

高速 DAC を用いた狭帯域マルチバンドスペクトルの発生源に関する研究

日大生産工(院) ○新海 晃生

日大生産工 中西 哲也

1. はじめに

重粒子線がん治療装置の主加速器であるシンクロトロンは粒子を周回させながら加速させる装置であり、加速後のビーム取り出し法として QAR 法が提案されている。この取り出し法は、RFKO 装置により高周波電界を加えてビームを拡散し、パルス四極電磁石(PQ)でビームを取り出す方法である。RFKO 装置での拡散は、周波数帯域が広いほど一様にビームを拡散できるが、アンプへの負担が大きくなるという問題がある。その為、拡散に寄与する複数の周波数バンドを有するマルチバンド(MB)スペクトルの使用が提案された[1]。

その MB スペクトルの発生方法として、アナログフィルタを用いた方法が実験されたが、必要とする狭帯域スペクトルの発生は難しいことが分かった。そこで、高速 DAC(Digital Analog Converter)を用いる方法を新たに提案し、予備実験を行った結果、狭帯域スペクトルが発生できることが分かった[2]。しかし、現有の DAC ではクロック周波数が任意に選べないことから、必要な周波数帯での発生はできないため、今回、DAC へ入力するデータを適切に処理することで必要なスペクトルを発生することができた。

本論ではその方法と実験結果について述べる。

2. マルチバンド RFKO システム

RFKO システムのブロック図を Fig.1 に示す。本例では MB スペクトルはアナログフィルタを使って作り出される。必要な周波数帯は約 1MHz~16MHz である。本システムでは Fig.2 に示すホワイトノイズ(WN)を必要な周波数帯を有する複数の BPF に通し、拡散に寄与しない周波数帯をカットした Fig.3 に示すカラードノイズ(CN)を複数作り、それぞれの出力を加算器で合わせ、アンプに入力する方法を用いている。図中には低域側(BPF1)と高域側(BPF10)の 2 つの周波数バンドの例を示している。実際は 10 個の BPF を通すことにより Fig.4 に示す MB スペクトルを発生させる。

これまでの試作実験では、MB スペクトルを発生させる原理実証は出来たが、必要な狭帯域を作り出すことは難しかった。そこで、今回は第 4 章で述べる高速 DAC を用いた方式について検討した。

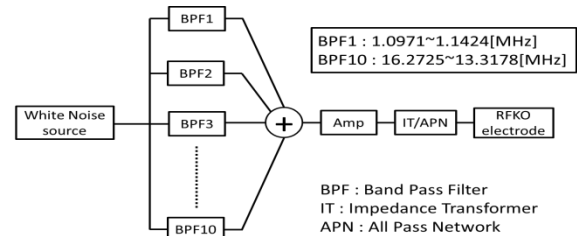


Fig.1 MB-RFKO system using analog filters

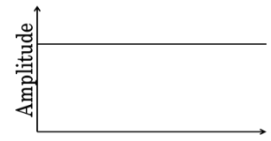


Fig.2 White noise

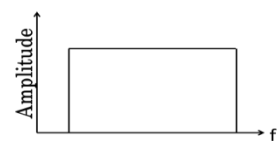


Fig.3 Colored noise

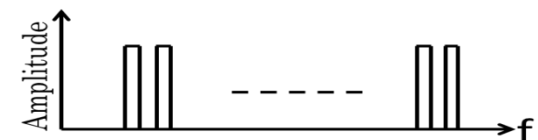


Fig.3 Multi-Band spectrum

3. デジタルカラードノイズの計算

1 バンドのデジタルカラードノイズは、デジタル入力信号を x_k で与えると以下の式から求めることが出来る。

$$y_k = \sum_{n=0}^{N_h} h_n x_{k-n}$$

ここで、 $N_h + 1$ はフィルタ係数の数、 h_n は BPF に対して次式で与えられる。

$$h_n = \frac{2}{\pi m} \cos(m\omega_0 T) \sin(m\omega_b T) \quad (m \neq 0)$$

$$h_0 = 4f_b T \quad (m = 0), m = n - \frac{N_h}{2}$$

$$\omega_0 = \frac{(\omega_H + \omega_L)}{2}, \omega_b = \frac{(\omega_H - \omega_L)}{2}$$

T は入力信号の間隔を与えるサンプリング周期、 f_H ($\omega_H = 2\pi f_H$) は高域遮断周波数、 f_L は低域遮断周波数である。また、 x_k はデジタルホワイトノイズに等価である $-1 \sim +1$ の乱数で与えた。バンド数 10 の MB スペクトルを作り出す為には、それぞれのバンドに対応する f_L 、 f_H を用いて計算し、それらを足し合わせる。この方式をシンクロトロンに適用する為には、 T を粒子の周回時間で規格化した値とし、 f_L 、 f_H は周回周波数で規格化した値とす

る。今回の計算では粒子はシンクロトロン の 47 箇所に等間隔に集中しているとしたので、 $T = \frac{1}{47}$ である。

フィルタ係数の数 $N_h=12000$ 、 $k=470$ 万、10 個の狭帯域バンドを $n+\frac{1}{3}$ 、 $n+\frac{2}{3}$ ($n=0\sim4$) 付近としてデジタルカラーノイズを計算し、次章の DAC のデータとして用いた。

4. 高速 DAC を用いた MB スペクトルの発生

高速 DAC を用いた MB スペクトルの発生方法を Fig.4 に示す。パソコン上で計算した前記データをメモリを有する高速 DAC に書き込み、外部からのクロック信号に同期させ出力させる。書き込んだデータは繰り返し連続的に出力される。クロック周波数は $T = \frac{1}{47}$ の場合、シンクロトロンの周回周波数は 3.483MHz なので、約 163MHz となる。しかし、本 DAC の最低クロック周波数は 250MHz である為、 $T = \frac{1}{47}$ のデータを使った場合、周波数スペクトルは $\frac{250}{163} \approx 1.53$ 倍の大きさになる。そこで、デジタルカラーノイズデータを作成する際に、高域・低域のそれぞれの遮断周波数を約 $\frac{1}{1.53}$ 倍した値にし、クロック信号に同期させ出力させることで、本来必要とする周波数スペクトルを発生させた。作成したデジタルカラーノイズデータをフーリエ変換した結果の全体図を Fig.5 に、バンド 1、バンド 10 の結果を Figs.6,7 に示す。それぞれの図の横軸は規格化周波数を表している。ここで、回転数は 10 万回転とし、それを 20 分割し、フーリエ変換した後足し合わせた。

DAC の出力をスペクトラムアナライザで確認した結果の全体図を Fig.8 に、同バンドを確認した結果を Figs.9,10 に示す。理想とする周波数帯にスペクトルが発生し、スペクトルを個々に拡大しても期待された結果が得られていることがわかる。

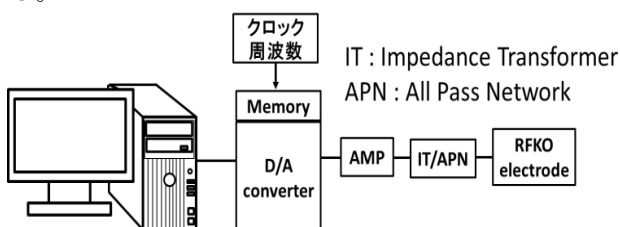


Fig.4 MB system using DAC

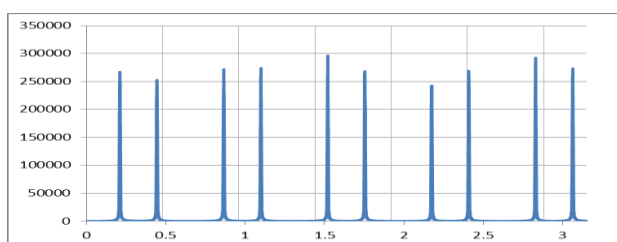


Fig.5 MB spectrum with normalized frequency



Fig.6 MB spectrum(band1)

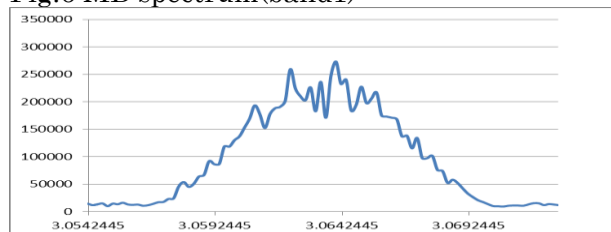


Fig.7 MB spectrum(band10)



Fig.8 MB spectrum

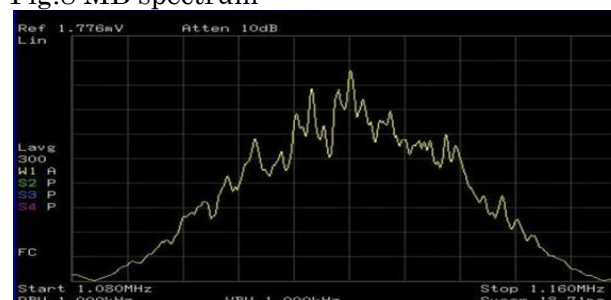


Fig.9 MB spectrum(band1)

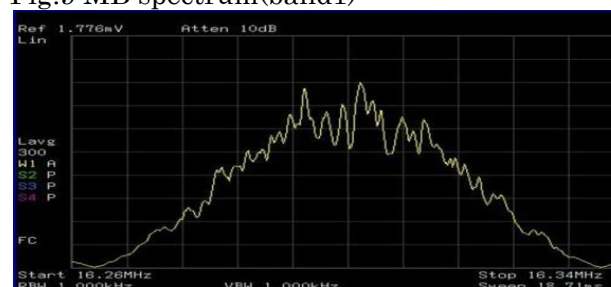


Fig.10 MB spectrum(band10)

3. まとめ

狭帯域の MB スペクトルを発生させる方法として、高速 DAC を用いた方法を検討した。その結果、拡散に寄与する周波数帯のみを有する MB スペクトルを発生させることができた。

[参考文献]

- [1] Nakanishi, Nucl. Instr. Meth. A621(2010)62-67
- [2] 新海晃生, 中西哲也: 平成 25 年度電気関係学会北陸支部連合大会(2013)A3-05