

Electronics for IP-BPM

Y.Honda

2006/1/12

概要

The detection electronics for IP-BPM has been designed. Considering the characteristics of the signal from the special cavity BPM, we decided to develop an upgraded version of the existing KEK electronics. We tried to leave as much redundancies as possible for future upgrade.

1 はじめに

IP-BPMの検出回路についてまとめる。IP-BPMの信号の特性を考えて適当なスキームを検討し、KEKでこれまで開発してきたシステムの改良版に対応する方式に決定した。より多くの情報を取得することと、開発実験がやりやすいようにシステム構成を考えた。

2 空洞

2.1 空洞のレイアウト

図1にビームラインでの空洞のレイアウト(2+2の構成)を示す。2つの全く同じIP-BPM本体と、周波数の異なった2つのReference空洞(X,Y)から構成される。1つ目のIP-BPM本体をIP付近に置き、2つ目のIP-BPM本体をその直下に置く。Reference空洞はどこか他の場所でも構わない。1つのIP-BPMブロックは2つのSensor空洞から構成されており、それぞれのSensor空洞はX,Y方向の位置を読みだせる。読みだしは1つのビーム位置方向につき逆位相の2つのコネクタ(0と π)がある。

ちなみに、必要最小限のセットアップは2+1なので、4つ目の空洞は無くても実験は可能である。

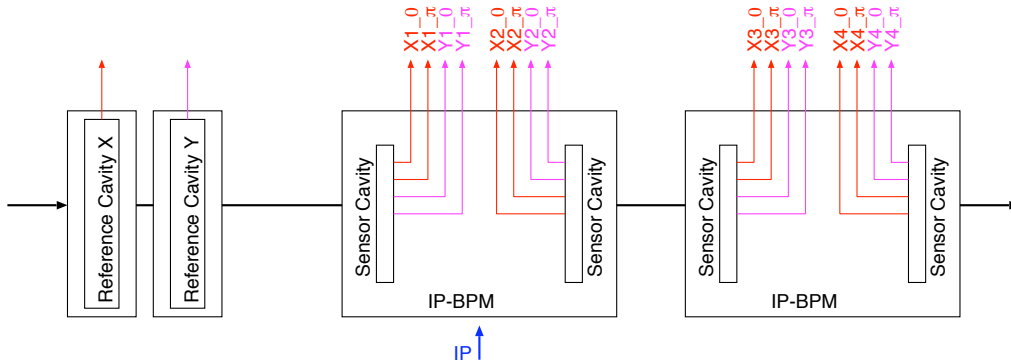


図 1: 空洞のレイアウト

2.2 空洞からの信号

期待される空洞からの信号について表 1 にまとめる。計算による Q_0, Q_{ext}, f (周波数) の値から $\beta = \frac{Q_0}{Q_{ext}}$ 、 $Q_L = \frac{Q_0}{1+\beta}$ によって Q_L を求め、 $\tau = \frac{Q_L}{2\pi f}$ によって信号減衰の時定数 (τ) を求めた。ただし、 τ はパワーが $1/e$ になる時間なので、振幅が $1/e$ になる時間は 2τ である。信号の強度は R/Q と Q_{ext} を用いてビーム通過直後のピーク値を計算した。図 2 に説明。

表 1: 空洞からやってくる信号

Cavity	f(GHz)	Q_L	τ (nsec)	signal power for 1 nm
Sensor X	5.712	3900	109	-101.6 dBm
Sensor Y	6.426	2400	59	-100.0 dBm
Reference X	5.712	8000	223	
Reference Y	6.426	8000	198	

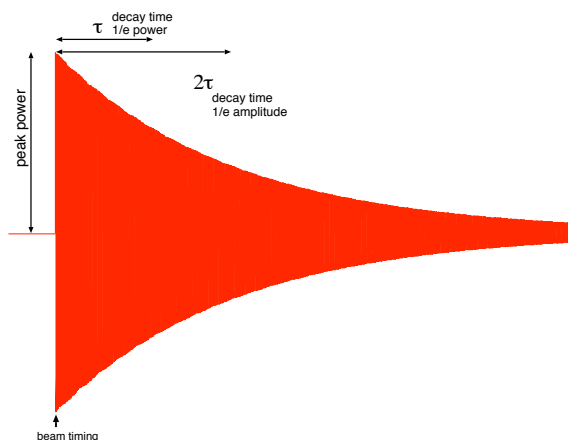


図 2: 空洞信号の説明

3 検出回路の検討

3.1 はじめに

これまでいくつかの検出方式が ATF でテスト/提案されてきた (図 3)。IP-BPM に対してはどの方式が最適かを検討する。

- SLAC nanoBPM の方式。CW の外部 L.O. を用いた 2 段のダウンコンバージョン。最後は周波数を残して高速サンプリングで波形を取り込む。Sensor と Reference を両方向同じように処理して解析で相対位相を導出する。波形の情報を残すので解析で頑張れる。L.O. が CW なのでセットアップはやりやすいが、L.O. がビーム同期されていなければ位相情報がぼっと見には分からない。最後に周波数を残すので適切にフィルターすればイメージ周波数のノイズは被らない。十分なサンプリングを得るために、比較的長い減衰時定数と高速の ADC が必要。
- ATF2 Q-BPM の方式 (SLAC nanoBPM Gen1 と同様)。(a) に対してコストパフォーマンスを上げるため、一段で周波数を落とす方式。イメージ周波数を除くフィルタを良く検討し、初段アンプにノイズ特性の良いものを用いれば (a) と同等の分解能がのぞめるはず。

(c) KEK 井上BPMの方式 (FFTBでの実験や、昔のフォーゲル方式と同様)。位相検出を Reference 空洞の信号で行う。位相を正しく調整しておけば、位置に比例した信号がそのまま出て来る。位相調整が正しく無いと、位置情報の感度が悪くなり角度情報の混ざり込みが発生し得る。最後は周波数を残さないで、折り返しノイズを 3dB 余計に被る。

(d) BINP で昔テストされた方式 (当初フォーゲルさんが提案したもの)。初段のダウンコンバージョンを Reference 空洞の信号で行う。最後の位相検出の L.O. が CW で出来るのでやりやすい。位相調整に関するところは (c) と同様。Reference 空洞のパワーが変動すると初段が影響を受ける。

いづれの方式でも理想的には分解能は初段アンプの熱雑音で決まるはずである。しかし、これまでの実績によると、良く設計された空洞を仮定して、適切なアンプを用いて、信号の減衰に気を付ければ、室温でも目標の検出感度は達成可能と思われる (3dB 程度のノイズの差は問題にならない)。位相調整やデータ収集のやり易さ次第できめてよい。

IP-BPMはこれまでの空洞 BPM と違う点は、

- 減衰時定数 τ が短く、Q-BPM に比べて約 1/3 である。
- 収束点であるため、角度信号が多く含まれる可能性がある。

減衰時定数が短いので、(a),(b) のような周波数を残す波形取り込み方式で十分なサンプリングを得るには更に高速の ADC が必要とされる。また、この方法では角度信号も込みで ADC に波形を取り込むので、大きな角度成分のせいで ADC が飽和したときに困る。一方、(c),(d) の方式のように ADC に入る前に位相検出すればこの問題は無い。初段はトンネル内に置かれるため (d) は面倒、その割にとくにメリットはなさそう。

(c) の問題点は、あらかじめ正確な位相調整が必要である点であるが、検出位相を複数にすれば原理的には波形情報が残るので位相調整が不完全でも解析で波形の再構成が可能である。必要十分には検出位相を 2 つ (I,Q) 用意すれば良い (図 4(a)) が、さらに増やして 4 つ ($-\pi/4, 0, \pi/4, \pi/2$) にすると (図 4(b))、位相調整が全く出鱈目でも、少なくとも一つは角度信号をあまり被らないチャンネルが存在することになるので、位相調整を気にしなくても良くなる。

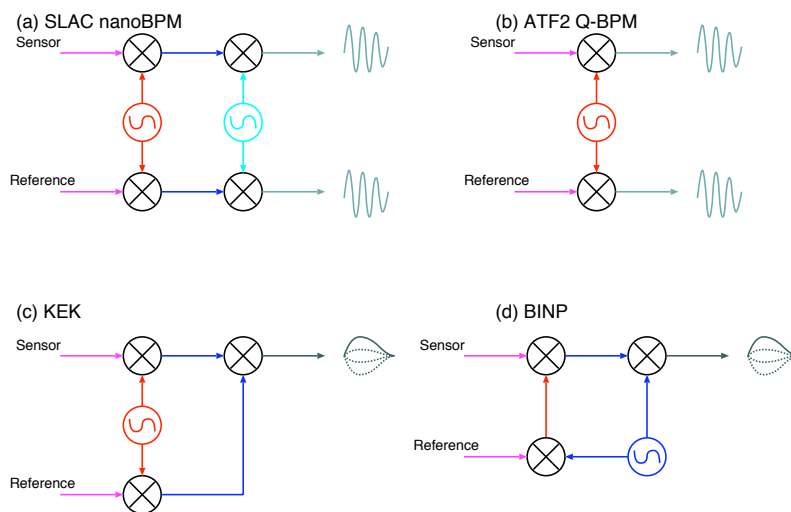


図 3: 検出方式の比較

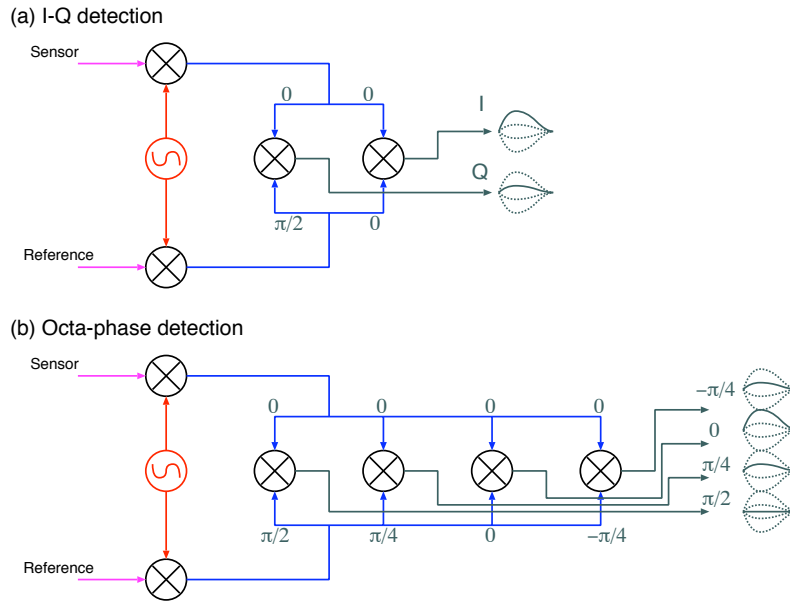


図 4: 複数位相での検出

3.2 設計する上での留意点

ATF2でIP-BPMの性格上、実験を行いながら、改良を続けて行くであろうから、出来るだけ拡張性を残して回路設計をする必要がある。モジュール外側の接続次第で、図3(c)に近いスキームから(a)に近いスキームに切替える余地を残しておいた方が良い。

帯域を最終的に制限するフィルターや信号レベルを調整するアテネータの類はモジュールの中には入れない。ダウンコンバージョンで使用するL.O.も外部から与えるようにする。

4 回路の構成

4.1 全体構成

設計した検出回路の全体構成を図5に示す。図中で四角に囲まれたものが物理的に一つのモジュールを意味している。また、線の色は信号の周波数を表している。最終的には、一つの空洞の一方方向の情報にたいして4つの位相データが記録される。

図6にそれぞれのモジュールの配置と必要なケーブルを示す。

4.2 Combiner

図7にCombinerモジュールの内部構成を示す。空洞の対面ポートからの逆位相の信号を逆位相で足し合わせることで信号を増大させると同時に余計なモードの打ち消しを期待する。また、BPFによって周波数選択して余計なモードを通過させないようにする。2入力の位相関係が崩れない為に、このモジュールは空洞の出来るだけ近くに置かれることが望ましい。基本的にはストリップラインによる回路であり電源を必要としないので、小さな箱になっていて空洞のそばに配置できる。

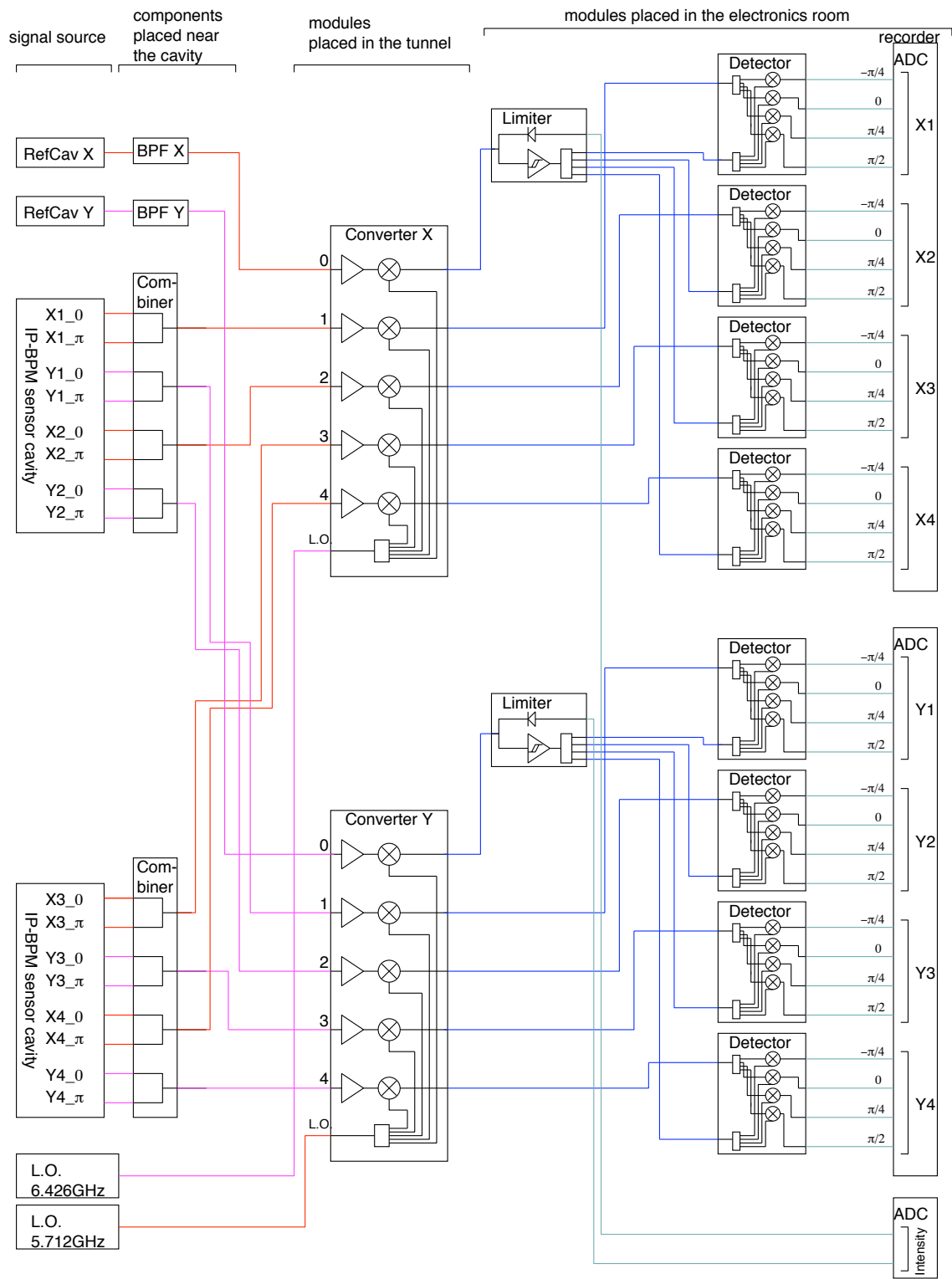


图 5: 全体图

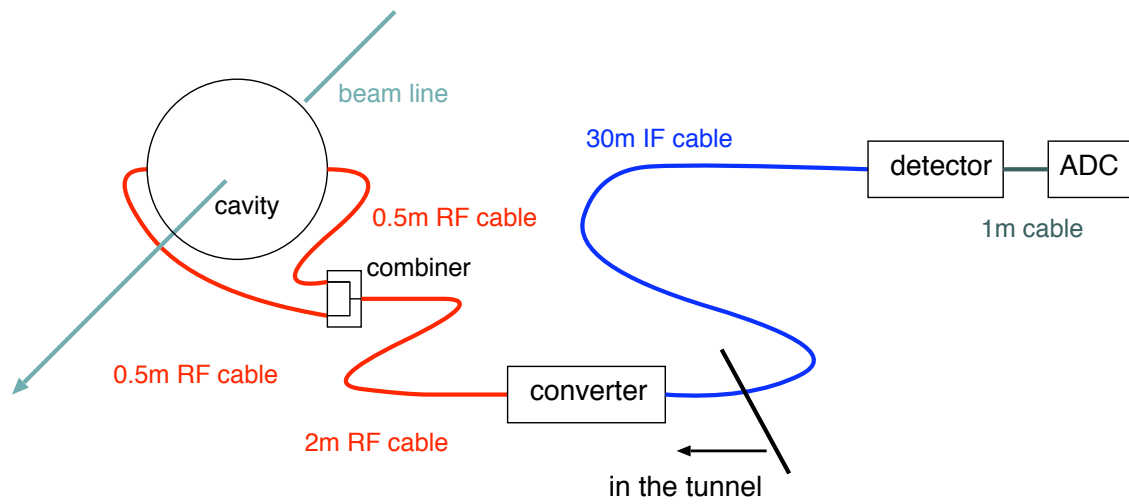


図 6: ケーブリング

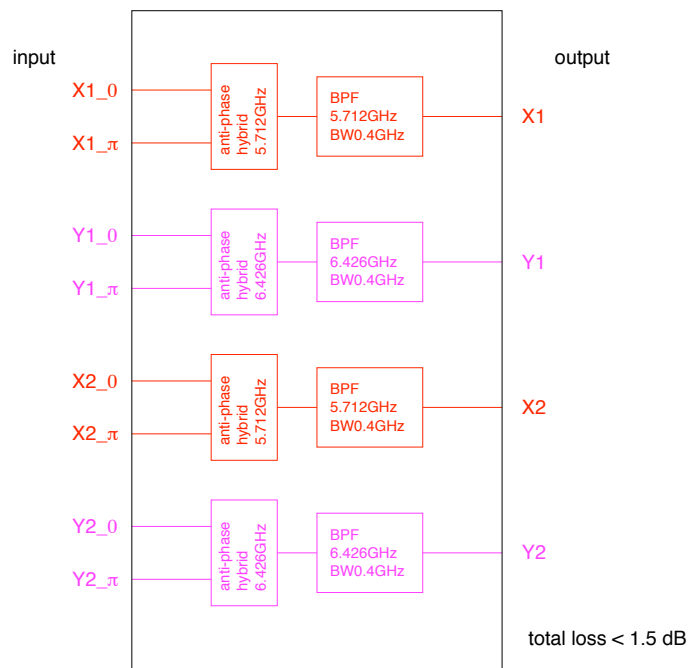


図 7: Combiner のブロック図

4.3 Converter

Converter はトンネル内、IP-BPM 空洞のある架台の横あたりに置かれる。C バンドの信号を 714MHz に変換する。空洞の周波数の違いにより、Converter は X 用と Y 用で少し違う。アイソレータと BPF の設計周波数の違いである。2 種類の Converter の内部構成を図 8 に示す。便宜上 ch0 を Reference 用、ch1~4 を Sensor 用と書いてあるが、5 つのチャンネルは全て同じ。ダウンコンバージョンに用いる L.O. は外部から与える。テスト等をやりやすいように入力は直接初段アンプに入るようにする。アンプ保護用の Limiter やレベル調整用のアテネータ等が必要となれば後から外付けする。

電源は初段アンプに供給する DC のみでそれ以外は受動デバイスである。初段アンプが雑音限界を決めるために、NF の出来るだけ良いものを使用する。実験が進んだ段階で必要となればアンプをさらに良いものに取り換えるといったことも考えられる。また、各段での特性等をチェックしたくなることが考えられるので、各コンポーネントは同軸入出力のものを使用することが望ましい。

出力は X 用,Y 用どちらも 714MHz なので、これ以降の回路に X,Y 依存はない。

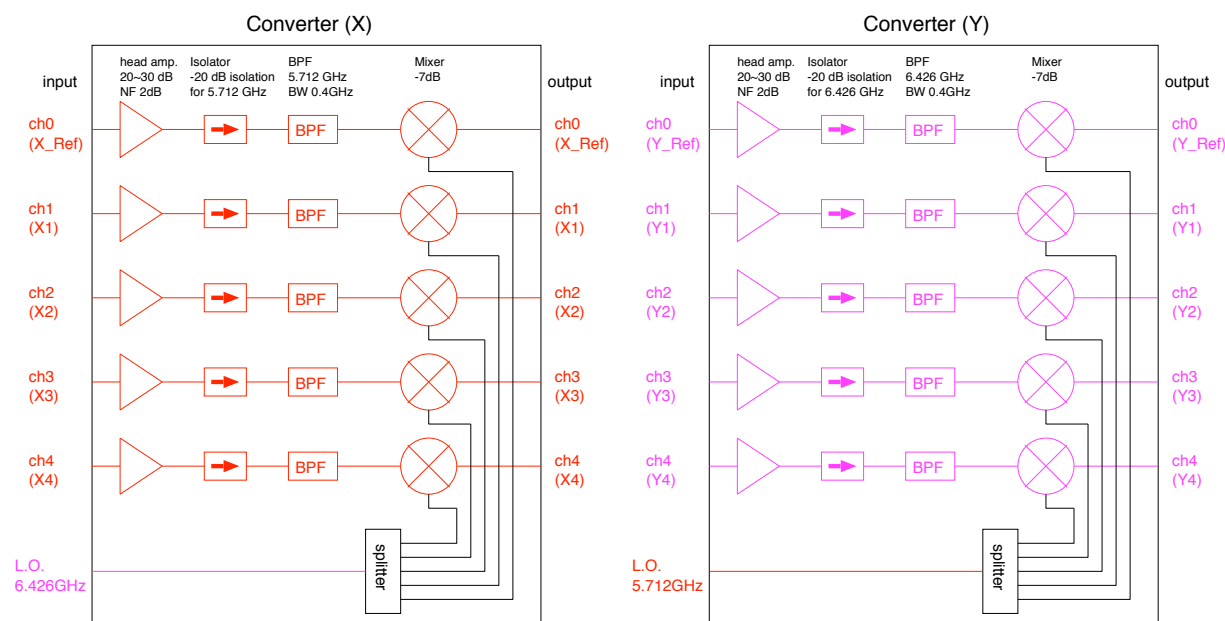


図 8: Converter のブロック図

4.4 Limiter

Limiter は、Reference の信号を処理するのに用い、2 つの役割がある。一つには、ビーム電荷の情報を取り出すために、入力信号を検波し振幅に比例した信号を出力する。もう一つは、次段の Detector で位相検出する際の L.O. を生成することである。Reference 信号が減衰してもレベルが変動しないように limiter アンプを用いてレベルを一定にした信号に変換する。図 9 にその構成を示す。

4.5 Detector

Detector で Sensor 空洞の信号の位相検出を行う。45 度づつずれた 4 つの位相で検出する。回路の帯域は一旦このモジュールの中の LPF の決める 100MHz に制限されるが、回路内部ではこれ以上厳

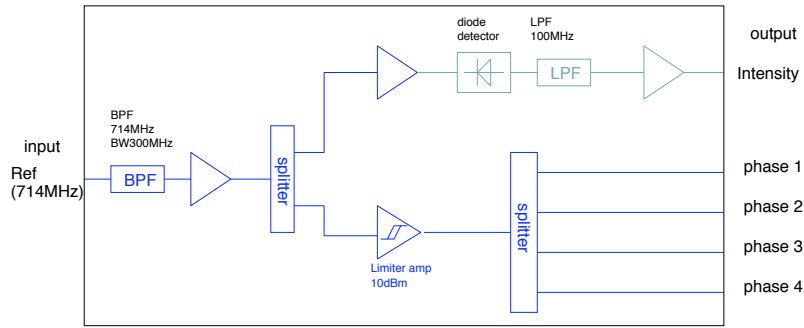


図 9: Limiter のブロック図

しい制限はつけないことにし、最終的な帯域は出力後に外付けされるフィルタなり、ADC のゲート幅なりで決まる。一応、検出位相は 360 度の範囲で調整できるようにされる。

出力は ADC に入力されるが、このときに信号のベースラインのオフセットを調整できるようにしている。

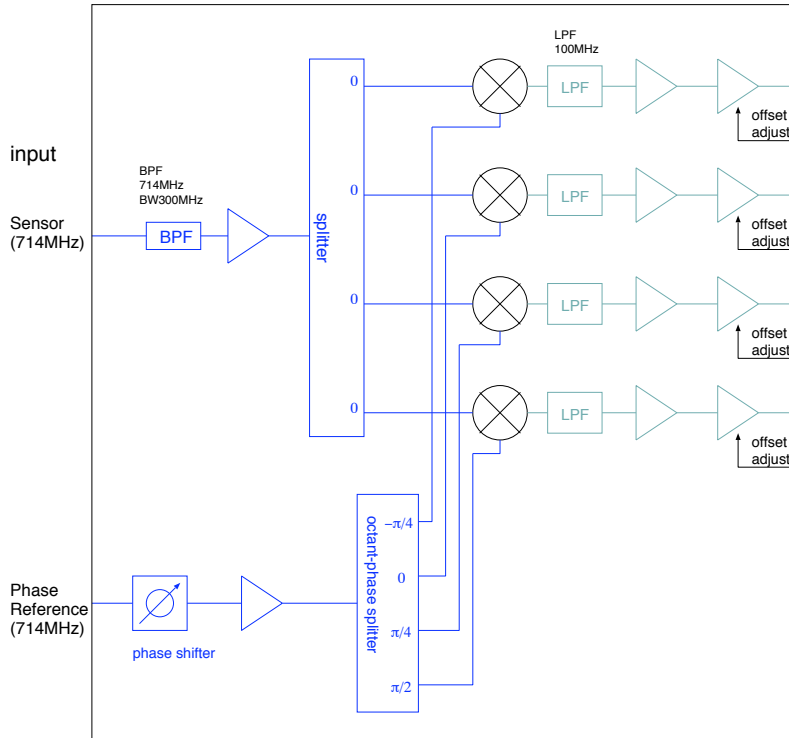


図 10: Detector のブロック図

4.6 ADC

ADC は KEK のシステムで現在用いているのと同じ 14-bit 電荷積分型 ADC を用いる。この ADC は正電圧信号に感度がないので、入力にはわざと負電圧方向にオフセットを加えておく。このためのオフセット調整機能が Detector の最後についている。図 11 に説明するようにビーム位置によって信号が上向きになったり下向きになったりするが、入力無しの状態では測定レンジの中程になるようにオ

フセットを設定することで、常に負電圧になるように調整する。

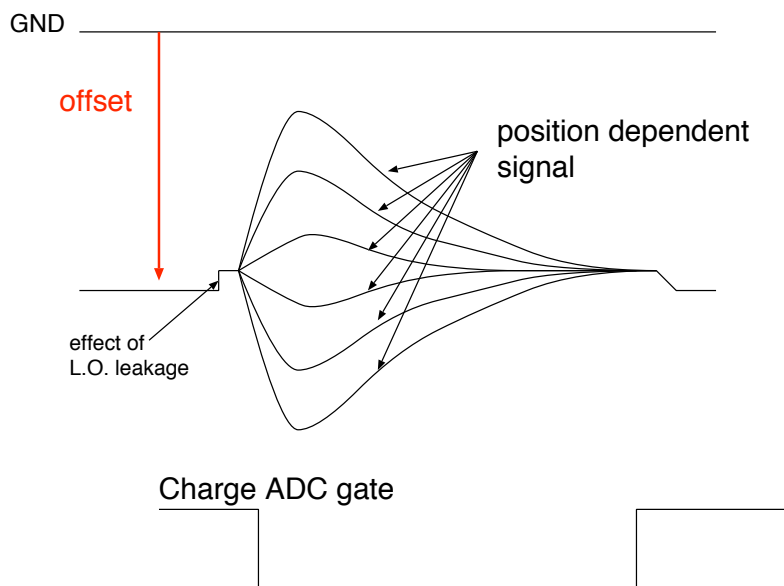


図 11: ADC への入力

4.7 その他

本質的に重要でない機能は出来るだけモジュールに取り込まないように設計したので、実験の初めの段階では図 12 に示すような外付部品をとっかえひっかえすると思われる。

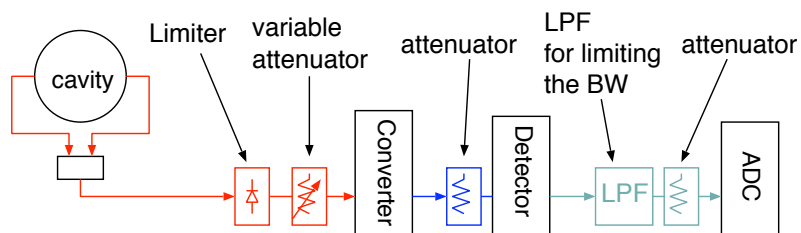


図 12: 外付が考えられるもの

5 改良の可能性

5.1 スキームの変更

高速の ADC が用意できれば、図 3(a) に近いスキームに切替えることも可能である。図 13 のように信号の接続のみで変更可能である。

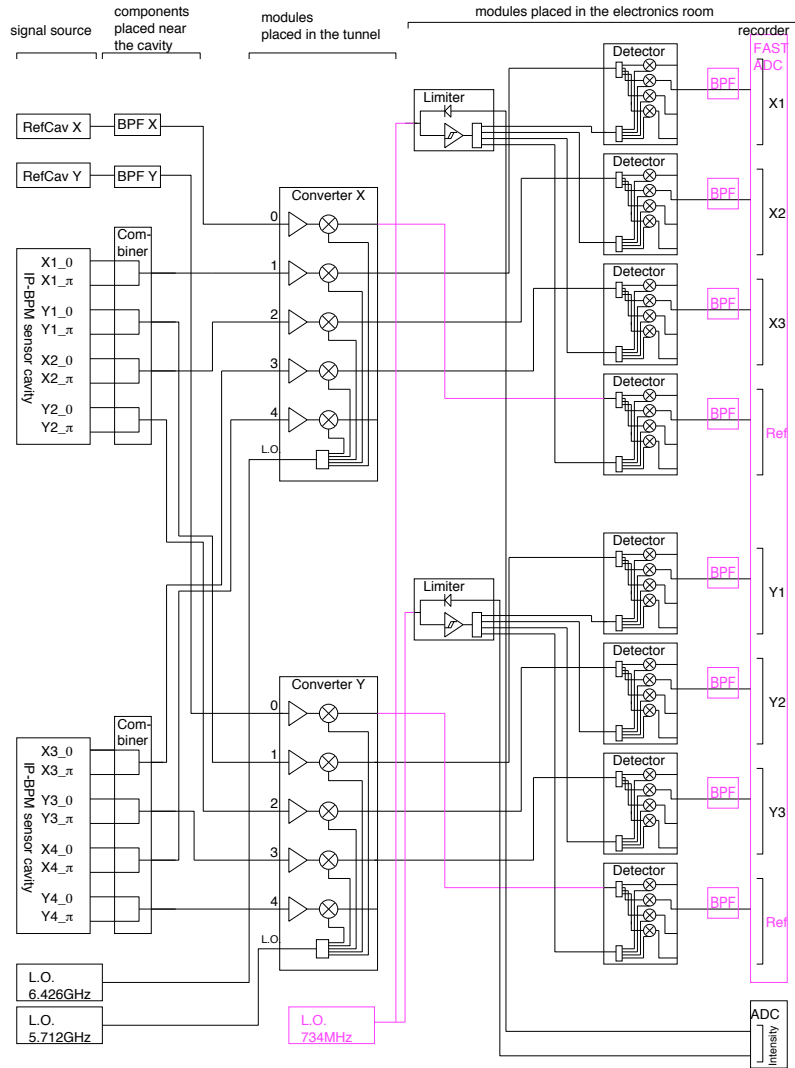


図 13: SLAC 流の検出システムへの切替え

5.2 測定レンジの拡大

ビームチューニングのときには広い測定レンジがあったほうがよいかもしれない。測定レンジを拡大するには一つには最初にあてねータを入れて信号を小さくする方法があるが、これだと分解能が犠牲になる。

信号減衰のテイルからの外挿によりアンプまたは ADC が飽和していても答えを出せるという方法を SLAC グループが行っているが、これに相当することが位相検出の場合でも可能である。単に ADC の数を倍にして 2 種類のゲートでデータを残せば良い (図 14)。

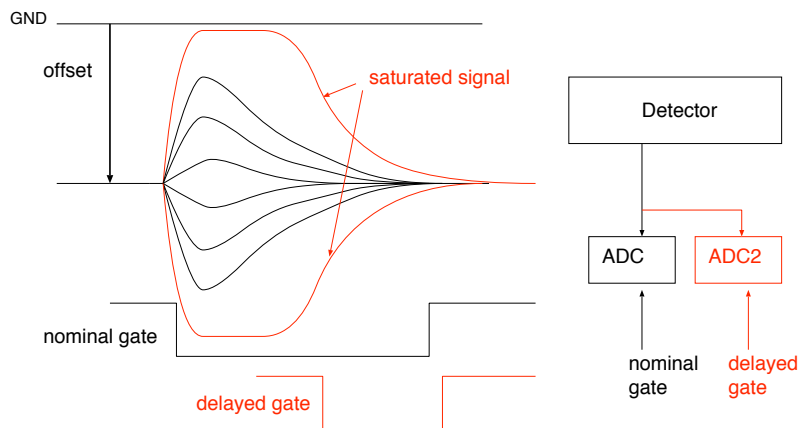


図 14: 2 種類のゲートによるレンジの拡大

6 まとめ

基本的には KEK の現存のシステムの改良版として設計した。大きな変更は、Detector の検出位相を 4 つに増やしたことである。その他は、空洞の周波数に対応して Converter の周波数の変更、外部からの L.O. の入力、Detector 出力のオフセット等である。また、将来の改良をやりやすくする為に本質的に重要でない要素はモジュールには含まないようにした。