the delay time is $\sigma \sim 1.2$ ps in one standard deviation. This report describes the new BTM system, beam tests and their results with investigating the dependence on the parameters of the pre-injector, and correction methods to the pulse-height dependence of the BTM signal are in detail described.

1. はじめに

KEK 電子陽電子入射器 (以下入射器) のような高エネルギー電子線形加速器では、横方向のみならず縦方向のビーム位相空間を高精度に計測することは重要である。入射器では横方向のビーム診断は、主にビーム位置モニター (BPM)、ワイヤースキャナーなどを用いて行なわれているが、パンチ長計測を除き縦方向の診断は行われていない。

現在、縦方向のビーム診断を拡充すべくビームタイミングモニター (BTM) の開発を行っている。BTM は加速 rf (S バンド 2856 MHz) に対するビームの到達時間を計測する診断装置である。開発した BTM は BPM と同様なストリップライン構造を有し、出力端子から特徴的なバイポーラ信号を出力する。出力信号の前縁立上がり時間を基点として加速 rf のゼロクロスまでの相対的な遅延時間を計測する。

2018 年の夏期保守時、入射器の A44 直後に BTM を設置した。A44 は熱電子銃から約 50 m 下流に位置し、電子エネルギーは $E \sim 530$ MeV である。この BTM は熱電子銃後の電子の縦方向のビーム位相空間の診断を目的とし、特に入射部における電子のバンチング特性やビーム光学系に依存した縦方向のビーム安定性を非破壊で診断することにある。

入射部の各種パラメータに対する遅延時間応答をこの BTM により計測することで、入射部における縦方向のビーム安定領域の定量的評価が可能となる。他方、加速ユニット 38 後にも同様な BTM を設置した。これは DR 出射後の入射陽電子や 180 度アーク周回後の入射電子のビーム光学系に依存する縦方向のビーム安定性を診断することを目的としている。後者については現在整備中である。

本学会では、縦方向のビーム診断を目的として導入した BTM の計測原理と計測分解能の評価、また入射部の

各種パラメータに対する遅延時間応答とビーム安定領域について評価した実験結果を報告する。

2. 入射部システム

入射器は下流に 4 つの独立したリング加速器、Super KEKB (SKEKB) LER (4 GeV/陽電子)/HER (7 GeV/電子)、PF (2.5 GeV/電子)、PF-AR (6.5 GeV/電子) を有し、これらに電子・陽電子を供給している。入射部は、SKEKB 計画 [1] への改造後 HER に低エミッタンス電子の入射を目的として rf 電子銃が新設された [2]。従来の熱電子銃は、HER 以外のリングに対し電子を入射している。ここでは熱電子銃による入射部システム [3] の概要を説明する。

熱電子銃は熱陰極を装着した従来型の三極管である。グリッドバルサーから 2 ns 幅のグリッドパルスが陰極に印加されることで電子は引き出され、パルス波高値に応じて引き出し電荷量が制御される。電子の引き出し電圧となる陰極・陽極間の高電圧は 180 kV である。電子は、その直後の 2 段のサブハーモニックバンチャー (SHB1/114 MHz、SHB2/571 MHz) に入射し集群され、プレバンチャー (PB/2856 MHz) とバンチャー (Buncher/2856 MHz) により単バンチ化 (パンチ幅 ~ 10 ps FWHM) される。バンチャー直後の電子エネルギーは $E \sim 25$ MeV である。熱電子銃はバンチ当たり最大 ~ 20 nC/bunch の電荷量を出射する能力を有するが、陽電子生成用の一次電子電荷量の公称値は ~ 10 nC/bunch である。

3. ビームタイミングモニターシステム

3.1 機械的構造

図 1 に BTM の機械的構造図を示す。BTM は、BPM と同様なストリップライン電極を有するモニター (材質 SUS304) である。BPM は通常 4 電極から構成されるが、BTM は簡便のため上下 2 電極構成とした (1 電極は終端され予備)。軸方向のチェンバー長さ (L) は 500 mm、ストリップライン電極厚さ (T_e) は 1.5 mm、電極長 (L_e) は

* tsuyoshi.suwada@kek.jp

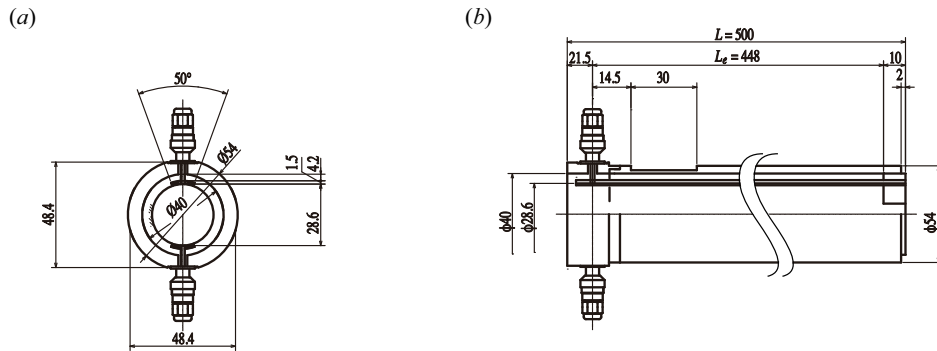


Figure 1: Mechanical drawings of the beam-timing monitor, (a) front view, and (b) side view. The length is indicated in millimeters.

448 mm とした。ストリップライン電極に特徴的なバイポーラ出力する信号の鈍りを極力避けるためにできるだけ電極長を長くしている。すなわち、バイポーラ信号の重畳による信号の損失と鈍りを避けるためにパルス幅以上に信号を分離させるためである。

電極の片端には SMA フィードスルーが取り付けられ、他端はチェンバー内壁に短絡させている。電極開口角は 50° とし、チェンバー内壁と電極との間隙は信号伝送路 (50Ω) に整合するように決められた。

3.2 計測システム

BTM 信号と加速 rf 信号 (2856 MHz) は、同軸ケーブルを用いて高速オシロスコープ (Tektronix/DPO70404C, BW4GHz, 25GS/s) へ入力される。同軸ケーブルは、加速 rf に対し SUHNER 低ロス RF 同軸ケーブル (S04272B/20 m)、BTM に対し三菱電線低損失同軸ケーブル (WF-H50-4S/30 m) を用いた。ビーム信号の立上がり前縁を時間の基点として加速 rf 信号のゼロクロスまでの遅延時間をオシロスコープに内蔵する遅延時間計測機能を利用して計測する。ここで注意したいことは、本オシロスコープの最小時間分解能は 200 fs であるが、内部回路のジッターにより遅延時間計測分解能は ~ 1 ps (1σ) に制限されることである。この時間分解能が本計測システムの 1 ショット計測における限界値を与えることになる。

4. 陽電子生成用一次電子ビームによる試験

4.1 運転時における BTM 応答計測

熱電子銃から放出される陽電子生成用一次電子ビームの運転時の典型的な電荷量は 8.2 nC/bunch であった。一次電子の電荷量はパンチ当たりの電荷量としては大きく、様々な不安定要因により電荷量の損失がしばしば観測されている。従って、まずは一次電子ビームの BTM 応答を計測することにした。

図 2(a) に一次電子ビームに対する典型的な BTM 信号波形を示す。BTM 信号波形全体が入るようにオシロスコープ設定を 500 mV/div、 1 ns/div とした時の波形である。バイポーラ信号の立上がり前縁と後縁の間隔は 3 ns なので、正負の信号ピークが充分離れていることが確認できる。従って、最初の信号の前縁でトリガーを掛け遅延時間計測の基点 (T_0) としビームの到達時間とした。

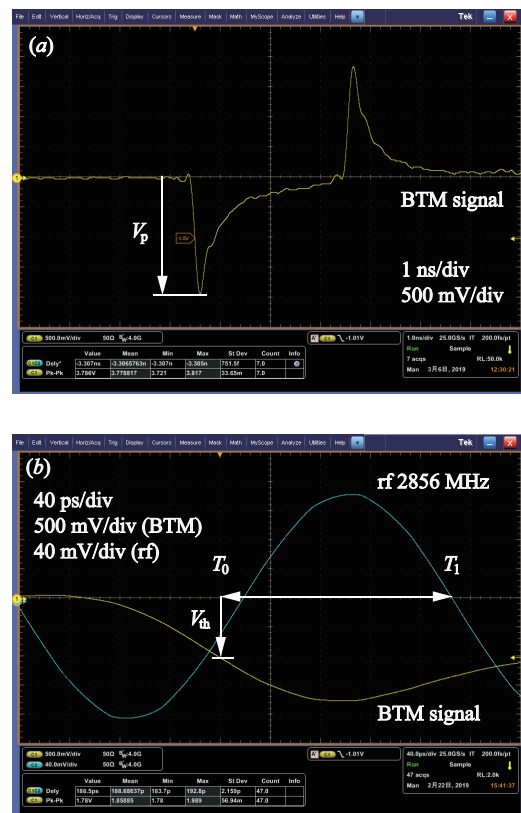


Figure 2: (a) Typical BTM signal and (b) similar BTM and accelerating rf signals measured for primary electron beam for positron generation (enlarged view of (a)).

BTM 信号のオシロスコープへの入力はダイナミックレンジに合わせるために 12 dB (2×6 dB) の固定減衰器を挿入した。この時の BTM 信号の波高値は $V_p \approx 1.9$ V であった。

同図 (b) は、実際の遅延時間計測のレンジに設定した時の信号波形 (500 mV/div、 40 ps/div) を示す。BTM 信号でトリガーを発生するように閾値を固定し $V_{th} = -1$ V に設定した。この閾値は、一次電子ビームの典型的な信号出力の約 53% に対応する。加速 rf 波形の立下がりゼロクロスする基点を遅延時間計測の終点 (T_1) とすると、遅延時間 (T_d) は $T_d = T_1 - T_0$ で定義される。こ

の T_d がオシロスコープの内臓機能により計測される。

図 3 に本計測システムで取得された典型的な LER 入射時のビームタイミング計測結果の時系列を示す。図 3

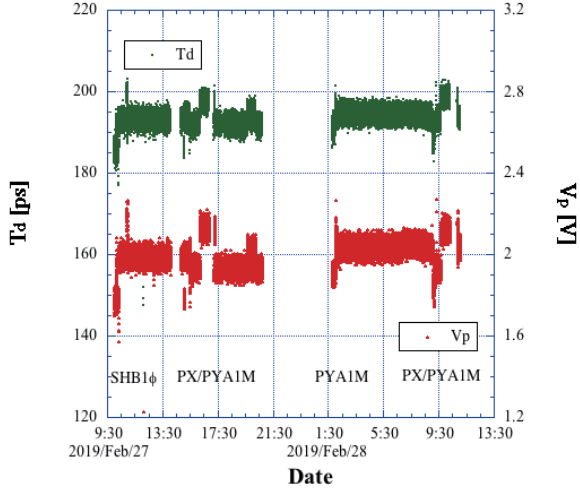


Figure 3: Time traces of the delay time T_d and pulse height V_p measured in typical operation for the LER injection during about a day.

には T_d と同時計測された信号波高値 V_p もプロットしている。後日、運転記録を運転ログから拾い出し、典型的な調整事項を記述した。この期間に行われた調整は SHB1φ, PX/PYA1M であり、それぞれ SHB1 位相調整、パルスステアリング A1M(X/Y) によるビーム軌道調整を示す。

この図から安定時 (非調整時) には遅延時間とパルス波高が共に安定した時間推移をしていることがわかるが、ビーム調整時にはこれらが明確に応答し少なからず変化していることがわかる。また安定した時間推移においても、わずかに遅延時間が変化しオフセットしていることもわかる。これはパルス波高値が同時に変化していることから理解できるように遅延時間のパルス波高依存性を示すものと考えられる。

4.2 信号波高値に対する BTM 校正

図 2(b) に示すようにビームの遅延時間計測は、トリガーレベルを一定とするので信号出力の波高値に依存する。この波高依存性を適切に校正するには、BTM 信号入力に校正用固定減衰器を挿入するだけでは、固定減衰器自身の電気長変化により適切な校正にはならない。適切な校正を行うには BTM 信号入力だけでなく、加速 rf 入力にも等しい減衰値をもつ固定減衰器を挿入し電気長変化を打ち消すようにしなければならない。

図 4 に一次電子ビームに対し加速 rf 信号入力に固定減衰器を 1 dB ステップで挿入した時の遅延時間の変化を示す。各データ点は $N \sim 1000$ 点の平均と標準偏差による誤差を示す。この結果は、固定減衰器の挿入に対し遅延時間変化は明確な線形関係を示す。固定減衰器 (1 dB) 当たりの遅延時間の変化は $\Delta T_d = 88.3 \pm 0.6$ ps である。

図 5 に BTM 信号と加速 rf 信号の両入力に rf 固定減衰器を 1 dB ステップで同時挿入した時の波高値の変化に対する遅延時間の変化を示す。各データ点は同様に

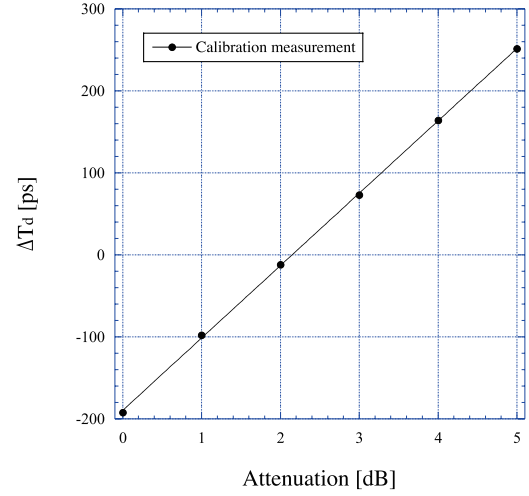


Figure 4: Variation in the delay time T_d as a function of the attenuation value with fixed rf attenuators (1 dB step) in the calibration measurement applied to the primary electron beam.

$N \sim 1000$ 点の平均としたが、誤差は標準偏差による統計誤差と固定減衰器の減衰量の系統誤差の両方を考慮して測定誤差とした。

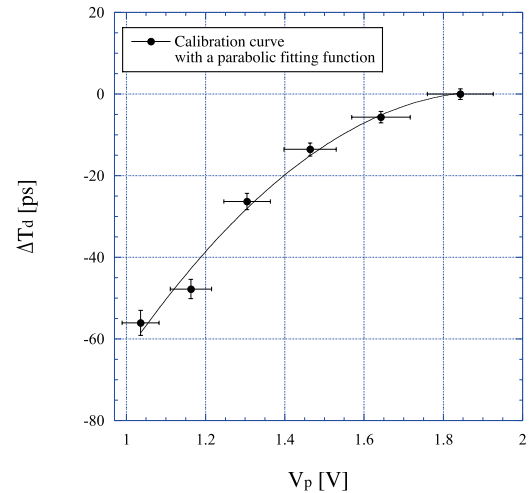


Figure 5: Variation in the delay time T_d as a function of the pulse height of the BTM signal with fixed attenuators (1 dB step) in the calibration measurement.

BTM 信号の出力波高値に対する遅延時間の変化は、一定のトリガーレベルに対し厳密には信号出力の立上がり前縁の波形に依存して変化する。しかし、入射ビームを限定するならば信号出力のダイナミックレンジは制限されるので、ここでは簡単のため放物線近似を用いることにした。放物線近似を用いたときのパルス波高に対する遅延時間補正量 (ΔT_d) は $\Delta T_d = 279.2 - 291.7V_p + 76.0V_p^2$ (T_d [ps], V_p [V]) であった。

2019/Feb/28 AM5:30 前後 (図 3 参照) における安定領域を取り出し遅延時間計測の分布を解析することにした。図 6 にその解析結果を示す。解析結果によると波高

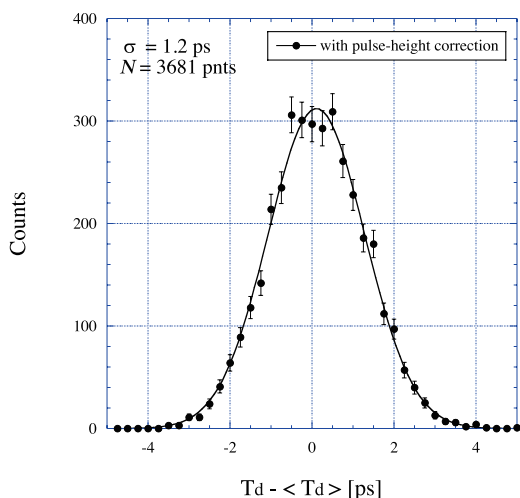


Figure 6: Distribution plot in the measured delay time for the primary electron beam. $\langle T_d \rangle$: the mean value of T_d .

依存性を補正した標準偏差は $\sigma \simeq 1.2$ ps であった。得られた標準偏差は、事前のベンチ試験による結果と一致し、1 ショット計測におけるオシロスコープの遅延時間計測の限界値を示すことがわかった。

4.3 入射部パラメータに対する遅延時間応答

代表的な入射部パラメータを取り上げ、各パラメータに対する遅延時間応答を計測した。代表的なパラメータを SHB1 位相 ($\Delta\phi$) と SHB2 位相 ($\Delta\phi$)、バンチャー位相 (Buncher $\Delta\phi$) 及びプレバンチャー位相 (PB $\Delta\phi$)、A1 加速管位相 (Acc A1 $\Delta\phi$)、ステアリング電磁石の印加電流 (熱電子銃ラインと rf 電子銃ラインとの合流部 A1M 直後、PX/PYA1M (I), 紙面の関係で結果を割愛) とした。ここで、位相設定値については各設定位相値からの変化分とした。図 7 に各パラメータに対する遅延時間応答の計測結果を示す。

図 7(a) は、SHB1 位相に対する BTM 応答 (補正無し) とパルス信号波高値の変化を示す。同図 (b) は波高補正有/無の BTM 応答を同時にプロットした。図 7 (c), (d) は、SHB2 位相に対する BTM 応答の計測結果を示す。図 7 (e), (f) は、バンチャー位相に対する BTM 応答の計測結果を示す。図 7 (g), (h) は、プレバンチャー位相に対する BTM 応答の計測結果を示す。図 7 (i), (j) は、A1 加速管位相に対する BTM 応答の計測結果を示す。

各データ点は $N \sim 600$ 点の平均と標準偏差による誤差を示す。図中、波高補正無しの計測結果に対しガイド線をプロットし、補正有りの計測結果に対しては 2 次又は 4 次多項式による最適化関数を用いた適用曲線をプロットしている。

5. 有感領域解析

各パラメータの変化に対し、ビーム電荷量の損失が大きく極端に信号波高値が減衰する場合を省き、遅延時間補正量は最大 ~ 3 ps 程度であった。遅延時間と各パラメータの関係は測定平均値を考慮する限り明確な相関関係を示し、入射部における縦方向のビーム安定性は充分診断可能であることがわかる。

Table 1: Summary Table in the Derivative of the Delay Time T_d Depending on the Phase Variation at Each Nominal Set Point with the Calibration Correction Based on a Polynomial Fitting Procedure for the Pre-injector Parameters

パラメータ	T_d 応答 [ps/deg.]	最適化関数 [pol. 次数]	有感領域 [deg.]
SHB1 位相	-2.2	4	± 0.55
SHB2 位相	-0.69	2	± 2.0
B 位相	-1.88	4	± 0.64
PB 位相	-0.09	4	± 14
AccA1 位相	1.07	2	± 1.12

表 1 に各パラメータの設定値 (公称値) における遅延時間の微係数をまとめた。微係数は多項式による最適化関数を適用して算出した。この結果から T_d 応答に本システムの計測分解能を乗ずれば、設定位相点における本システムの有感領域を算出することができる。表 1 にはその結果についても同時にまとめた。ただし、ここで言う有感領域とはビームの 1 ショットに対する計測分解能を意味し、測定値の平均操作を行えば計測分解能 (標準偏差) をさらに向上させることができる。この結果から入射部パラメータとしては、SHB1 位相の変化に対し最も感度が高く、PB 位相の変化に対し最も感度が低いことがわかる。

入射部の各パラメータを個別に診断するのではなく、これらのパラメータの微係数を多次元空間で同時診断すれば入射部のパンチング特性など本質的な物理量に関係する諸量が診断できるようになるだろう。

6. まとめ

現在、入射部のさらなる高度化に向けて様々な改造と増強が継続している。BTM は、縦方向のビーム診断と安定性を評価するために入射器に導入した初めての試みである。ビーム試験により非破壊で縦方向のビーム診断が比較的簡便なシステムで実現可能であることを示すことができた。本計測システムによるビームタイミングの計測限界値は 1 ショット計測に対し $\sigma \sim 1.2$ ps であることが確認された。電子・陽電子ビームのパルス毎のビーム切り替えを行う連続入射を実現しているが、本計測システムのパルス毎の計測に向けたシステムの高速度化が進行中である。

謝辞

遅延時間計測システムのデータ収集ソフトウェアの構築については、関東情報サービス (株) の早乙女秀樹氏に協力を頂きました。ここに感謝を申し上げます。

参考文献

- [1] Y. Ohnishi, *et al.*, Prog. Theor. Exp. Phys. 2013, 03A011 (2013).
- [2] M. Akemoto, *et al.*, Prog. Theor. Exp. Phys. 2013, 03A002 (2013).
- [3] I. Abe, *et al.*, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A 499, 167 (2003).

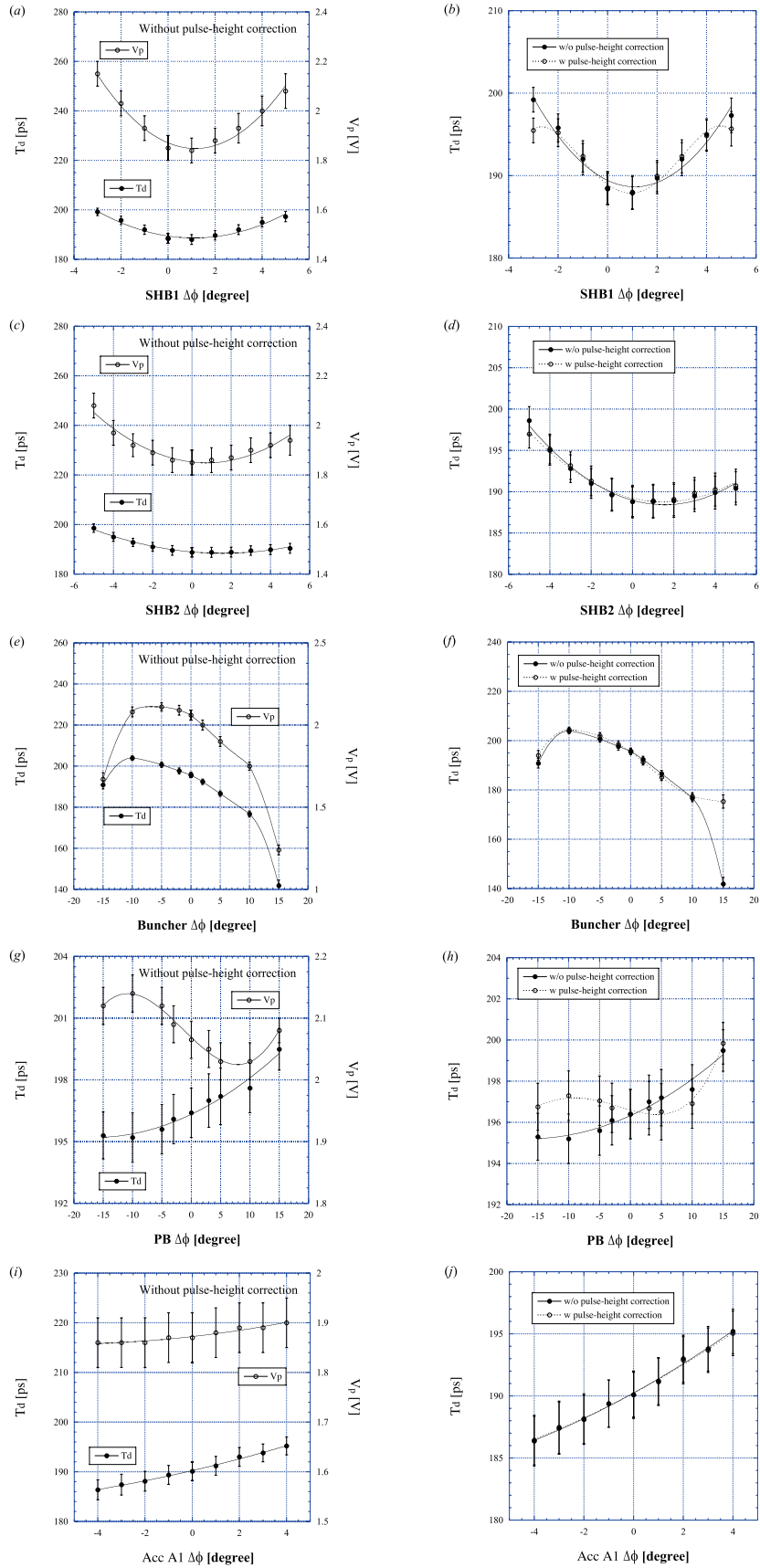


Figure 7: Dependence of the delay time T_d and pulse height V_p as a function of (a) the SHB1 $\Delta\phi$, (b) dependence of T_d with and without the V_p corrections, (c), and (d) the similar results of the SHB2 $\Delta\phi$, (e), and (f) the similar results of the buncher $\Delta\phi$, (g), and (h) the similar results of the PB $\Delta\phi$, (i), and (j) the similar results of the A1 Acc $\Delta\phi$ applied to primary electron beam.