

スロットアンテナとラットレースリングを用いた電子ビーム測定技術の研究

株本 裕史¹、西山 修輔、富岡 智、榎戸 武揚

北海道大学大学院工学研究科 量子エネルギー工学専攻²

〒060-8628 北海道札幌市北区北13条西8丁目

概要

本研究室ではスロットアンテナで電磁界を検出する非接触型電子ビームモニターの研究を行っている。スロットアンテナは高速応答性、広帯域性、高S/N比などの優れた特徴を持つ。また、ラットレースリングとはマイクロ波領域の信号をマイクロ波のまま合成することができるハイブリッド回路で、2つのスロットアンテナで検出した信号出力の和と差をとることができるものである。

実験で求められた差の出力は、電子ビームとアンテナのなす角度に対し依存性を示した。この角度依存性を利用して電子ビームの方向を求めることができると思われる。

1. はじめに

現在、加速器は研究用だけでなく、医療用、工業用に広く利用されており、高精度なビームモニターが求められている。なかでも非接触型のビームモニターはビームに影響を与えずに測定できるので、実験中のリアルタイム測定も可能であり重要である。

本研究室ではこれまでスロットアンテナを用いた非接触型ビーム位置モニターに関する研究を行ってきた。スロットアンテナは金属板に幅の狭いスロット（またはスリット）を開け、そのスロットの中央付近に適当な周波数の電力を給電すると放射を生じるもので、電子ビームによって作られる電磁界を検出できる。さらに高速応答性、広帯域性、高S/N比などの優れた特徴を持っており、航空機や船舶用レーダのアンテナ、各種フェーズドアレイアンテナや平面アンテナの放射素子として広く応用されている。

これまでの研究でスロットアンテナの諸特性やビームモニターとしての実用性が評価されており、その実用化の可能性が十分あることが報告されている。

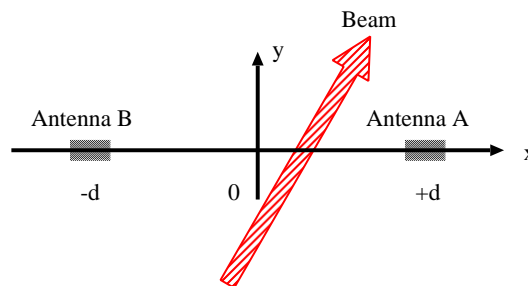


図 1: 1次元ビーム位置測定の実理

2. 一次元方向のビーム位置測定

電子ビームが作る電磁場の強度はビームからの距離を r とすると r^{-1} に比例するので、電子ビームを挟むようにおいたスロットアンテナで電磁界を測定すると、その強度比から1次元方向のビーム位置を求めることができる。以前は2つのスロットアンテナからの信号をそれぞれ検波器に通した後、強度比をとりビーム位置を求めていた。

$$x = d \left\{ \frac{2}{1 + \left(\frac{V_A g_{k_B}}{V_B g_{k_A}} \right)^{\frac{1}{n}}} - 1 \right\}$$

V_A, V_B : A、Bにおける検出器の出力

g : 電子ビームに起因する比例係数 (例: ビーム電流)

k_A, k_B : 測定系に関する比例係数 (例: 検出器の感度)

これまでの方法に比べて、より微小なビームの変動を捕らえる可能性がある方法としてラットレースリングを使用した。ラットレースリングとはマイクロ波領域の信号を扱えるハイブリッド回路で、検波する前に信号の和、差を求めることができるものである。

¹E-mail: kabu@athena.qe.eng.hokudai.ac.jp

²URL: <http://tyche.qe.eng.hokudai.ac.jp>

3. ラットレースリング

ラットレースリングは図2のような形状をしており、2つの入力ポートと2つの出力ポートをリング状の伝送路で結合したものである。理想的には各入力ポートからの信号はリング内を順方向と逆方向の信号で分離され、出力ポートには入力ポートからの距離に応じた位相で重ね合わされた信号が出力される。よって特定の周波数の信号を入力ポート1に入力した場合は同相、等出力の信号に分離されて2つの出力ポート2、4から出力される3dB方向性結合器として動作する。しかし、入力ポート3に入力した場合は逆相、等出力の信号に分離されるといった特徴があり、ポート1、3に同時に信号を入力した場合、出力ポート4からは同相で重ね合わさった信号が、出力ポート2からは逆相で重ね合わさった信号が出力される。つまりマイクロ波領域において2つの信号の和と差をとれることがラットレースリングの特徴である。

相対論的電子ビームが作る電界は平面波であるため、2つのスロットアンテナを結ぶ直線と電子ビームが直交していなければ、アンテナで測定される信号の位相にズレが生じることになり、ラットレースリングで合成された信号にも影響を与えるものと思われる。本研究ではこのときの影響を実験で確かめた。

4. 実験

実験は北海道大学 45MeV LINAC を用いて加速周波数 2.856GHz、パルス幅 10ns、繰り返し周波数 1p.p.s の条件下で行った。ラットレースリングは加速周波数の2倍高調波である $f = 5.71\text{GHz}$ を設計周波数として製作したものを使用した。電子線加速器のビーム取り出し窓から 500mm の地点にビームを挟むように2つのスロットアンテナを設置し、スロットアンテナ A、B からの信号をそれぞれラットレースリングのポート 1、3 に入力した。ポート 2、4 からの合成させた出力信号をバンドパスフィルタ (中心周波数 5.71GHz) に通した後、検波器で検波しアンプで 10 倍に増幅し、オシロスコープで測定したデータをコンピュータに取り込めるようになっている。アンテナ保持部は XY ステージに取り付け、ビームと垂直方向に移動できるようになっており、ビーム位置を変化させた時の和信号と差信号の出力を測定した。アンテナとビームとのなす角度を変化させて同様の測定を繰り返した。

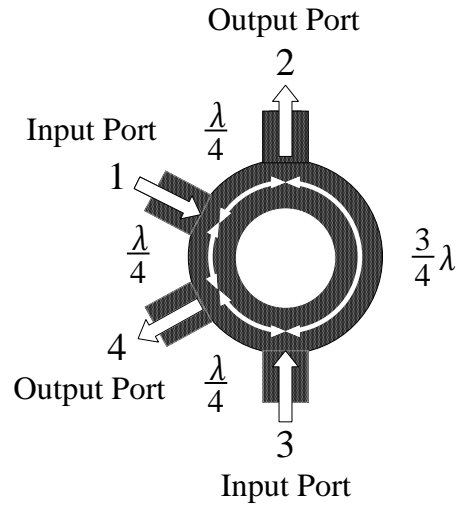


図 2: ラットレースリング

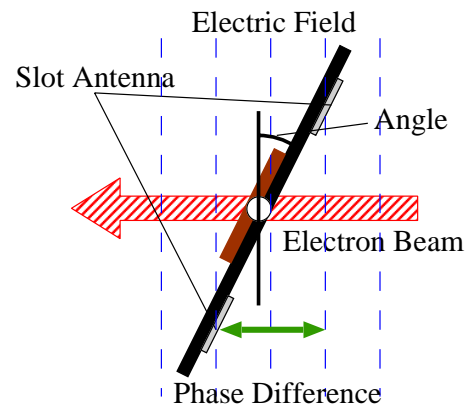


図 3: 相対論的電子ビームの作る電界

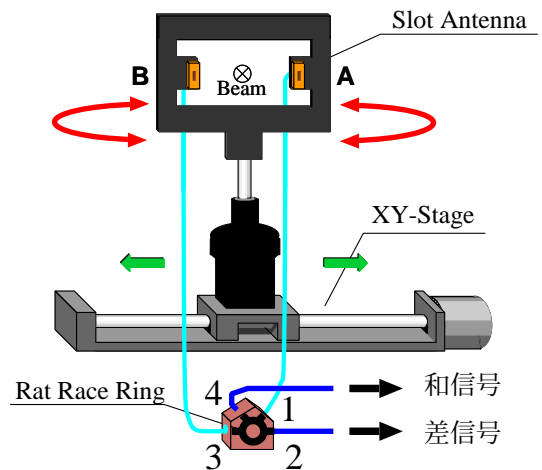


図 4: 実験体系

5. 結果と考察

測定結果の一例をグラフに示す。図5の横軸はビーム位置 [mm] であり、縦軸はラットレースリングからの出力電力 [dBm] である。図5よりラットレースリングの差信号の出力がアンテナの角度に依存性があることが確認できた。アンテナの角度が0°の時に差信号が極小値をとる位置とビーム中心とが一致した。

図6の横軸はアンテナとビームとのなす角度であり、縦軸は和信号と差信号の出力電圧比 R の最小値である。

$$R = \frac{V_{\text{dif}}}{V_{\text{sum}}} = 10^{\frac{P_{\text{dif}} - P_{\text{sum}}}{20}}$$

P_{dif} : 差信号 [dBm] P_{sum} : 和信号 [dBm]

差信号が最小出力を取るアンテナ位置には角度依存性があり、あらかじめ和信号と差信号との出力電圧比 R とアンテナ角度 θ の関係を調べておけば、出力電力比が最小になる位置を求めることでアンテナとビームとの角度を測定できる。

6. 今後

今回の実験では、電子ビームの位置や向きをスリット等で制限したわけではないので、ビームの一部が取り出し窓で散乱された状態で計測されている。今後は、スリット等を用いて向きを制限した状態での実験を行い、その特性を把握し、さらに逆問題的にエミッタモニターへの応用を検討している。

また、スロットアンテナは導体で構成されており、導体板を電子ビーム軌道近傍に設置した場合、その周辺電界へ影響を与える可能性がある。その時の影響を有限差分時間領域法 (FD-TD 法) を用いて解析を行うことを検討している。

参考文献

- [1] J.Reed, G.J.Wheeler : A Method of Analysis of Symmetrical Four-Port Networks
IRE Transactions on Microwave Theory and Techniques, pp.246-252, October 1956
- [2] Steven March : A Wideband Stripline Hybrid Ring
IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, p.361, June 1968
- [3] Johnny W Hansen, Mads Wille : A Fast Non-Intercepting LINAC Electron Beam Position and Current Monitor
Nuclear Instruments and Methods vol.197, pp.259-263, 1982

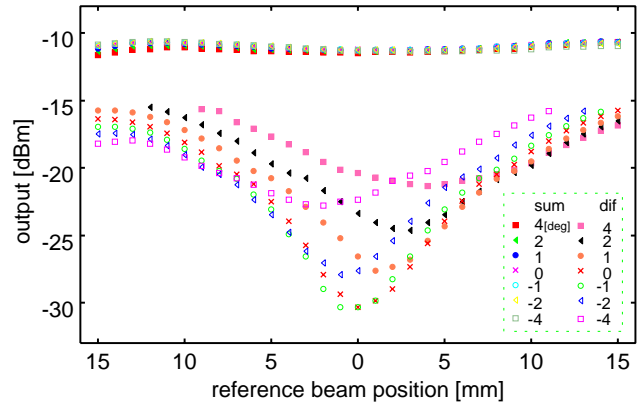


図5: ラットレースリングの出力電力

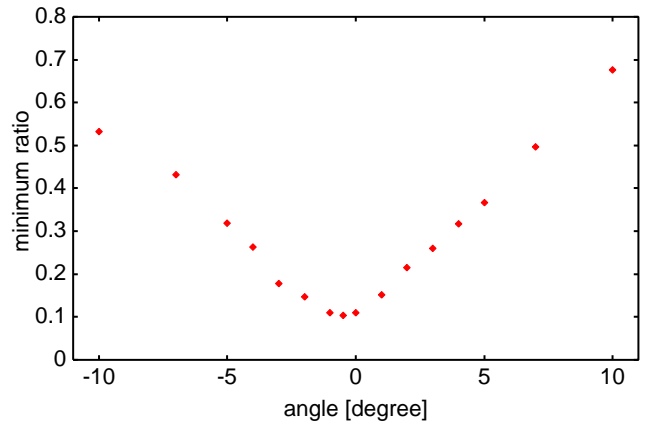


図6: アンテナ角度と出力電圧比の最小値