

次世代無線通信を支えるマイクロ波・ミリ波・テラヘルツ・光パッシブデバイスの理論設計と応用—結合行列理論による電磁波回路の設計—

陳 春平* 穴田 哲夫** 武田 重喜**

Theoretical Design and Applications of Microwave, Millimeter-wave, Terahertz, and Optical Passive Devices for Next-generation Wireless Communications - Design of Electromagnetic Circuits by Coupling Matrix Theory -

Chun-Ping CHEN* Tetsuo ANADA** Shigeki TAKEDA**

1. 緒言 (研究背景と意義)

マイクロ波・ミリ波レーダや衛星通信分野において、基本的デバイスである導波管や同軸線路型フィルタの設計法が Matthaei らによって成書にまとめられてから 50 年ほどが経つ[1]。一方、近年の無線通信システムの目覚ましい進展に伴って無線で光通信と同程度の情報量の処理が要求されており、携帯電話や自動車衝突防止などの民需の広がりと共に周波数の逼迫に直面し、マイクロ波からミリ波領域、さらに将来的にテラヘルツ波までシームレスな技術開発が望まれている。その実現に向けて基本的なデバイスである帯域通過フィルタの高性能化が重要となってくる。すなわち帯域外においても非常に高い帯域阻止性能が近接するチャンネルへの干渉や近接するチャンネルからの干渉を防ぐために要求される。しかし、文献[1]の設計理論は電磁波回路技術者にとっては理解し難く、周波数の有効利用の観点から急峻な周波数選択特性を実現する飛び越し結合などの取り扱いには特別な手続きを考慮しなければならない。一方 1970 年代からの集積回路化の流れと共に小型・軽量・高密度実装に適した新しい平面的プリント基板構造の実用化が普及し、あらゆる構造に対応した新しい合理的な設計法として結合行列理論が注目されている[2, 3]。ここでは筆者らが提案する MPhC 周期構造による電磁波閉じ込め壁を用いた 2 ポート共振器型帯域通過フィルタを結合行列法に基づいて設計する方法を概略する。なお、結合行列の概念は、ソースと負荷から内部共振器への直接結合に対応するように行列演算によってトポロジー間の変換が可能であり、最適なトポロジーを見つけることができる。さらに結合行列の定式化を行うことにより実用的なフィルタ特性をより正確に決定することにつながり、

複数の非隣接結合を持つ非常に複雑なフィルタも実現できるようになる。なお、マイクロ波フィルタは入力側に電源（信号源）とその内部抵抗、そして出力側には負荷抵抗が接続された 2 ポート回路で表現される。従って、フィルタ回路では電力透過係数 S_{21} と反射係数 S_{11} を用いて周波数特性を評価する。

2. 結合行列に基づく MPhC 構造帯域通過フィルタの設計と計算

低損失プリント回路基板(PCB)のビアホールの周期的な配列で構成される正方格子金属フォトニック結晶(MPhC)構造は比較的広いバンドギャップを持ち、小型、軽量、高 Q 回路、且つ高密度集積などの多くの利点を持っている。それ故、将来のミリ波・テラヘルツ波領域において、種々の電磁波デバイスを実現するためのプラットフォームとして大きな可能性を秘めている。本報告では、マイクロストリップ励振による 6 段正方格子 MPhC バンドパスフィルタを Ka 帯で結合行列の局所最適化手法によって合成する[4]。この設計では、Step Tuning Method(STM)と呼ばれるコンピュータ支援に基づく構造パラメータのチューニング法が用いられる（ページ数の関係より、詳細は別の機会に報告する）。

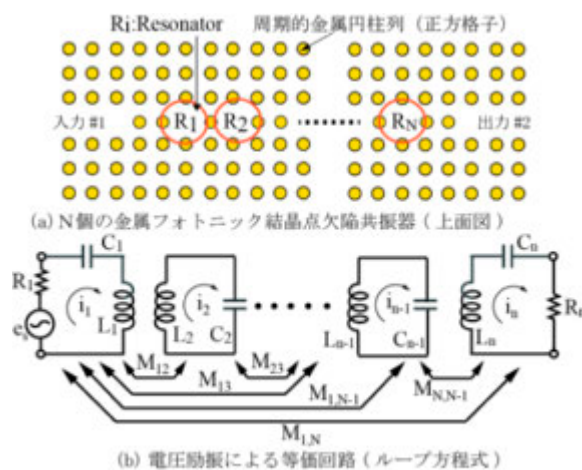


図1 MPhC 誘導結合型共振器のモデルとその等価回路

*准教授 電気電子情報工学科

Associate Professor, Dept. of Electrical, Electronics and Information Engineering

**客員研究員 神奈川大学工学研究所

Guest Researcher, Research Institute for Engineering

図1 (b)に基づいて電圧励振のループ方程式を整理すると式(1)の行列方程式を誘導することができる. また式(2)のS行列より回路の周波数特性が得られる. 非対称誘導性結合単一ポストによる直接結合共振器形6段BPFを実現すべき設計仕様は以下の通りである.

- (1) フィルタの次数: $N=6$
- (2) 動作周波数 $f_0=28.0\text{GHz}$. 線欠陥導波路の管内波長は 9.55mm .
- (3) 帯域幅: $BW\approx 2.50\text{GHz}$, 比帯域: $FBW\approx 9.0\%$
- (4) 帯域内リップル: $L_{Ar}\approx 0.04\text{dB}$, 反射損失 $L_R\geq 20\text{dB}$

上記の仕様を満たす inline 形原形低域通過フィルタの結合行列 $[M]_{N+2}$ を求めると, チェビシェフ関数より, 式(3)が得られる.

$$\begin{aligned}
 & [-jR + \Omega W + M][I] = [A][I] = -j[e] \quad (1) \\
 & [R]: (N+2) \times (N+2) \text{ matrix, two unity entries } R_{11} = R_{N+2, N+2} = 1 \\
 & [W]: (N+2) \times (N+2) \text{ identity matrix, with } W_{11} = W_{N+2, N+2} = 0 \\
 & [M]: (N+2) \times (N+2) \text{ fully-canonical coupling matrix.} \\
 & \Omega = \frac{\omega_0}{\Delta\omega} \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right) \text{ is the normalized frequency.} \\
 & I \text{ is the vector of loop currents.} \\
 & e \text{ is the excitation vector. } e = [1, 0, \dots, 0]^t \\
 & \text{Transmission and reflection coefficients:} \\
 & S_{21} = -2j[A^{-1}]_{N+2, 1}, \quad S_{11} = 1 + 2j[A^{-1}]_{1, 1} \quad (2) \\
 & [M]_{N+2} = \begin{bmatrix} S & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & L \\ 1 & 1.06 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 0 & 0.897 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 3 & 0 & 0 & 0.63 & 0 & 0.60 & 0 & 0 \\ 4 & 0 & 0 & 0 & 0.60 & 0 & 0.63 & 0 \\ 5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.63 & 0 & 0.897 \\ 6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.897 & 1.06 \\ L & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1.06 \end{bmatrix} \quad (3)
 \end{aligned}$$

3. 非対称誘導性結合共振器型帯域通過フィルタの合成結果

前節で述べた回路の構造パラメータに基づいて, 市販の電磁界シミュレータで周波数特性を精密に計算し, 6段非対称単一誘導性金属ポストBPFを日本の第5世代の無線システムにおける中心周波数 $f_0=28\text{GHz}$ で設計した. 実際に設計した MPhC-BPF の構造パラメータを図2に示す. また6段BPFの合成結果および電磁界シミュレーション結果を図3(a), (b)に与える. 周波数特性はよく一致していることが分かる. なお, MSL と MPhC 導波路との遷移部は準TEMモードから準TE₁₀モードに整合するように調整する. ここではテーパ構造を用いて, できる限り最短, かつ挿入損を小さく抑えられるように最適化している. その結果, テーパ幅 W は入力線路 (50Ω) のほぼ2倍, テーパ長は $T_p \approx 5.2\text{mm}$ に設定した (遷移部は入出力の共振器との結合度にも影響する).

4. 結言

PCB基板上に周期的ビアホールによって金属フォトニック結晶を構成し, その1列を除去した線欠陥導波路内に, 非対称誘導性金属ポストによる共振器の従属接続による6段のMPhC-BPFを設計し, 電磁界シミュレータによる周波数特性と共に結合行列の理論特性と比較

した. これらの結果は実際にフィルタを作製・測定し, 良く一致していることを確認している.

5. 参考文献

- [1] Microwave Filters, Impedance-Matching Networks, and Coupling Structures, by George L. Matthaei, Leo Young, and E. M. T. Jones. Published (1964) by McGraw-Hill Book Co., Inc.
- [2] R. J. Cameron, C. M. Kudsia, and R. R. Mansour, Microwave filters for communication systems: fundamentals, design, and applications Wiley-Interscience, 2007.
- [3] J. S. Hong and M. J. Lancaster, Microstrip filters for RF/microwave applications Wiley, 2001.
- [4] 陳, 佐藤, 張, 穴田, 結合行列に基づく金属フォトニック結晶構造による準ミリ波帯域通過フィルタの合理的設計, 電子情報通信学会論文誌 C, J103-C, pp. 356-365 2020年08月01日.

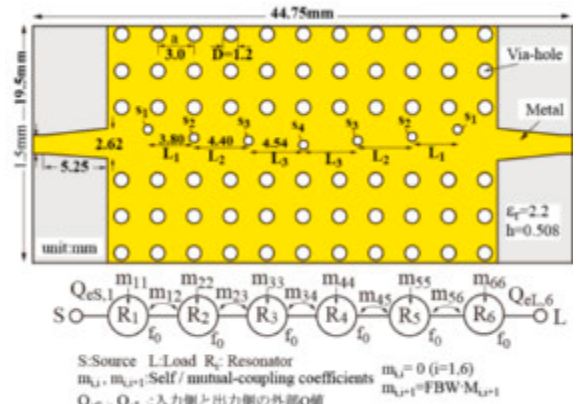
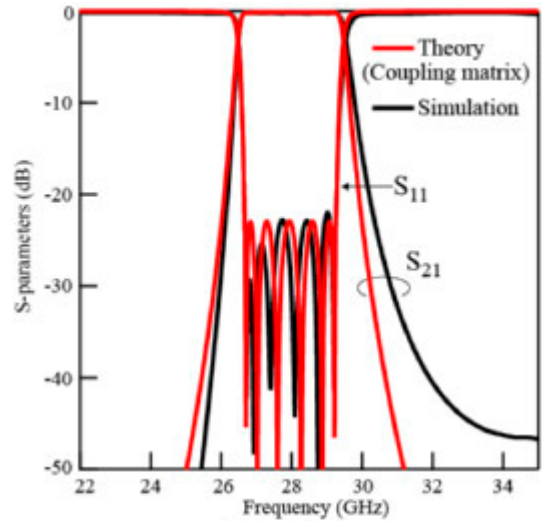
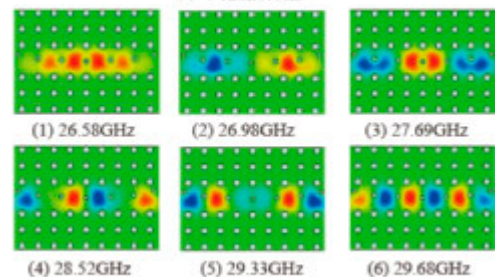


図2 金属フォトニック結晶による誘導性ポスト結合共振器形フィルタ構造と結合トポロジー



(a) 周波数特性



(b) 帯域近傍の動作モードの電界分布

図3 MPhC 6 段帯域通過フィルタの合成結果