

マイクロ波整合回路の製作に挑戦！！

代表者 y230340 吉岡 攻起
メンバー y230393 田中 文基
y230398 山村 春樹
y230341 奈良 颯大
アドバイザー教員 石崎 俊雄

1. 目的

本プロジェクトのテーマは「マイクロ波整合回路の製作に挑戦！」である。

近年、無線通信機器やレーダシステムでは GHz 帯の高周波信号を扱うことが一般的となっており、アンテナや増幅器などの各回路ブロック間でインピーダンスを適切に整合させることが重要となっている。整合が不十分であると、反射により電力伝送効率が低下し、システム全体の性能劣化を招く。そこで本活動では、1 GHz 帯において良好な反射特性を示すマイクロ波整合回路を設計・試作・評価することを目的とした。具体的には、FR-4 基板上にマイクロストリップラインで整合回路を構成し、回路設計シミュレータ Keysight ADS を用いて S11（反射係数）特性をシミュレーションするとともに、実際に試作した基板の測定結果と比較することで、マイクロ波整合の基礎理解を深めることを目指した。

2. 計画

本プロジェクトで製作する整合回路について、以下のような計画を立てた。

機能要件

- ・整合周波数：中心周波数 1 GHz 付近で良好な整合を実現する。
- ・反射特性：中心周波数近傍で反射損失 RL がおおむね -20 dB 程度となることを目標とする。

回路仕様・設計方針

- ・基板：FR-4（比誘電率 $\epsilon_r \doteq 5.5$ 、厚さ 1.6 mm）を使用する。
- ・構成：マイクロストリップラインによるスタブや段付き線路を組み合わせた整合回路とし、TLINE/MLINE を用いてインピーダンスを設計する。
- ・設計ツール：Keysight ADS を用い、まず理論回路モデルでおおまかな整合条件を求めた後、Momentum などの電磁界シミュレーションによりレイアウトの微調整を行う。

製作・評価計画

- ・FR4 に銅テープを貼るためにマイクロストリップパターンを作成し、SMA コネクタを実装して実機を製作する。
- ・ベクトルネットワークアナライザを用いて S11 を測定し、シミュレーション結果と比較して設計の妥当性を検証する。

3. 調査方法

整合回路の設計および評価にあたり、以下の調査・準備を行った。

1. マイクロ波整合の基礎調査

伝送線路理論、スミスチャートを用いたインピーダンス整合方法、L 形整合回路やスタブ整合回路の原理について教科書や講義資料から整理した。特に、伝送線路の電気長と周波数の関係、線路幅と特性インピーダンスの関係を重点的に学習した。

2. 基板定数とライン寸法の算出

FR-4 ($\epsilon_r \doteq 5.5$ 、厚さ 1.6 mm) におけるマイクロストリップの線路幅、および整合に用いる高・低インピーダンス線路の幅を、ADS の LineCalc 機能を用いて算出した。これにより、実際に基板上で実現可能な寸法範囲を確認した。

3. シミュレーションモデルの構築

ADS 上で理想伝送線路モデル (TLINE) を用いた等価回路を作成し、S パラメータ解析により S11 特性を確認した。その後、TLINE を物理寸法を持つ MLINE/マイクロストリップモデルに置き換え、レイアウト形状に応じた電磁界シミュレーションを行って、実際の基板上での寄生成分を考慮した特性を評価した。

4. 活動経過

活動は、設計・シミュレーション・試作・評価の流れで進行した。

1. 回路設計 (ADS 回路シミュレーション)

まず理想伝送線路モデルを用いて整合回路を構成し、スミスチャートを参照しながら各線路の特性インピーダンスと電気長を調整した。中心周波数 1 GHz で S11 が最小となるようパラメータスイープを行い、目標値を満たす設計値を決定した。

2. レイアウト設計 (MLINE・Momentum)

決定した線路条件をもとに、マイクロストリップレイアウトを作成した。曲がり部分や分岐部では寄生インダクタンス・容量の影響を考慮し、線路幅や曲率を調整した。ADS Momentum による電磁界解析を行い、レイアウト後の S11 特性を再評価した。

3. 試作 (基板製作・実装)

シミュレーションで得られたレイアウトに基づき、FR-4 基板上に銅テープを貼り付けてパターンを形成した。さらに基板両端に SMA コネクタをハンダ付けし、測定用の試作基板を完成させた。

4. 測定・評価

ベクトルネットワークアナライザを用いて、1 GHz 付近の S11 特性を測定した。測定データを ADS から得られたシミュレーション結果と重ね合わせ、共振周波数のずれや反射損失の差異の要因を検討した。

5. 成果・結果

本プロジェクトの活動を通して、以下の成果が得られた。

1. 整合特性の達成状況

シミュレーションでは、中心周波数 1 GHz 付近で反射損失 RL が約 -20 dB 程度まで低下し、良好な整合が得られることを確認した。

一方、実測結果では、最小反射損失の周波数がシミュレーション値よりわずかにシフトし、RL の最大値もシミュレーションよりやや劣る結果となった（例：シミュレーション -20 dB に対し、実測 $-17\sim-18$ dB 程度）。

2. 誤差要因の考察

- ・FR-4 基板の実際の比誘電率や厚みがカタログ値と異なることによる電気長のずれ
 - ・銅テープによるパターン形成の精度不足（線路幅や長さの誤差、曲がり部分の処理）
 - ・SMA コネクタとの接続部におけるインダクタンス・容量などの寄生成分
- これらが共振周波数のシフトおよび反射特性の劣化の主な原因と考えられた。

3. 学習面での成果

マイクロストリップによる整合回路設計から実装・測定までを一通り経験したことで、

- ・伝送線路理論とスミスチャートの具体的な使い方
- ・ADS を用いた回路／電磁界シミュレーションの手順