

[P8-39]

Frequency Characteristics of Fabry-Perot Resonator for Measurement of Electron Beam Waveform

Yoshiki MIZUSAWA, Takashi MIYASHITA, Shusuke NISIYAMA,
Satoshi TOMIOKA and Takeaki ENOTO

Division of Quantum Energy Engineering, Graduate School of Engineering, Hokkaido University
Kita-13 Nisi-8, Kita-ku, Sapporo, Hokkaido, 060-8628, Japan

Abstract

As a method to measure a micro-pulse width and a macro-pulse waveform of a LINAC electron beam, we evaluated the measuring method using a Fabry-Perot resonator. The Fabry-Perot resonator has a nature of a tunable band pass filter by choosing the distance between mirrors. To obtain the frequency spectrum of the beam, it is necessary to clarify the frequency characteristics of the resonator. In this paper, we show the frequency dependency of the distance between mirrors by the boundary element analysis.

ライナック電子ビーム波形測定のための ファブリ・ペロー共振器の周波数特性解析

1 はじめに

現在、電子ビームのパルス波形を測定する方法として、様々なモニタリングシステムの研究が行われている。モニタには接触型と非接触型があるが、接触型モニタは測定中の他の実験が困難であり、非接触で測定するには電子ビームの放射電磁界を測定する必要がある。

電界信号を測定する際、オシロスコープの帯域により電子ビームの波形を直接測定する事は非常に困難である。本研究では、フィルターとして使用する、ファブリ・ペロー共振器(以下、FPRと略す)による測定法の有効性を検討する。

FPRは鏡面間隔を変化させる事によってその周波数特性を変える事ができ、マイクロパルス幅を測定する際には単一周波数のフィルターとして、マクロパルス波形を測定する際には2種類の周波数のフィルターとして使用する。

2 電子ビームの分布

北海道大学 45MeV 電子線形加速から発生する電子ビームの進行方向の分布は加速器の加速原理より、幅数十 ps のパルスが 350ps 周期で繰り返す、またその微細構造パルス列全体も分布を持っ

ていると考えられる。

この微細構造パルス列を周波数空間で表すと、図1のように線スペクトルで表される。

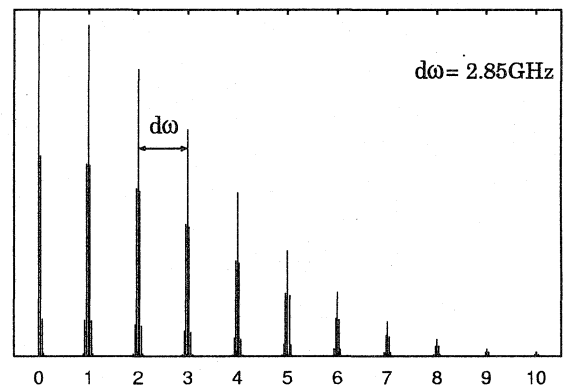


図1: 周波数スペクトル

この線スペクトルのエンベロープがマイクロパルス幅と関係しているため、周波数 2.85GHz の整数倍の周波数成分を単独で測定、つまりフィルタリングする事でスペクトルのエンベロープから、マイクロパルス幅の推定が可能となる。ただし、フィルターの挿入損失は共振器の鏡面間隔とともに、各周波数毎に異なることも考慮する必要がある。

また、マクロパルスの波形を再現するには各周波数成分の位相情報も必要となる。現在の測定方法では、アンテナで検出した信号を検波器を通し電力で測定しているが、それでは位相情報は失われてしまう。しかし、2つの周波数の波を検波前に合成し、それを検波する事でそれらの位相差を求める事ができる。

ライナック電子ビームのパルス波形を基本周波数 ($\omega = 2.85 \text{GHz}$) の重ね合わせで表すと次のようになる。ただしマクロパルス波形はガウス分布で簡略化した。

$$f_n(t) = e^{-at^2} \sum_{n=0}^{\infty} F_n e^{j(\omega_n t + \phi_n)} \quad (1)$$

例として基本周波数とそれに対して位相が $\Delta\phi = \phi_1 - \phi_2$ ずれた2倍高調波の時間波形をそれぞれ f_1, f_2 とすると

$$f_1(t) = F_1 e^{-at^2} e^{j(\omega_1 t + \phi_1)} \quad (2)$$

$$f_2(t) = F_2 e^{-at^2} e^{j(\omega_2 t + \phi_2)} \quad (3)$$

これらの合成波を f_{1+2} で表すと

$$f_{1+2}(t) = e^{-at^2} \{F_1 e^{j(\omega_1 t + \phi_1)} + F_2 e^{j(\omega_2 t + \phi_2)}\} \quad (4)$$

さらに式(4)の大きさをとる

$$\begin{aligned} |f_{1+2}(t)|^2 &= f_{1+2}(t) \cdot f_{1+2}^*(t) \\ &= e^{-2at^2} \left[\frac{F_1 F_2}{2} \cos\{(\omega_1 - \omega_2)t + (\phi_1 - \phi_2)\} + F_1^2 + F_2^2 \right] \end{aligned} \quad (5)$$

式(5)をマクロな分布 (e^{-2at^2}) も含めて積分した時、 $(\phi_1 - \phi_2)$ の項が残り、その値により最大値が変動する可能性がある。これを検出可能なら f_1, f_2 の位相差を求める事が可能となるが、フィルタとしての位相特性を求めておく必要がある。

これらの事から、解析により共振器の周波数特性を解析する事は重要となる。

3 解析

3.1 解析方法

本稿では解析方法として境界要素法[1]を採用する。境界要素法は、要素数について境界のみで与えるため解析領域をメッシュで刻む差分法や有限要素法より少なくすむ。従って、今回のよう

に開放領域を扱う場合は、境界要素法の方が有利である。

解析に於ける場の支配方程式は、マクスウェル方程式から導出される非同次ヘルムホルツ方程式 (u は電界、 b はソース項)

$$\nabla^2 u(\mathbf{r}) + k_0^2 u(\mathbf{r}) = b \delta(\mathbf{r}_s) \quad (6)$$

であり、式(6)にグリーンの定理を適用することで境界積分方程式が導かれる。

$$-c^i u^i - b G + \int_C G q ds - \int_C u \frac{\partial G}{\partial n} ds = 0 \quad (7)$$

q は u の法線方向微分 ($\frac{\partial u}{\partial n}$) である。基本解 G は

$$\nabla^2 G(\mathbf{r}) + k_0^2 G(\mathbf{r}) + \delta(\mathbf{r}) = 0 \quad (8)$$

を満足する解であり、その解を求めると0次のハンケル関数 $H_0^{(2)}(x)$ となり、関数 $J_0(x)$ と関数 $Y_0(x)$ により成り立っている。

$$\begin{aligned} G(\mathbf{r}) &= -\frac{j}{4} H_0^{(2)}(kr) \\ &= -\frac{j}{4} \{J_0(kr) - jY_0(kr)\} \end{aligned} \quad (9)$$

これらから式(7)の積分部分を離散化し数値計算すると、陰解法により領域中の場を求めることができる。

3.2 解析モデル

解析は図2の二次元モデルで行った。

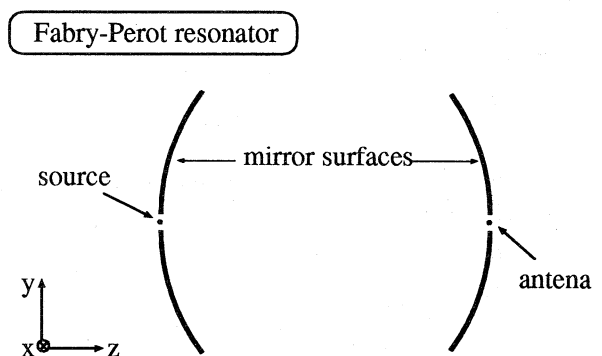


図2: 解析モデル

これは電子ビームから発生する電界が、電子の進行方向に対して垂直な成分が主であり、その電界を図2のスリットから入射させれば共振器中では x 方向にしか電界成分を持たないからである。

図中の左鏡面中心 (r_s) にソースとなる交流電流源を置き、共振器内に電磁波を入射させ、反対側鏡面のアンテナで測定する。評価するのは鏡面間隔を変化させた時のアンテナ位置での電界強度である。

3.3 解析結果

図3は5倍高調波までの解析結果である。共振器のサイズを、高さが20cm、鏡面の厚みが0.4cmとし、スリット間隔が0.4cmで鏡面間隔を8cmから19cmまで変化させた。ソースの電流値は1Aで規格化し、アンテナ位置での電界強度を求めた。

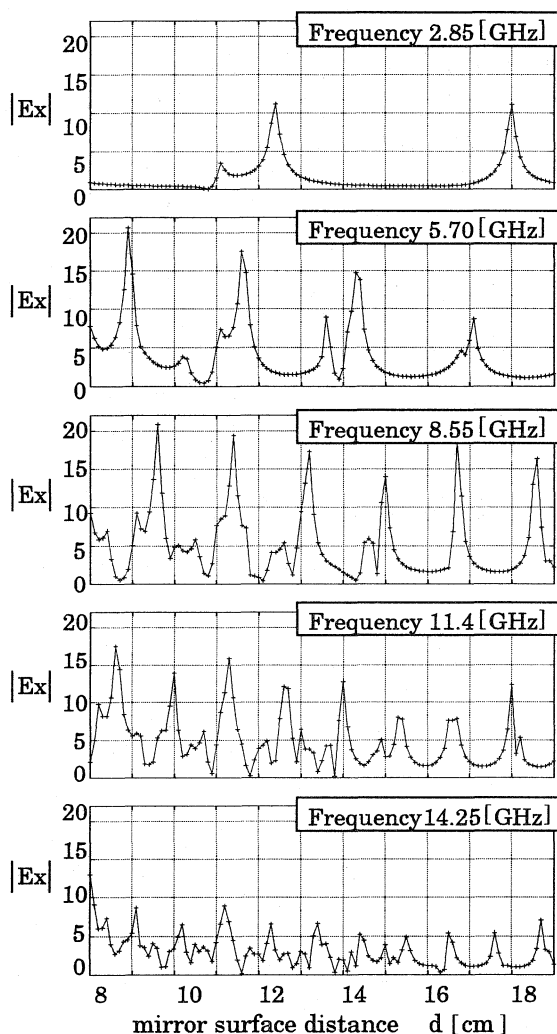


図3: 解析結果

図3より、各周波数で特徴的なピークが存在している。単独周波数しかフィルタリングしない鏡面間隔ではマイクロパルス幅の測定に利用し、2

種類の周波数の波をフィルタリングしている鏡面間隔ではマイクロパルス波形の測定に利用可能となる。

しかしソースを電流源で与えたため、位相までは解析できなかった。これを平面波で与えれば位相を含めた解析を行える。

4 まとめ

今回、LINAC 電子ビームの波形情報を評価する方法として、FPR を用いた測定方法を提案した。この測定方法はフィルタリングする組合せ、鏡面間隔の変化による周波数特性など自由度が高い反面、実際の測定の際に明らかにしておかなければならないパラメーターが多い。そのため解析及び予備実験によりそれらを明らかにしておかなければならない。周波数スペクトルについては解析により特性が明らかになったが、今後は位相を含めた解析まで行うつもりである。

参考文献

- [1] C.A.Brebbia, J.Dominguez 共著, 田中正隆, 松本 敏郎, 中村 正行 共訳: 「詳解 境界要素法」, オーム社 York, 1956 (246-252)