

Electronics test using a beam signal

T.Hino, Y.Honda, Y.Inoue

2006/1/20

概要

Performance of the cavity BPM electronics was tested using a beam signal. Identical signal divided from a beam signal of a cavity were fed into two independent electronics. We estimated the resolution from the difference of the two results. It was found that the resolution could not be better than 100nm with the single phase detection scheme. However, with the information of Q-phase component of signal, the resolution can reach amplifier noise limit.

1 目的

検出回路の性能による分解能の限界を調べる。1年前の3-BPMによるビーム実験では分解能が72nmと評価された。しかし、このときベデスタル(レファレンス空洞の信号は入力するが、センサー空洞の信号は入力を外したセットアップ)の揺らぎの幅から評価した電気ノイズは25nm相当であった。アンプノイズ以外の原因が分解能に限界を与えていると考えられる。

同じ信号を2つのチャンネルで処理し、結果を比較することで、検出回路の分解能を評価することができる。発振器で作ったダミー信号を2つに分けてこれを行ったところ、井上BPMの信号強度とケーブル等の減衰を考慮して分解能は18nm程度と測定された(18nmは改修前の回路での値、今回の実験では改修後のconverterを使用したのでノイズは3dB少なく、分解能は13nm程度と考えられる)。今回は、実際に空洞出力のビーム信号を用いて同様の測定をする。ビーム信号でもダミー信号の場合と同じ結果が得られることを確認する。

井上BPMはレファレンス空洞とセンサー空洞の間の望ましくないカップリングが原因で波形がおかしいという問題があった。現在、ビームラインにはレファレンス空洞を目隠しした(modified)BPMと、もとのままの(original)BPMが設置されている。比較することで、以前の測定の時に波形問題が分解能に影響していたかどうか調べることができる。

2 セットアップ

今回の実験では、最終的には2通りの回路セットアップで測定を行った。はじめのは元々のスキーム(I-phase detection)で測定していたが、途中で回路を追加して(I-Q detection)再測定した。

2.1 I-phase detection

図1に最初のセットアップを示す。センサー空洞からの信号は、まずは強度を稼ぐために2ポートを足し合わされたあと2系統に分配して回路系に入力された。2つのチャンネルは同じモジュールのものを使っているためL.O.は共通である。detectorには位相シフターが各チャンネル独立についている。それぞれをビーム位置に感度最大になるようにいつもの方法(90度ずらして信号ゼロに調整)で調整した。図2が調整後のdetectorの出力。ADCのゲート幅は250nsecとした。

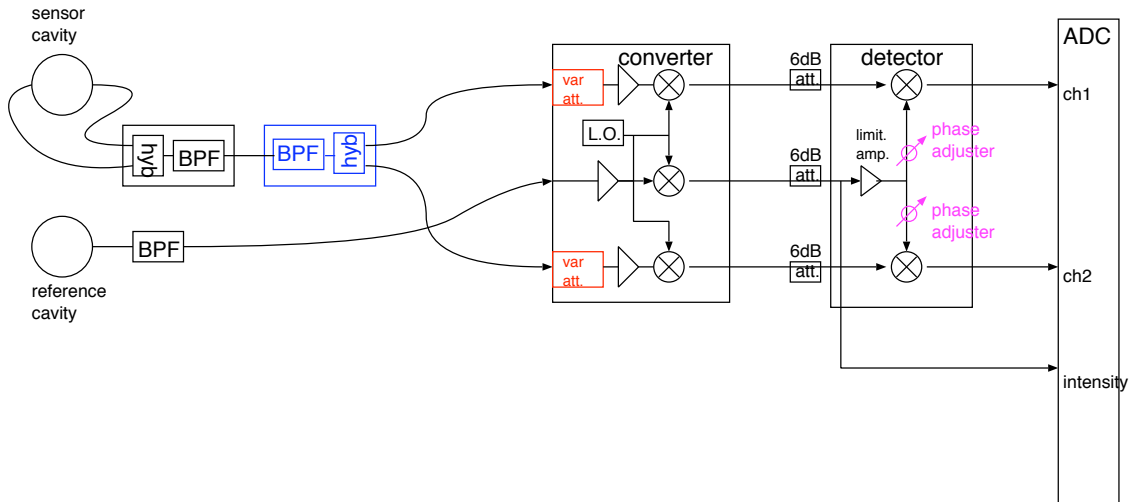


図 1: 回路のセットアップ (I-phase detection)

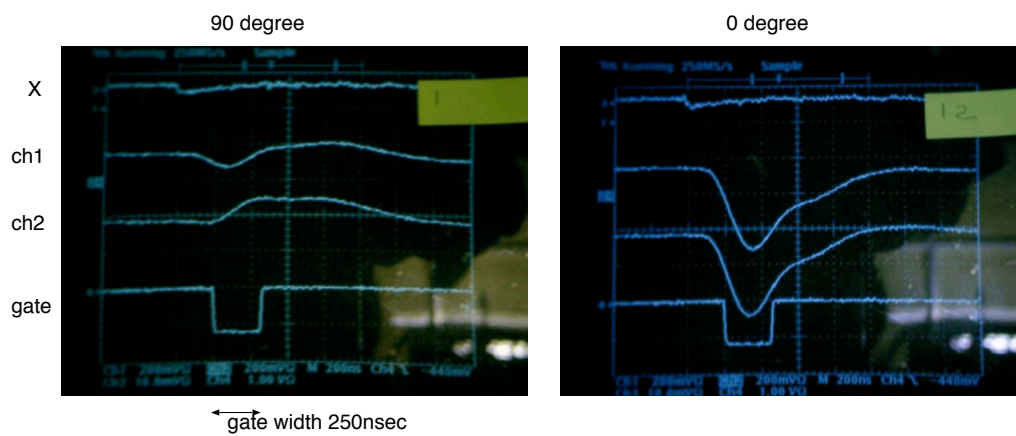


図 2: 位相調整の様子。約 1mm のビームオフセットをつけた状態。

2.2 I-Q detection

Q-phaseの情報も読み出して相関を調べる必要があると考え、図3のように回路を追加した。detectorの上流で信号を分けて、Q-phaseに調整した(0度のときに信号ゼロに調整)もう一台のdetectorにも信号を入力した。

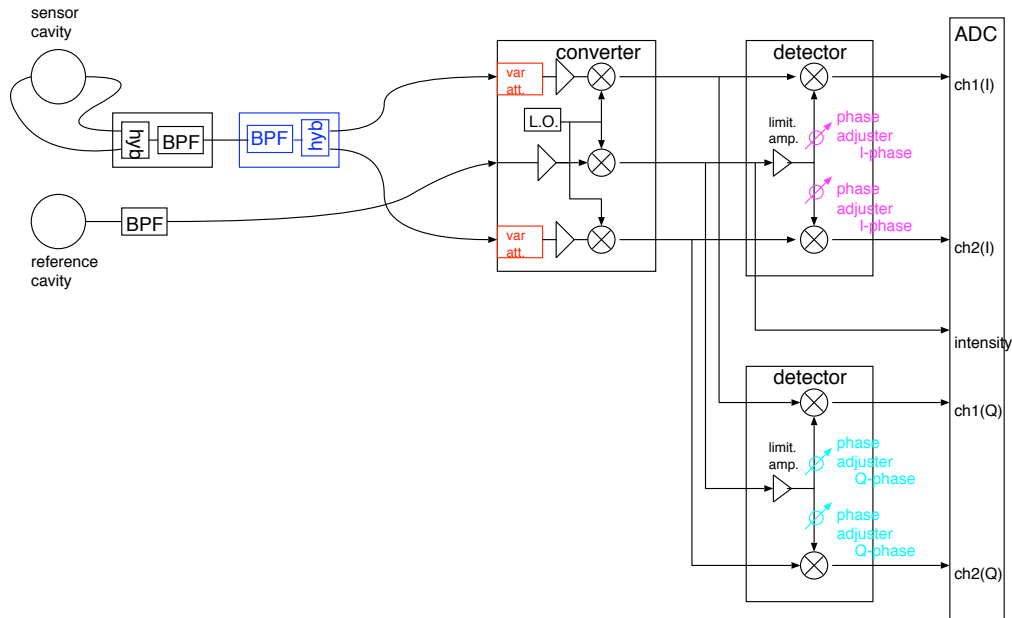


図 3: 回路のセットアップ (I-Q detection)

3 測定

回路系の初段 (converter の入口) にある可変アテネータによって、信号強度を調整できるようになっている。アテネータ 0dB の設定で最高の感度が得られると期待される。各アテネータの設定について、次の測定をおこなった。

1. ストリップライン BPM でビーム位置を測定しながらビーム軌道をステアリングマグネットで動かすことで、感度のキャリブレーションを行い、ADC のカウントとビーム位置に対応をつける。図 4 が実験で使用したビームラインのレイアウトである。
2. 相関解析をするのに十分なデータを集めるため適当なビーム位置で長め (500pulses) のデータをとる。

アテネータ 10dB、0dB の場合はビームジッターの影響で直接のキャリブレーションは難しい。これらの場合は、アテネータ 30dB の場合の感度からアテネータの値を信用してスケールしてキャリブレーションファクターを求めた。

レファレンス空洞がシールドされた BPM (modified) と昔のままの BPM (original) の各場合について測定を行った。

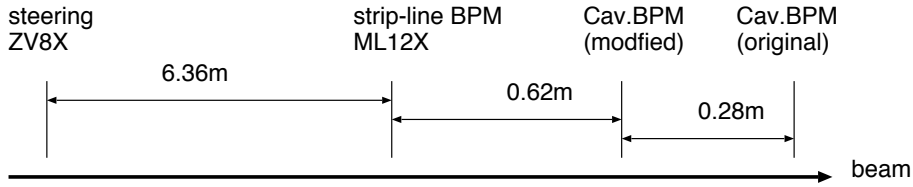


図 4: レイアウト

4 解析と結果

4.1 キャリブレーション

ch1 と ch2 の相関解析をする際にビーム強度による補正や、2つのチャンネルのゲイン差の補正をして、余計な相関が残らないようにする。具体的には、

$$(ch1 \text{ readout}) - \alpha(ch2 \text{ readout}) - \beta(\text{intensity}) \quad (1)$$

が intensity や ch2 readout と相関が見えないように α, β を決めた (一次の補正)。

補正を適用した後に、キャリブレーション解析を行った。

$$((ch1 \text{ readout}) + \alpha(ch2 \text{ readout}) + \beta(\text{intensity}))/2 \quad (2)$$

のビーム位置に対しての変化率を相関補正後の ch1, ch2 の平均としてのキャリブレーションファクターとした。図5がその一例である (アテネータ 30dB の場合)。ストリップライン BPM(ML12X) の読み値と式 2 で定義された値の関係のプロット。

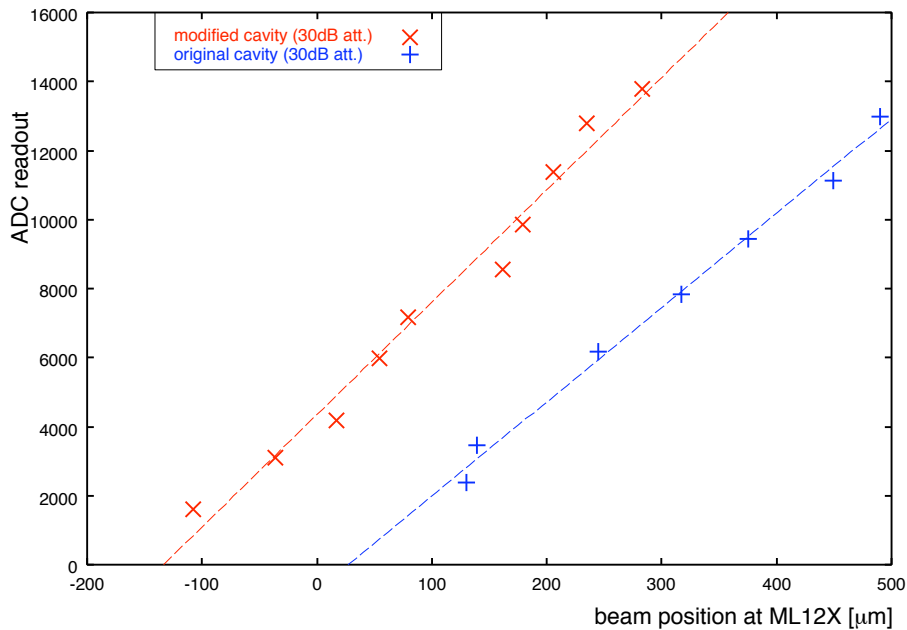


図 5: キャリブレーションの例 (30dB att. のとき)

4.2 相関解析

図6は分解能の解析の例である。上の図は、式1で行った補正を適用した後の縦軸が $ch1$ readout)、横軸が $\alpha(ch2 \text{ readout}) + \beta(intensity)$ のプロット。下の図は $(ch1 \text{ readout}) - \alpha(ch2 \text{ readout}) - \beta(intensity)$ の分布、この分布の幅の $1/\sqrt{2}$ (統計による効果) にキャリブレーションファクターを掛けて分解能を導出した。

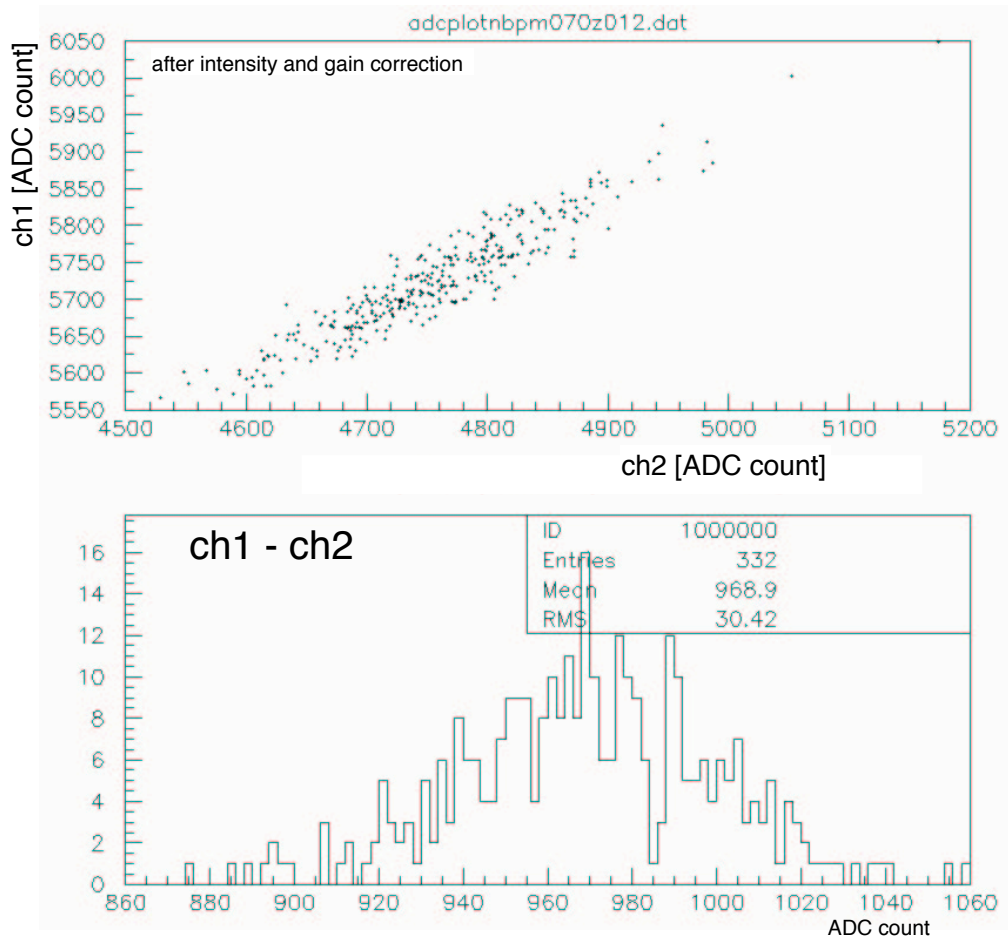


図 6: Modified cavity (30dB att.), I-phase detection

4.3 分解能の結果

アテネータの設定値にたいして得られた分解能を図7, 図8に示す。それぞれ、modified と original の BPM の場合である。赤で示したデータ点が図1のスキームの回路の場合。アテネータを減らして行くと信号強度に反比例して分解能が上がって行く(図中の線に乗る)と期待されるところが、実際には何か他の原因で分解能が数百 nm 程度に制限されている様子が見られる。また、この傾向は modified BPM と original BPM で違いは無い。

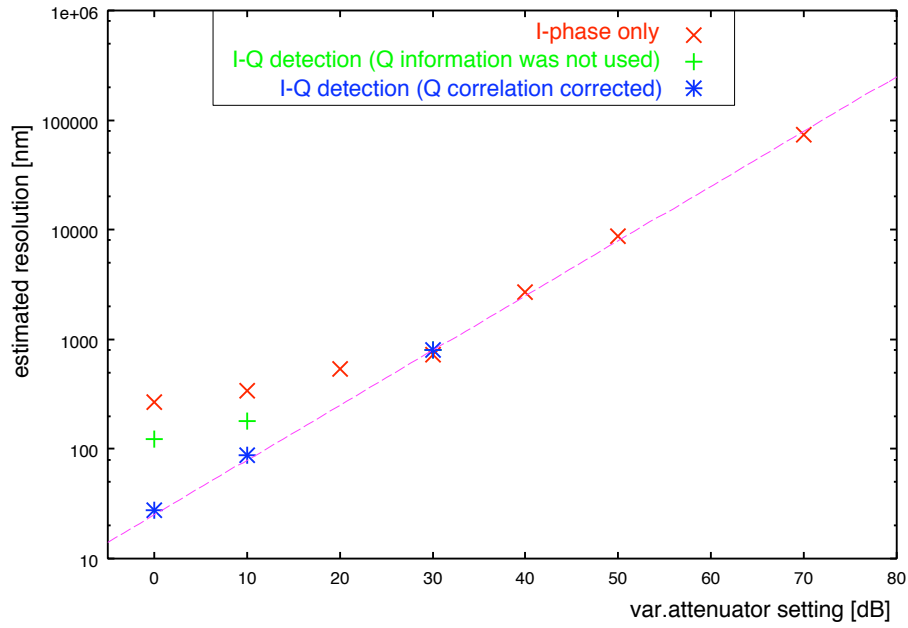


Figure 7: Modified cavity

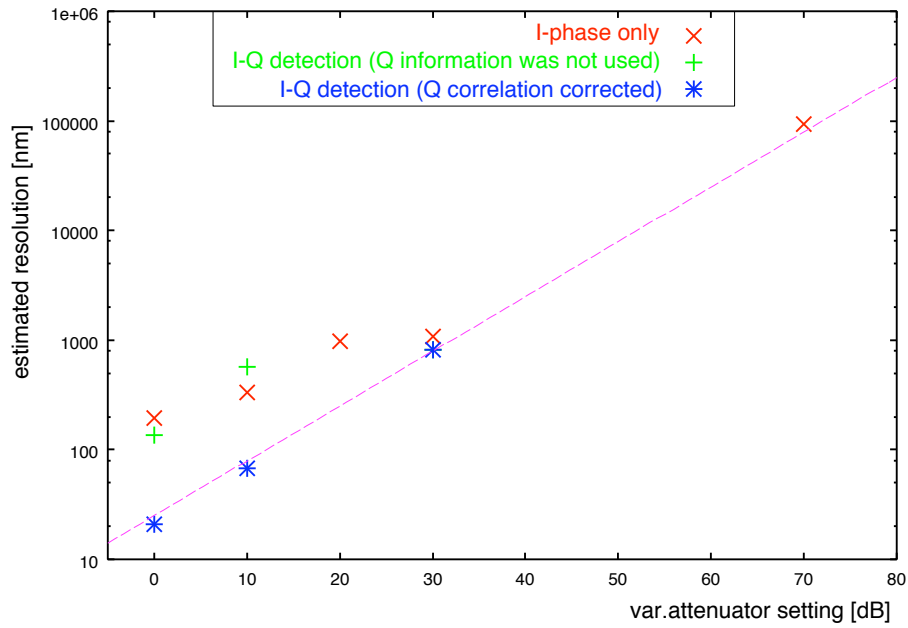


Figure 8: Original cavity

表 1: 結果 (modified cavity, I-phase only)

attenuator	sensitivity (count/ μm)	ch1-ch2 fluctuation (count)	resolution (nm)
70	0.270	25.8	74000
50	2.67	29.8	8689
40	7.75	26.9	2690
30	32.5	30.4	720
20	68.6	47.1	533
10		94.1	337
0		235.8	267

表 2: 結果 (original cavity, I-phase only)

attenuator	sensitivity (count/ μm)	ch1-ch2 fluctuation (count)	resolution (nm)
70	0.283	32.6	92900
30	27.3	36.7	1080
20	57.5	69.8	979
10		113.3	335
0		208.1	195

4.4 Q-phase の情報の利用

アテネータの設定 0dB の場合のデータの図 6 と同様の解析を図 9 に示す。同じ解析をただけであるが、確かに分布が広がっている (しかもクラスター 2 つ) のが分かる。アンプノイズならば多分ランダムであろうから、ここで残った分解能はアンプノイズでは無くて、何かビーム起源であろうと推測される。

もともと同一の信号を二つの回路で見ているだけなので、アテネータの値どおりに分解能が変わらないとは考えにくい。唯一 2 つの系統で違いがあるとすると、detector 内の位相調整である。合わせたつもりであってもほんの僅か違っていると入力信号の Q-phase 成分の洩れの量に違いが来て、入力信号に含まれる I-phase と Q-phase の成分の比がパルス毎にふらつくと 2 系統で検出される結果の違いになるのではないかと推測した。これを検証するために Q-phase の情報も同時に見れるようにセットアップを図 3 のように追加した。

I-Q detection で 0dB の時のデータを図 10 に示す。左上が Q-phase の情報を補正に取り入れる前、図 9 上図と同様のプロット。このときの residual、即ち $(\text{ch1 readout}) - \alpha(\text{ch2 readout}) - \beta(\text{intensity})$ と Q-phase の読み値との相関を見ると左下のようにはっきりとした相関が見られた。これを補正するように residual に修正を加え、 $(\text{ch1 readout}) - \alpha(\text{ch2 readout}) - \beta(\text{intensity}) - \gamma(\text{Q-phase readout})$ と定義しなおすことにした。縦軸が (ch1 readout) 、横軸が $\alpha(\text{ch2 readout}) +$

表 3: 結果 (modified cavity, I-Q detection), () の数値は Q-phase との相関を補正後

attenuator	sensitivity (count/ μm)	ch1-ch2 fluctuation (count)	resolution (nm)
30	32.6	33.5 (33.5)	796 (796)
10		75.1 (36.9)	178 (88)
0		163.0 (37.0)	123 (28)

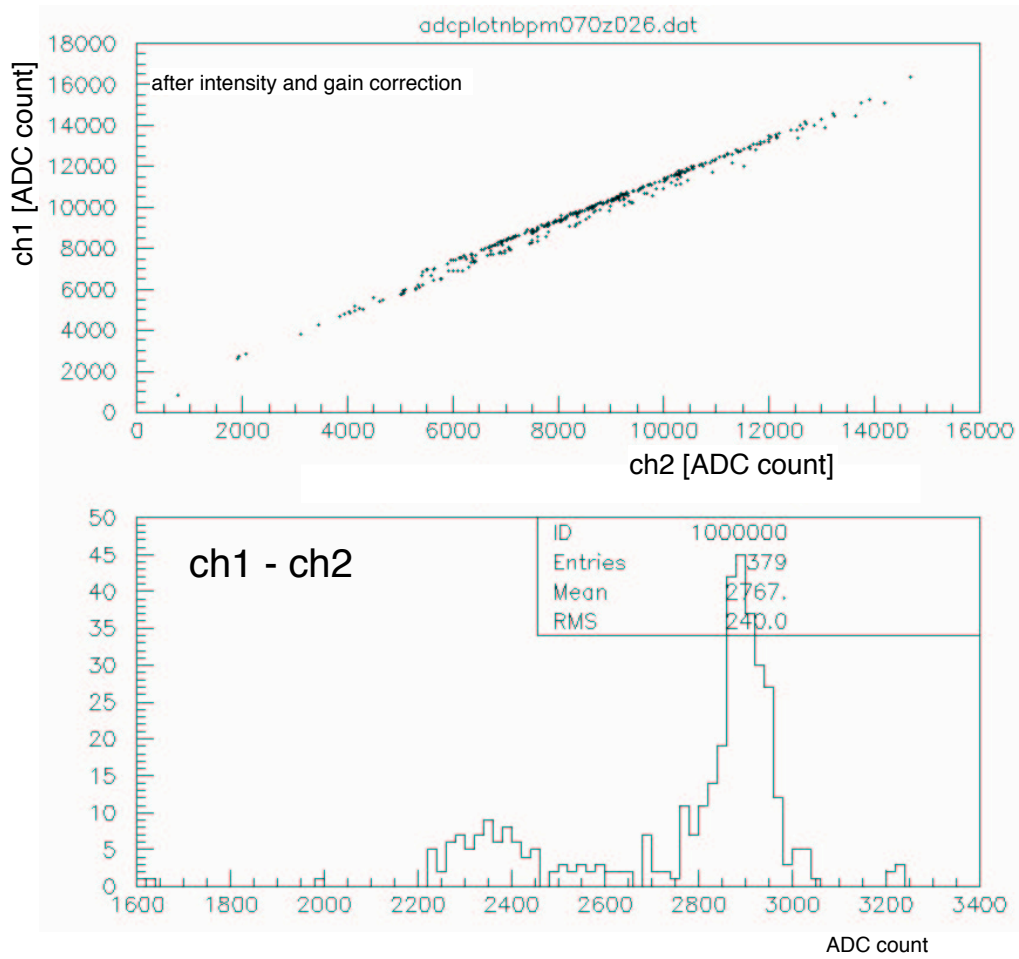


图 9: Modified cavity (0dB att.), I-phase detection

表 4: 結果 (original cavity, I-Q detection), () の数値は Q-phase との相関を補正後

attenuator	sensitivity (count/ μm)	ch1-ch2 fluctuation (count)	resolution (nm)
30	35.1	35.4 (35.4)	812 (812)
10		79.1 (28.1)	182 (65)
0		58.7 (29.0)	43 (21)

$\beta(\text{intensity}) + \gamma(\text{Q-phase readout})$ の相関が右上。修正後の residual の分布が右下。

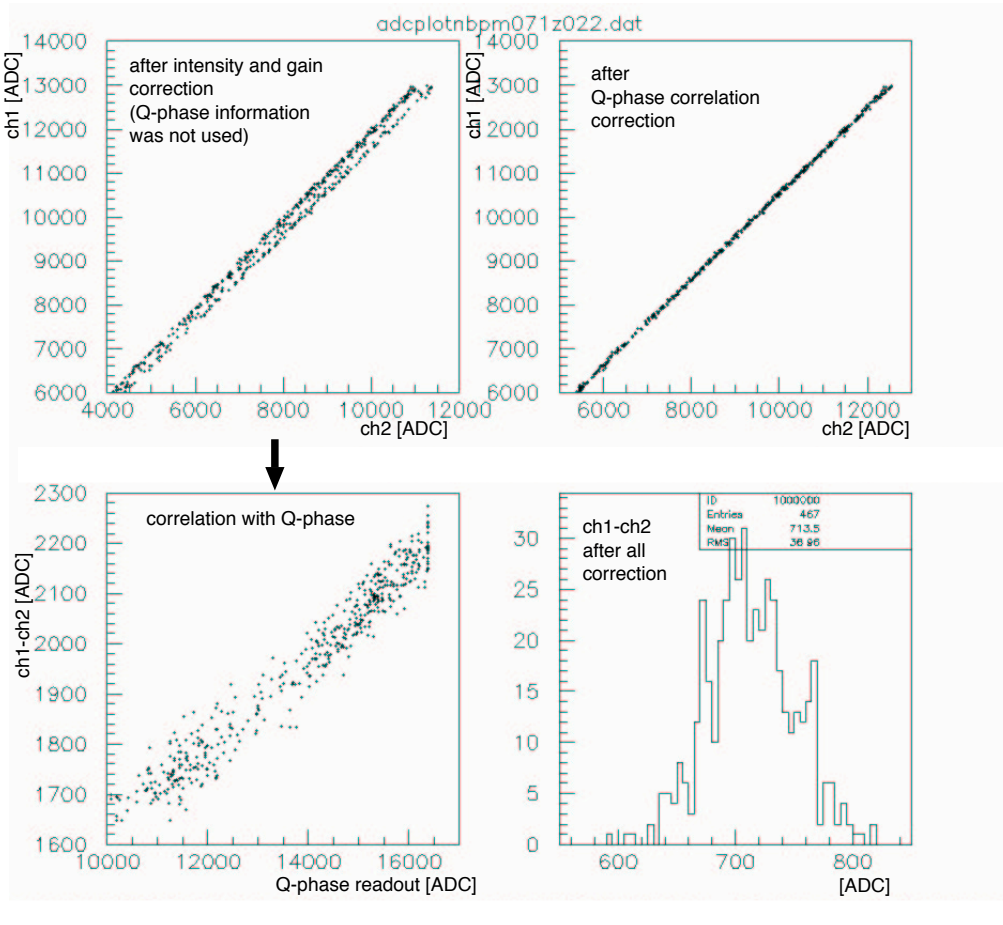


図 10: Modified cavity (0dB att.), I-Q analysis

図 7, 図 8 の緑のデータ点は I-Q detection セットアップに変えた後のデータについて Q-phase 情報の補正をしない解析での結果。青のデータ点は Q-phase 情報の補正まで適用した結果。青のデータは線に乗っていて、アテネータを減らした分だけ期待通り分解能が上がっていることが分かる。

表 1~表 4 に結果をまとめる。括弧内の数値は Q-phase 補正を適用した後の値。

5 考察

5.1 分解能の結果について

今回の実験では信号を2つに分配したことと、その為に余計に必要な splitter と短いケーブルでの減衰の効果で実際の場合より 4dB (factor 1.6) 程度信号を損していると思われる。また、実験時のビーム強度は 0.7×10^{10} e/bunch 程度であったので計算で仮定した強度より少し低い。これらを考慮すると、Q-phase の補正を適用した結果得られた 21~28nm 程度の分解能は、発振器でつくったダミー信号でテストした時の結果と一致している。残りの分解能はアンプノイズで説明が付く。

modified BPM と original BPM で分解能に差が見られないことから、以前の測定で分解能が上がりなかった原因は波形問題とは独立であろうと思われる。以前の結果、分解能 72nm はこの Q-phase の洩れの影響で大方説明できるであろう。

5.2 ビーム信号とダミー信号の違い

ダミー信号での実験では安定して同じ信号を発生させてテストを行うことができるので、1位相検出の方式でも問題無くアンプノイズ限界まで分解能が上がるが、ビーム信号の場合は直交位相成分が発生する要因が有り得る。その候補としては、

- ビーム軌道の角度
- バンチの進行方向の傾き
- x 方向の信号の回り込み

などが考えられる。(但し、定量的にはビーム軌道の角度ジッターでこれを説明するには 1~2 桁足りないと思われる。)

6 結論

100nm 以下の分解能を狙ってアテネータを外して行くと、位相調整の不完全さによる直交位相成分の洩れの影響で分解能が制限される。直交位相成分を検出し、その結果の補正を適用すればアンプノイズ限界まで分解能を上げることができる。