

Q_u 値の評価の実際

ワイヤレス給電からミリ波までシミュレーション精度と製造品質向上のために

有限会社ソネット技研 石飛 徳昌 tovy@ieee.org

2011年12月8日

概要

共振器の Q_u 値の評価にあたってしばしば生じる課題と Sonnet を使った解決の例を紹介する。

1 Q_u 値の評価の課題

共振器の Q_u 値は、測定器と適切な結合条件で接続し、半値幅から求める場合が多い [1]。ところが実際には次のような課題がしばしば生じる。

Q_u 値が～50 程度の場合 適切な結合度を得るための電氣的磁氣的結合構造の実現が困難になる。

Q_u 値が 50～5000 程度の場合 実際の測定は比較的容易で多くの実例があるが、目的の共振モードと寄生共振モードとの判別が重要な場合がある [2]。

Q_u 値が 5000 を超える場合 測定であれシミュレーションであれ周波数分解能が不足する [3],[4]。特に Q_u 値が 100000 を超えるような場合には [5]、半値幅が評価系の周波数分解能より小さくなることすらある。

また、共振器の Q_u 値は材料や製造プロセスの品質に依存するからそれらを監視するために共振器を使うことができる [6]。

小型化の必要性 分布定数線路を使った共振器の実装面積はこの目的には大きすぎるからスパイラル線路などの小型化手段が必要とされる (図 2)。この目的のために専用の共振器を用意せず他の回路の一部を流用することもある。しかしその場合、形状と理論的な Q_u 値の関係を解析的に求めることは難しい場合がある。

損失要因の把握 理論的には、二つの共振器の Q_u 値から連立方程式を解いて、損失の要因たる誘電体損と導体損をそれぞれ把握することができる [7]。しかしこの連立方程式を解析的に解くことは難しい場合がある。

2 Sonnet を使った解決の例

適切な結合構造の実現が困難な場合 次の方法で適切な結合度を仮想的に実現すれば良い。

1. 共振器に測定器を直接接続して測定する。

2. 測定結果を Sonnet のグラフ表示モジュール emgraph で表示する。

3. emgraph の正規化インピーダンスを変更し適切な結合条件を実現する (図 1)。

4. S パラメータから半値幅を読み取る

■共振器をシミュレーションする場合 Q_u 値が 50～5000 の場合でも共振器と Sonnet のポートを直接接続し解析し、emgraph の正規化インピーダンスを変更することで適切な結合条件を実現すれば良い (図 2)。この方法はシミュレーションモデル中に結合構造を含めるより遥かに容易である。

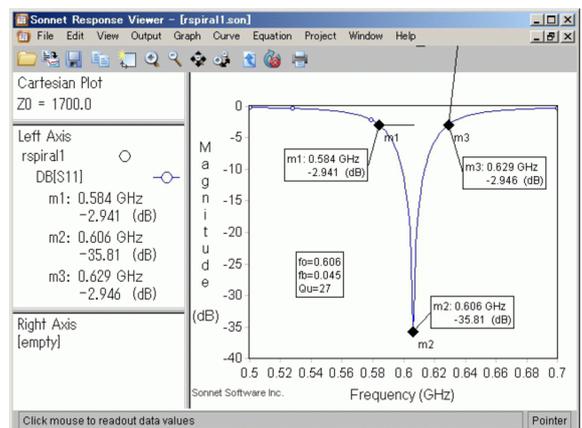


図 1 正規化インピーダンスを変更して臨界結合を仮想的に実現した例

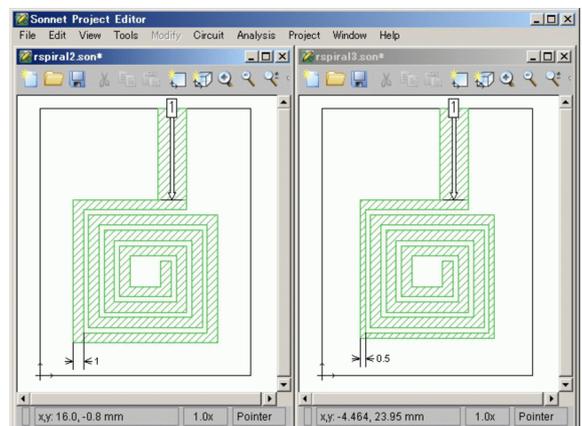


図 2 共振器とポートを直接接続した例

■非常に Q_u 値の高い系を広い周波数範囲で評価する方法
半値帯域幅は非常に狭く周波数分解能の影響を受け易いから、広い周波数範囲で評価すれば良い。

1. 共振周波数を含む広い周波数範囲で評価する。
2. 並列共振回路であれば $\text{Re}(\mathbf{Y})$ ，直列共振回路であれば $\text{Re}(\mathbf{Z})$ を共振周波数付近で読み取る。
3. 並列共振回路であればサセプタンススロープパラメータ b ，直列共振回路であればリアクタンススロープパラメータ x を $\text{Im}(\mathbf{Y})$ か $\text{Im}(\mathbf{Z})$ の周波数に対する傾きから読み取る。
4. スロープパラメータと実数分の比から Q_u 値を計算する

例えば $\tan \delta = 1 \times 10^{-5}$ の誘電体で満たされ、導体損も放射損も存在しない純 TEM 線路共振器を考える。この共振器の Q_u 値は $1/\tan \delta = 100000$ となるはずである。図3は共振周波数が $1/(2\pi)(\text{GHz})^{-1}$ となるよう寸法を設定し電磁界解析を行った結果で、

$$b = \frac{0.005898}{2 \cdot 0.03017 \times 10^9} \cdot \frac{1 \times 10^9}{2\pi}$$

$$= 0.01555(\text{S})$$

$$\text{Re}(\mathbf{Y}) = 1.554 \times 10^{-7}(\text{S})$$

と読み取ることができ、ここから

$$Q_u = b/\text{Re}(\mathbf{Y})$$

$$= 0.01555/1.554 \times 10^{-7}$$

$$= 100064$$

と Q_u 値の理論値が再現される。

■二つの共振器の Q_u 値から損失要素を知るチャートを作る方法
例えば理論的には図2(左)の共振器と、それを微かに変更した(右)の共振器のそれぞれの $\text{Re}(\mathbf{Y})$ から

$\tan \delta$ と σ_r *2 を知ることができる。二つの共振器のそれぞれの $\text{Re}(\mathbf{Y})$ の、 $\tan \delta$ と σ_r への依存性は図4のようにSonnetを使って解析することができる。これと測定した $\text{Re}(\mathbf{Y})$ を参照すれば誘電体損と導体損をそれぞれ知ることができる。

参考文献

- [1] 石飛徳昌, “ワイヤレス給電と rf-id アンテナ開発のポイント”. <http://www.sonnetsoftware.co.jp/>
- [2] Y. Kobayashi and S. Tanaka, “Resonant modes of a dielectric rod resonator short-circuited at both ends by parallel conducting plates,” *Microwave Theory and Techniques*, IEEE Transactions on, vol.28, no.10, pp.1077–1085, oct 1980.
- [3] 高橋 毅, 飯島 康, 古林 眞, 三浦太郎, “摂動法による比誘電率温度特性評価方法,” 電子情報通信学会技術

*1 $2\pi f$ を 10^N に選ぶと、 $\text{Im}(\mathbf{Y})$ や $\text{Im}(\mathbf{Z})$ から C や L を求める場合に便利である。

*2 σ_r は銅の導電率を基準とする比導電率 [8].

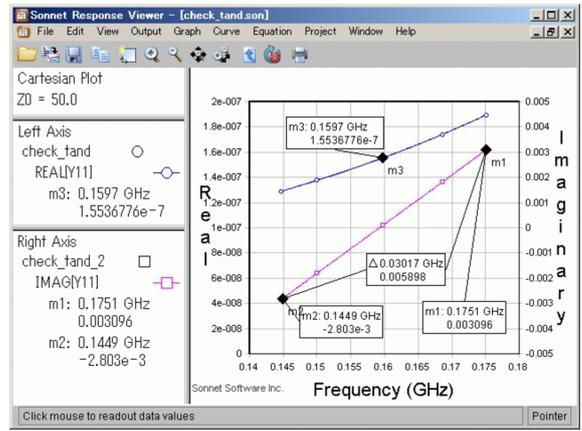


図3 $Q_u = 100000$ の共振器のアドミタンスの例

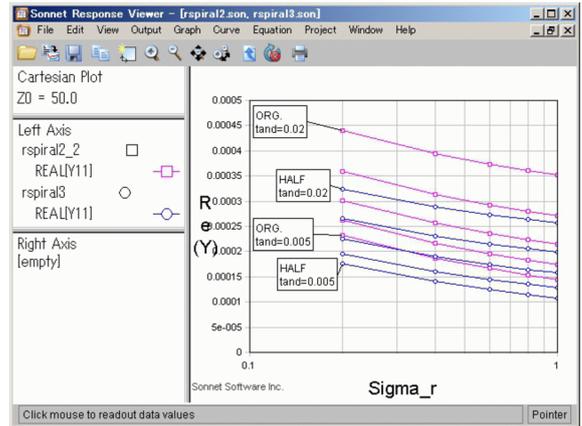


図4 微かに形状の異なる二つの共振器の $\text{Re}(\mathbf{Y})$ の例

- 研究報告. MW, マイクロ波, vol.96, no.74, pp.57–62, 1996-05-24.
- [4] T. Miura, “A proposal for standard to compare q-factor evaluation accuracy of microwave resonator,” *Microwave Symposium Digest*, 2006. IEEE MTT-S International, pp.1963–1966, june 2006.
 - [5] S. Doyle, P. Mauskopf, A.J. Naylor, C. Duncombe, and A. Porch, “Lumped element kinetic inductance detectors,” *Journal of Low Temperature Physics*, vol.151, no.1-2, pp.530–536, 2008.
 - [6] 石飛 徳昌, “ワイヤレス給電の回路設計の基本”. <http://www.sonnetsoftware.co.jp/>
 - [7] 石飛徳昌, “単一の製法で製作した試料による基板材料の誘電体損失と導体損失の測定 (マイクロ波シミュレータ, マイクロ波シミュレータ, ミリ波技術, 一般),” 電子情報通信学会技術研究報告. MW, マイクロ波, vol.107, no.208, pp.35–38, 2007-08-29.
 - [8] 吉富了平, 小林禧夫, 馬 哲旺, “Ar1000 基板を用いて構成されたマイクロストリップ線路に関する伝搬定数の評価に関する検討,” 電子情報通信学会技術研究報告. MW, マイクロ波, vol.109, no.291, pp.63–68, 2009-11-12.