

マイクロ波伝送線路フィルタの MLP による代替モデルに関する検討 A Study on MLP-Based Surrogate Modeling for Microwave Transmission Line Filters

細川 皓平[†] 竹沢 恵[†] 松崎 博季[†] 真田 博文[†]
Kohei Hosokawa Megumi Takezawa Hiroki Matsuzaki Hirofumi Sanada

1. はじめに

伝送線路フィルタは高周波通信システムにおいて重要な役割を果たしており、近年の無線通信の発展に伴い、その役割はますます重要になっている。伝送線路フィルタの設計では電磁界の複雑な振る舞いのため理論解析が困難な場合も多く、通常は FDTD 法などの数値シミュレーションに頼らざるを得ない。このようなシミュレーションは高精度である一方、計算時間が長く、設計最適化に多大な時間を要することが課題となっている。このような課題を解決するため、機械学習を用いた代理モデルの提案が盛んに行われてきた。中でもマルチレイヤーパーセプトロン (MLP) は、その汎用性の高さの実装の容易さから、高周波回路の特性予測において有望な手法として注目されている。本研究では、MLP を用いて伝送線路フィルタの周波数特性を高速に予測する代理モデルの構築を目指している。本研究では、まず基礎的な検討として、理論的に特性が明確な分布定数回路を対象に MLP の性能評価を行った。具体的には、単一および縦続接続された分布定数回路の特性を近似できる MLP モデルを構築し、その予測精度を検証した。その結果、MLP を用いることで分布定数回路の特性を十分に近似できることを確認した。

2. 伝送線路フィルタの周波数特性

電磁界解析において有効とされる数値解析手法はいくつかあるが、高周波を対象にしたシミュレーションには FDTD 法が有効であるとされる。FDTD 法はマクスウェル方程式を時間と空間で離散化して電磁波の伝搬と散乱をシミュレートし、様々な形状のフィルタ設計においても周波数応答を正確に求められる利点がある。反面シミュレーションが大規模になる程、コンピュータリソースを使い、計算に時間がかかる。高周波フィルタの設計においてシミュレーションは必要不可欠だが上記の問題があることから、それを解決するため代理モデルをニューラルネットワークで作成する試みがある。一度作成した代理モデルをシミュレーションに使うことで大幅な効率化が期待できる。ここでは縦続接続型の伝送線路で構成されたローパスフィルタの設計に MLP を用いることを目標にして、その性能の確認を行う。FDTD 法による学習データの収集の前に、どの程度の近似性能を発揮するかを確認するために分布定数回路理論による単純な構造を用いて、回路パラメータと周波数特性を対応させた学習データを生成し、MLP モデルを構築する。

3. 対象とする回路

図 1 に示す均一な一区間の分布定数回路を考える。線路の区間長は l_1 、特性インピーダンスは Z_{c1} とする。伝播定

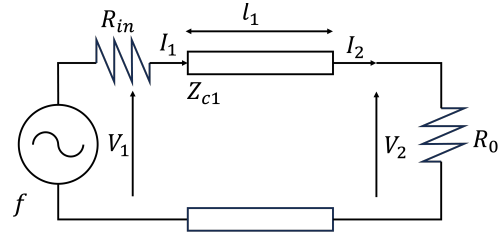


図 1: 分布定数回路のモデル

数を γ とすると、縦続行列は式 (1) で表される。

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma \cdot l_1) & Z_{c1} \cdot \sinh(\gamma \cdot l_1) \\ \frac{1}{Z_{c1}} \cdot \sinh(\gamma \cdot l_1) & \cosh(\gamma \cdot l_1) \end{bmatrix} \quad (1)$$

FDTD 法を用いて構造パラメータと入出力の周波数特性の関係を得る場合にも S 行列表現を用いることから、ここでも、S 行列による取り扱いを行う。S 行列は、縦続行列と以下の関係を持つ。

$$S_{11} = \frac{A + \frac{B}{R_{in}} - C \cdot R_{in} - D}{A + \frac{B}{R_{in}} + C \cdot R_{in} + D} \quad (2)$$

$$S_{21} = \frac{2 \cdot R_{in}}{(A + \frac{B}{R_o} + C \cdot R_o + D) \cdot R_o} \quad (3)$$

4. 数値実験

まず始めに、図 1 に示した単一の分布定数回路について MLP モデルで学習を行うことを考える。MLP の構造は入力層、4つの中間層、出力層の計 6層の構造とした。入力層は、入力データ (f, Z_{c1}, l_1) を受け取るために 3 個のニューロンを持つ。中間層の数は検討の余地があるが、ここでは 4 層の構造とした (中間層のニューロン数はそれぞれ 256, 128, 64, 32 とした)。出力層は、散乱パラメータの S_{11}, S_{21} のそれぞれの実部と虚部を出力するために 4 個のニューロンを持つ。MLP の実装には PyTorch を用いた。

学習用データは、 f, Z_{c1}, l_1 と式 (2), (3) から求められる S_{11}, S_{21} の実部、虚部の組み合わせである。まず、周波数 f を 0.1 ~ 4 GHz の範囲で等間隔に 100 刻み、 Z_{c1} を 25 ~ 125 Ω 、 l_1 を 0.05 ~ 0.15 m の範囲とし、それぞれ等間隔に 15 刻みとし、これらの組み合わせにより学習データを作成した。続いて、PyTorch を用いて MLP を構築し、学習用データセットを用いて MLP の学習を行った。MLP の学習の際、平均二乗誤差 (MSE) を用いた。

結果を確認したところ、所望の周波数範囲で十分な精度で周波数特性を近似できていることが確認できた。

求められた一段の分布定数回路の MLP モデルを使用し、それが縦続接続された三段の分布定数回路の周波数特性を求める。図 2 のように縦続接続された 2 つの分布定数回路の S 行列から、式 (4) ~ (7) によって全体の S 行列を求め

[†] 北海道科学大学大学院 工学研究科 情報工学専攻

ることができる [1]. これを複数回繰り返して三段の構造の S 行列を導出する.

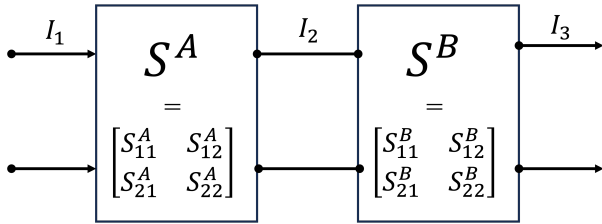


図 2: 二段の連続接続された分布定数回路

$$S_{11} = S_{11}^A + \frac{S_{12}^A S_{11}^B S_{21}^A}{1 - S_{22}^A S_{11}^B} \quad (4)$$

$$S_{12} = \frac{S_{12}^A S_{12}^B}{1 - S_{11}^B S_{22}^A} \quad (5)$$

$$S_{21} = \frac{S_{21}^B S_{21}^A}{1 - S_{22}^A S_{11}^B} \quad (6)$$

$$S_{22} = S_{22}^B + \frac{S_{21}^B S_{22}^A S_{12}^B}{1 - S_{11}^B S_{22}^A} \quad (7)$$

三段の連続接続された分布定数回路それぞれの区間について MLP を用いて S 行列を求め、その値から全体の S 行列及び周波数特性を数値的に求める. 図 3 に予測例を示す. さらに精度向上の余地はあるが, 基本的な特徴を表現することは可能であることがわかる.

5. まとめ

本研究では, MLP により様々な形状のマイクロストリップ線路の反射特性および透過特性を模擬することを目指し, その前段階として, 分布定数回路を近似する MLP について数値実験を行った. その結果, 中間層が 4 層の MLP において単一区間の分布定数回路の周波数特性を近似できることが示され, それらの接続によって多段構造の周波数特性を得られることも示された.

より実用性を高めるためには, 電磁界シミュレーションから構成した学習データを用いて MLP によるモデリングを行う必要がある. その際, マイクロストリップ線路のモデル化に適した MLP の構造やパラメータの決定, できるだけ少数の学習データで学習を可能とすることなどが課題となる.

参考文献

- [1] T. Mahouti, T. Yildirim, N. Kusonmaz, "Artificial intelligence – based design optimization of nonuniform microstrip line band pass filter," International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields, vol. 34, no. 6, Apr. 2021
- [2] F. Feng, W. Na, J. Jin, J. Zhang, W. Zhang, Q. J. Zhang, "Artificial Neural Networks for Microwave Computer-Aided Design: The State of the Art," IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 70, no. 11, pp.4597-4619, 2022
- [3] D. Deslandes and M. Boukadoum, "Nonuniform microstrip lines analysis using neural networks," Proceedings of the 8th IEEE International NEWCAS Conference 2010, pp.221-224, 2010

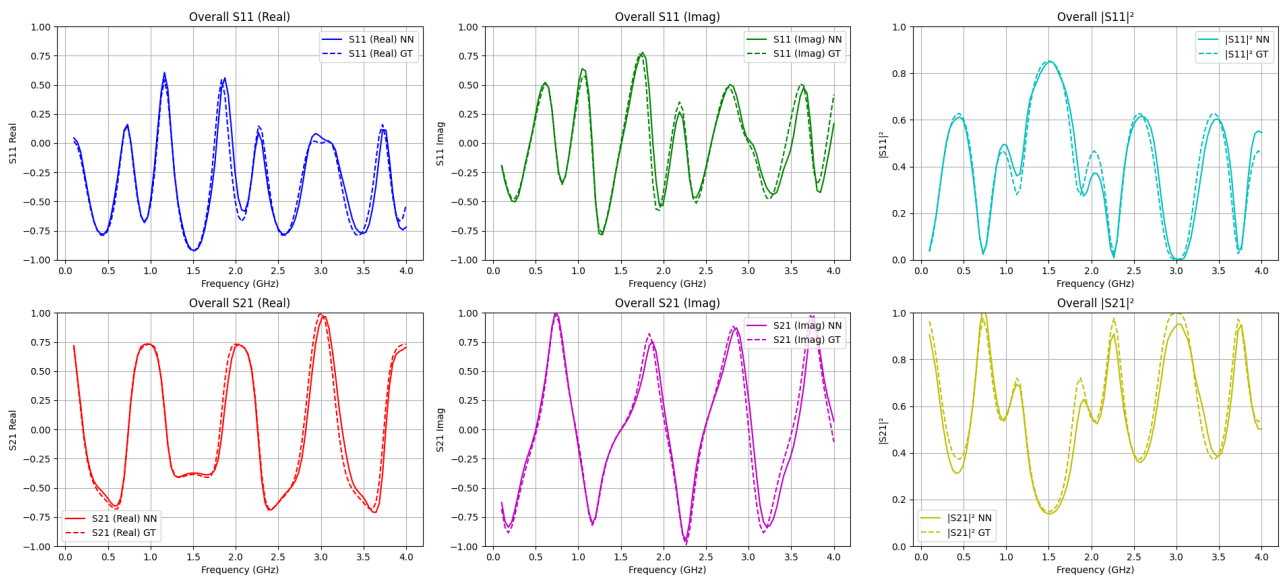


図 3: 連続接続された分布定数回路の S パラメータと予測結果の比較例