



高周波回路の解析・設計理論の整備と対応ソフト開発

—電磁界問題から回路問題へ—

平岡 隆晴¹

許 瑞邦²

Construction of high frequency circuit analysis/synthesis theory and development of the corresponding software

Takaharu HIRAOKA¹

Jui-Pang HSU²

1. 電磁波を用いた高周波回路の重要性

現在 電磁波・光波は、高速性・広帯域性・低損失性を生かして高速情報伝送・処理、高機能を持った高集積・微細化高周波回路及び光回路の実現に貢献している。具体的には携帯電話、放送衛星、電算機、レーダ、センサー、CATV、光ファイバ通信、電波時計等のエレクトロニクス機器、アンテナシステム等各方面での回路として、頻繁且つ広範囲に活用されている。従って、この種の回路の電磁界の動作を解明し、電磁界の動作に基づいた合理的な高周波回路を設計する必要がある。

2. 高周波回路の解析・設計の難しさ

高周波回路は電磁波回路とも呼ばれ、回路の3次元構造に対して、所与の境界条件下で動作電磁界を解析することにより、高周波回路の入出力応答を計算することができる。従来、所与の境界条件下での3次元電磁界解析は困難な問題であったが、現在では強力・安価な計算機と有力な数値手法（有限要素法、有限差分時間領域法）に基づくソフトにより解析が可能となり、高周波回路の入出力応答も計算できる。しかし、現行の高周波回路の設計は、集中定数回路理論（零次元）あるいは伝送線路理論（1次元）に基づいているが、実際の回路構造は3次元立体構造となっているので、この差を埋めるために最終的には試行錯誤法に基づいて設計・開発にならざるを得ず、膨大な時間・労力が必要になる。従って、現在高周波回路の3次元構造に適した合理的な高周波回路設計法の開発が期待されている。

3. 厳密な等価回路の導入

合理的な高周波回路の解析・設計を機能的に実行するために、電磁波回路の等価回路を導出することが有効と考える。電磁波回路は導波路部分、機能実現部分及び結合部に分割できる。この3個の部分に対して、本研究では厳密な電磁界解析を実行し等価回路を導出する。

(1) 導波路の電磁界解析は導波路断面に課された境界条件下での固有値問題に還元され、この固有値問題を解くことにより無限個の固有伝送姿態と固有値が得られる。この結果、固有伝送姿態に対応して無限個の姿態対応伝送線路が等価回路として得られ、各伝送線路の回路定数（特性アドミタンス・伝搬定数）は固有値より得られる。

(2) 機能実現回路の電磁界解析は、回路構造に課された境界条件下での固有値問題に還元され、この固有値問題を解くことにより無限個の固有姿態と固有値が得られる。この結果、固有伝送姿態に対応して無限個の姿態対応共振器が等価回路として得られ、各共振器の回路定数（共振周波数・イミタンス）は固有値より得られる。

(3) 導波路と機能実現回路との結合の等価回路は多開口理想変圧器で表現され、回路定数である変圧比は導波路の固有伝送姿態と機能実現回路の固有姿態との重ね合わせ積分で与えられる。

4. 研究の進め方

本研究では「高周波回路の解析・設計理論の整備と対応ソフトの開発」の研究を3段階に分けて実行する。

- (1) 導波路の等価回路導出理論の整備とソフト開発
- (2) 機能実現回路の等価回路導出理論整備とソフト開発
- (3) 等価回路に基づく高周波回路の設計

5. 当面の課題—導波路の等価回路の導出

マイクロ波・光波で頻繁に使用される導波路を図1に示す。ここでは、光波伝送で使用する方形断面誘電体導

¹ 准教授 電気電子情報工学科

Associate Professor, Dept. of Electrical and Electronic Information Engineering

² 客員研究員 工学研究所

Invited Researcher, Research Institute for Engineering

波路及びマイクロ波伝送で使用されるマイクロストリップ線路を取り上げ、平面回路理論に基づいて以下のステップで研究を進めている。

1) 導波路の固有姿態を決定する理論の構築

導波路の伝搬定数を仮定すると Maxwell の電磁界方程式に変数分離法が適用でき、導波路断面に関する2次元電磁界方程式系が得られる。一般に導波路断面は電磁界を閉じ込め外部に放射されない構造（金属壁乃至屈折率差に基づく電反射壁）を持っているので この境界条件を2次元電磁界方程式系に課すると固有値問題が形成される。この問題を解くと固有伝送姿態と固有伝搬定数が計算できる。ここで扱う導波路は電磁界が高さ方向に閉じ込められているので Maxwell の電磁界方程式より導出された平面回路方程式を使用するのが適切である。この式にしたがうと基づいて方形誘電体線路及びマイクロストリップ線路の等価回路は図2で与えられ、その固有値方程式は次の行列方程式であたえられる。

$$\begin{bmatrix} \mathbf{Y}^{HH} & \mathbf{Y}^{HE} \\ \mathbf{Y}^{EH} & \mathbf{Y}^{EE} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{V}^H \\ \mathbf{V}^E \end{bmatrix} = 0$$

2) 対応ソフトの開発 固有値方程式の固有値と固有ベクトルを求めるソフトを作成すると等価回路に基づいて断面座標の関数として全電磁界が求まる。更に求めた電磁界は任意定数倍の自由度があるので 伝送電力が単位電力になるよう電磁界の正規化を施す。

3) 具体的な適用 ここでは方形断面誘電体導波路で中心電気壁で横幅を変えたときの基本姿態から 13 次までの固有伝搬姿態の実効屈折率の計算結果を図3に示す（水平垂直偏波高さ姿態 30 個考慮）。幅 2μm の導波路で基本姿態（中心電気壁）の電磁界成分は断面の関数となっているのでその状況を等高線表示で図4に示す。

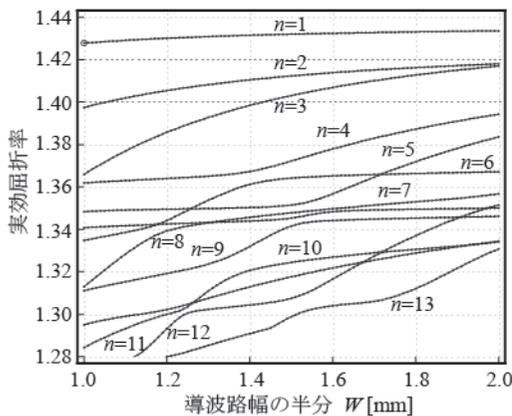


図3 方形断面光導波路の低次の実効屈折率 (中心電気壁 1次—13次)

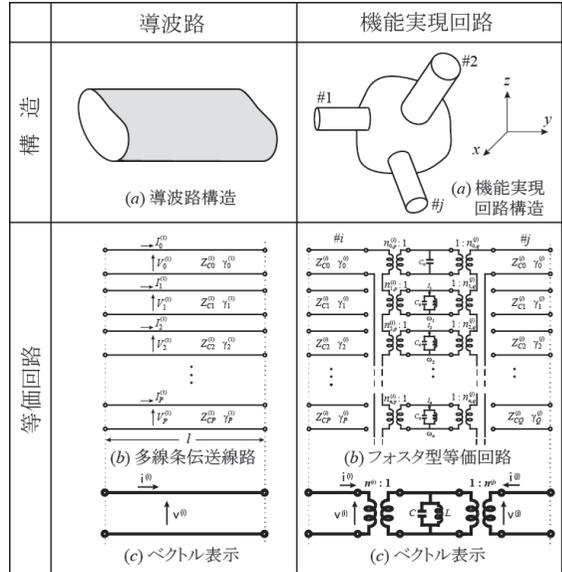


図1 導波路と機能実現回路の等価回路

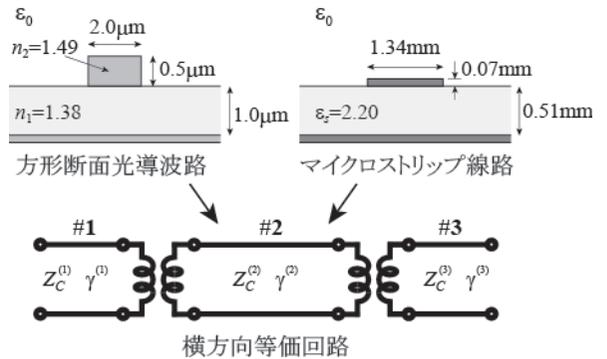


図2 解析対象導波路構造と横方向等価回路

謝辞 穴田名誉教授及び陳春平准教授にお世話になりました。

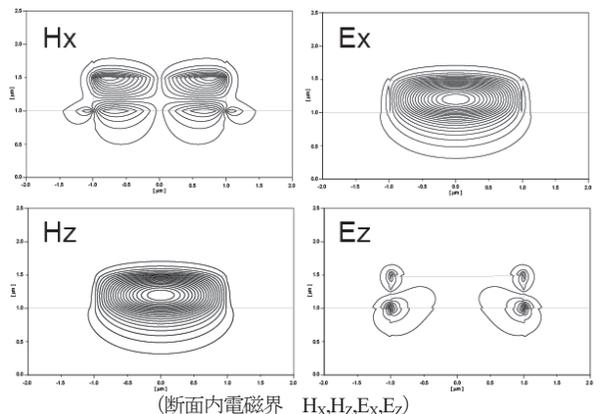


図4 方形断面光導波路基本姿態の電磁界分布 (基本姿態の実効屈折率=1.427713)