

## 修士論文の和文要旨

研究科・専攻	大学院 情報理工学研究科 情報・ネットワーク専攻 博士前期課程		
氏名	服部 健将	学籍番号	1831121
論文題目	リング共振器を用いて構成したチップレス RFID タグに関する研究		
要旨	<p>RFID(Radio Frequency Identification)とは電波を用いてタグに記録されたID情報を識別し活用するシステムを指す。現在普及しているRFIDタグは集積回路によって構成される。一方、チップレスRFIDタグは集積回路を内蔵せず、共振器のみによって構成される。したがってチップレスRFIDタグはRFIDタグと比較して安価に作製できる。しかしながら可変な記憶容量を内蔵しないため、筆者の知る限りタグ作製後にID情報を変更することはできない。そのためチップレスRFIDタグにはある特定の情報のみを送信することへの活用が期待される。</p> <p>チップレスRFIDタグの情報表現には減衰極の有無によって情報を表現する方法が存在する。減衰極とは、等価特性において信号が大きく減衰し、特性関数上の零点を示す。減衰極の実現には共振器を給電線に接続または結合させる手法が多く検討されている。多くは単一の共振器がそれぞれ1bitの情報量を表現する検討であるが、単一の共振器が複数bitの情報量を表現する検討も存在する。しかしながらリング共振器を用いたチップレスRFIDタグは報告されていない。したがって本研究ではリング共振器が2つの異なる共振モードにおける減衰極実現周波数を制御可能であるという特徴を利用し単一のリング共振器で2bitの情報量を表現可能なチップレスRFIDタグの設計及びその特性の確認を目的とする。</p> <p>リング共振器を用いたチップレスRFIDタグの設計手順は以下の通りである。初めにリング共振器の減衰極実現条件式より所望の減衰極実現周波数を満たすリング共振器の構造パラメータを導出しリング共振器を設計する。次に設計したリング共振器を同一平面上の給電線へ結合させチップレスRFIDタグを構成する。</p> <p>上記の方法を用いて、リング共振器を用いた単一共振器あたり2bitの情報量を有するチップレスRFIDタグを設計できた。また電磁界シミュレータを用いて設計したチップレスRFIDタグの周波数特性を計算し、所望の周波数で減衰極が実現することを確認した。なお、回路シミュレータ及び電磁界シミュレータとしてAdvanced Design System 2015.01(Keysight Technologies, Inc.)を使用した。</p> <p>今後の課題としてタグ読み取りを想定した場合の設計パラメータの導出、チップレスRFIDタグの試作及び測定が考えられる。</p>		

令和3年度 修士論文

リング共振器を用いて構成した  
チップレスRFIDタグに関する研究

学籍番号 1831121

氏名 服部 健将

情報理工学研究科 情報・ネットワーク工学専攻

主任指導教員 和田 光司 教授

指導教員 小野 哲 助教

提出日 令和3年1月25日



令和3年度 修士論文

リング共振器を用いて構成した  
チップレスRFIDタグに関する研究

学籍番号 1831121

氏名 服部 健将

情報理工学研究科 情報・ネットワーク工学専攻

主任指導教員 和田 光司 教授

指導教員 小野 哲 助教

提出日 令和3年1月25日

# 概要

## 【目的】

リング共振器を用いることで単一共振器で2つの異なる共振モードにおける減衰極実現周波数を制御可能であり,単一共振器あたり2bitの情報量の表現が期待できる.またリング共振器を用いて構成したチップレスRFIDタグは未だ報告されていない.したがって本研究の目的は,単一共振器で2bitの情報量を表現するリング共振器を用いたチップレスRFIDタグを設計しその特性を確認することとした.

## 【方法】

初めに,リング共振器の減衰極実現条件式を導出する.導出した減衰極実現条件式より所望の減衰極実現周波数を満たすリング共振器の構造パラメータを導出しリング共振器を設計する.次に設計したリング共振器を同一の給電線へ結合させチップレスRFIDタグを構成する.構成したチップレスRFIDタグの特性を確認する.なお,回路シミュレータ及び電磁界シミュレータとしてAdvanced Design System 2015.01(Keysight Technologies, Inc.)を使用する.

## 【研究成果】

リング共振器を用いて単一共振器あたり2bitの情報量を有するチップレスRFIDタグの設計した.また電磁界シミュレータを用いて設計したチップレスRFIDタグの周波数特性を計算し確認した.

# 目次

<b>第1章 序論</b>	<b>1</b>
1.1 背景	1
1.2 先行技術	1
1.2.1 8つのオープンリング共振器を用いて構成したチップレスRFIDタグ [9]	2
1.2.2 デュアルモード共振器を用いて構成したチップレスRFIDタグ [10]	3
1.3 目的	4
<b>第2章 リング共振器</b>	<b>6</b>
2.1 リング共振器の回路解析及び入力インピーダンスの導出	6
2.1.1 偶モードにおける入力インピーダンスの導出	8
2.1.2 奇モードにおける入力インピーダンスの導出	9
2.1.3 減衰極実現条件の導出	10
2.1.4 リング共振器の設計	10
2.2 リング共振器の周波数特性	12
2.2.1 減衰極をそれぞれ7.35 GHzに設定した場合	12
2.2.2 減衰極をそれぞれ7.25 GHz及び7.45 GHzに設定した場合	13
2.2.3 平行結合線路部の幅を変更した場合の特性変化	14
<b>第3章 チップレスRFIDタグの設計</b>	<b>17</b>
3.1 4bitの情報量を有するチップレスRFIDタグ	17
3.2 リング共振器1の構造及びその周波数特性	18
3.2.1 減衰極をそれぞれ7.25 GHz及び7.45 GHzに設定した場合	18

3.2.2	減衰極をどちらも 7.25 GHz に設定した場合 . . . . .	20
3.2.3	減衰極をどちらも 7.45 GHz に設定した場合 . . . . .	22
3.3	リング共振器 2 の構造及びその周波数特性 . . . . .	23
3.3.1	減衰極をそれぞれ 7.65 GHz 及び 7.85 GHz に設定した場合 . . . . .	23
3.3.2	減衰極をどちらも 7.65 GHz に設定した場合 . . . . .	25
3.3.3	減衰極をどちらも 7.85 GHz に設定した場合 . . . . .	26
3.4	チップレス RFID タグの周波数特性 . . . . .	28
3.4.1	1111 を表現する場合 . . . . .	28
3.4.2	1010 を表現する場合 . . . . .	29
3.4.3	0101 を表現する場合 . . . . .	31
<b>第 4 章</b>	<b>タグ読み取りを想定した電磁界シミュレーション</b>	<b>33</b>
4.1	タグ読み取りを想定した場合のプローブ及び共振器の構成 . . . . .	33
4.2	同一基板上の構成及びタグ読み取りを想定した構成の周波数特性比較	34
4.3	プローブの配置による周波数特性の変化傾向 . . . . .	35
4.3.1	プローブ及びタグ間の垂直方向距離の変化 . . . . .	36
4.3.2	プローブ及びタグ間の水平方向距離の変化 . . . . .	37
<b>第 5 章</b>	<b>結論</b>	<b>39</b>
	<b>謝辞</b>	<b>40</b>

# 目 次

1.1	オープンリング共振器の回路構造とその等価回路 . . . . .	2
1.2	8つのオープンリング共振器を用いて構成したチップレス RFID タグの構造及びその周波数特性 . . . . .	3
1.3	中央にスタブを装荷しない場合の回路構造とその周波数特性 . . . . .	4
1.4	中央にスタブを装荷した場合の回路構造とその周波数特性 . . . . .	4
2.1	リング共振器の回路構成 . . . . .	7
2.2	平行結合線路 . . . . .	7
2.3	偶モードにおけるリング共振器の等価回路 . . . . .	8
2.4	奇モードにおけるリング共振器の等価回路 . . . . .	9
2.5	$Z_1$ を $46.38 \Omega$ と設定した場合の周波数特性 . . . . .	12
2.6	$Z_1$ を $48.77 \Omega$ と設定した場合の周波数特性 . . . . .	13
2.8	$Z_1$ を $51.97 \Omega$ と設定した場合の周波数特性 . . . . .	14
2.7	$Z_1$ を $43.53 \Omega$ と設定した場合の周波数特性 . . . . .	14
2.9	リング共振器の回路構造 . . . . .	15
2.10	平行結合線路の幅 $w_2$ を変化させた場合のリング共振器の周波数特性	16
3.1	4bit の情報量を有するチップレス RFID タグの回路構造 . . . . .	18
3.2	減衰極をそれぞれ 7.25 GHz 及び 7.45 GHz に設定した場合の回路構造	19
3.3	図 3.2 に示した回路の周波数特性 . . . . .	20
3.4	減衰極をそれぞれ 7.25 GHz に設定した場合の回路構造 . . . . .	21
3.5	図 3.4 に示した回路の周波数特性 . . . . .	21
3.6	減衰極をそれぞれ 7.45 GHz に設定した場合の回路構造 . . . . .	22
3.7	図 3.6 に示した回路の周波数特性 . . . . .	23

3.8	減衰極をそれぞれ7.65 GHz及び7.85 GHzに設定した場合の回路構造	24
3.9	図3.8に示した回路の周波数特性	24
3.10	減衰極をそれぞれ7.65 GHzに設定した場合の回路構造	25
3.11	図3.10に示した回路の周波数特性	26
3.12	減衰極をそれぞれ7.85 GHzに設定した場合の回路構造	27
3.13	図3.12に示した回路の周波数特性	27
3.14	情報1111を持つチップレスRFIDタグの回路構造	28
3.15	図3.14に示した回路の周波数特性	29
3.16	情報1010を持つチップレスRFIDタグの回路構造	30
3.17	図3.16に示した回路の周波数特性	30
3.18	情報0101を持つチップレスRFIDタグの回路構造	31
3.19	図3.18に示した回路の周波数特性	32
4.1	測定を想定した場合のプロープとタグの構成	34
4.2	同一基板上に給電線及び共振器を配置した場合及びタグ読み取りを 想定した場合の周波数特性の比較	35
4.3	垂直方向距離hを変化させた場合の周波数特性	36
4.4	図4.3の拡大図	36
4.5	プロープの配置を水平方向距離yに0.1mmから0.5mmまで変化さ せた場合の周波数特性	37
4.6	プロープの配置を水平方向距離yに-0.1mmから-0.5mmまで変化さ せた場合の周波数特性	37

# 表 目 次

2.1	$f = 7.35\text{GHz}$ におけるリング共振器の線路パラメータ . . . . .	12
2.2	平行結合線路の幅 $w_2$ によるリング共振器のパラメータ . . . . .	15
2.3	MEGTRON7(N)の基板諸元 . . . . .	16
3.1	$f=7.35\text{ GHz}$ の回路パラメータ . . . . .	19
3.2	$f=7.25\text{ GHz}$ の回路パラメータ . . . . .	20
3.3	$f=7.45\text{ GHz}$ の回路パラメータ . . . . .	22
3.4	$f=7.75\text{GHz}$ の回路パラメータ . . . . .	23
3.5	$f=7.65\text{GHz}$ の回路パラメータ . . . . .	25
3.6	$f=7.85\text{GHz}$ の回路パラメータ . . . . .	26

# 第1章 序論

## 1.1 背景

RFID(Radio Frequency Identification)とは電波を用いてタグに記録されたID情報を識別し活用するシステムを指す。現在普及しているRFIDタグにはリーダライタを用いてタグに格納された情報を非接触での読み書き可能であるという特徴がある。

RFIDタグは集積回路によって構成されるが、本研究で扱うチップレスRFIDタグは集積回路を内蔵せず、共振器によって構成される。したがってチップレスRFIDタグはRFIDタグと比較して安価に作製できる。しかしながら可変な記憶容量を内蔵しないため、筆者の知る限りタグ作製後にID情報を変更することはできない。そのためチップレスRFIDタグにはある特定の情報のみを送信することへの活用が期待できる。チップレスRFIDタグの情報表現には減衰極の有無によって情報を表現する方法がある。減衰極の実現には共振器を給電線に接続または結合させる方法が多く検討されている [1]-[9]。検討されている多くの方法は単一の共振器がそれぞれ1bitの情報量に対応しており、タグ情報の増加に伴いタグサイズも大きくなるといった問題点がある。この問題点を解決する手法として単一の共振器で複数の情報量を表現可能な共振器を用いて構成するチップレスRFIDタグが報告されている [10],[11]。

## 1.2 先行技術

先行技術として8つのオープンリング共振器を用いて構成したチップレスRFIDタグ [9]、デュアルモード共振器を用いて構成したチップレスRFIDタグ [10] について示す。

### 1.2.1 8つのオープンリング共振器で用いて構成したチップレスRFIDタグ [9]

図1.1にチップレスRFIDタグに用いられているオープンリング共振器の回路構造とその等価回路を示す.

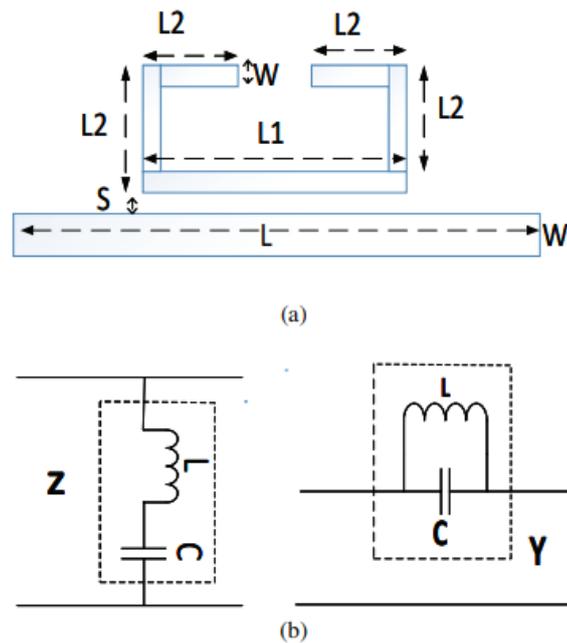
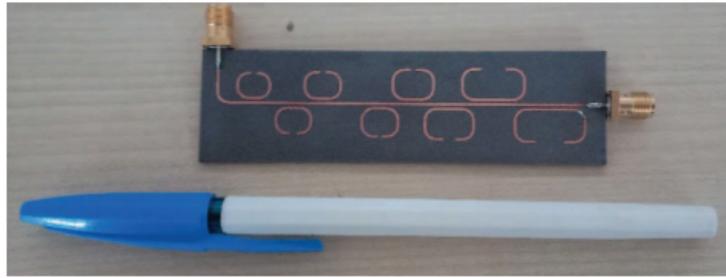
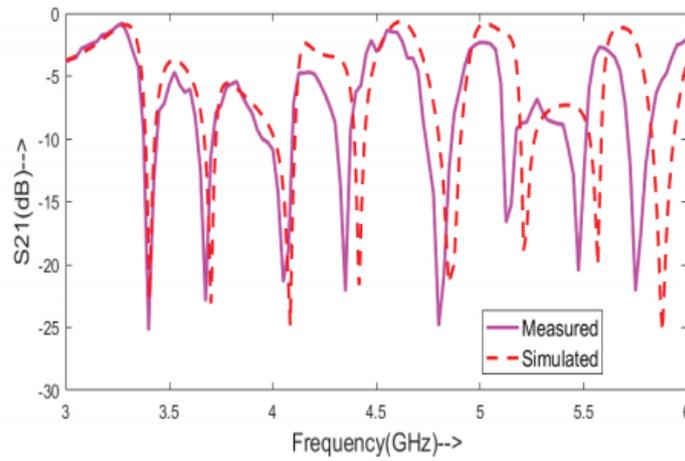


図 1.1: オープンリング共振器の回路構造とその等価回路

図1.1に示した等価回路よりオープンリング共振器はある周波数で減衰極を生成する. したがって共振器長を適切に設定することで減衰極実現周波数を調整することができチップレスRFIDタグに適用可能である. 8つのオープンリング共振器を用いて構成した8bitの情報量を有するチップレスRFIDタグの構造及びその周波数特性を図1.2に示す.



(a)



(b)

図 1.2: 8つのオープンリング共振器を用いて構成したチップレス RFID タグの構造及びその周波数特性

図 1.2 に示したタグ構造及びその周波数特性より 3.35GHz から 5.75GHz において 8bit の情報量を実現していることを確認した.

### 1.2.2 デュアルモード共振器を用いて構成したチップレス RFID タグ [10]

次に中央にスタブを装荷した半波長共振器を用いて構成したチップレス RFID タグについて示す. 共振器の中央にスタブを装荷するか否かによって二次共振周波数を制御している. 図 1.3 に中央にスタブを装荷しない場合の共振器の構造及びその周波数特性を示す.

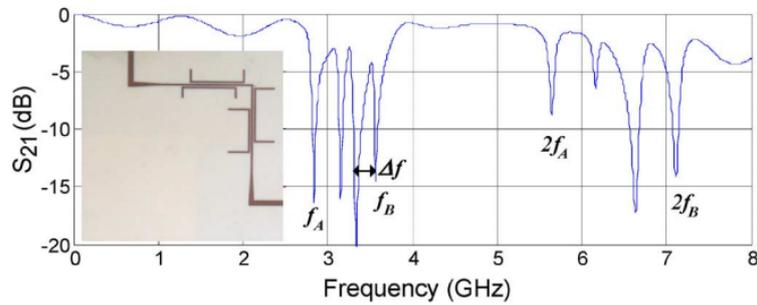


図 1.3: 中央にスタブを装荷しない場合の回路構造とその周波数特性

図 1.3 より共振器中央にスタブを装荷しない場合には二次共振周波数は基本共振周波数の二倍の周波数となることが確認できる. 次に図 1.4 に中央にスタブを装荷する場合の共振器の構造及びその周波数特性を示す.

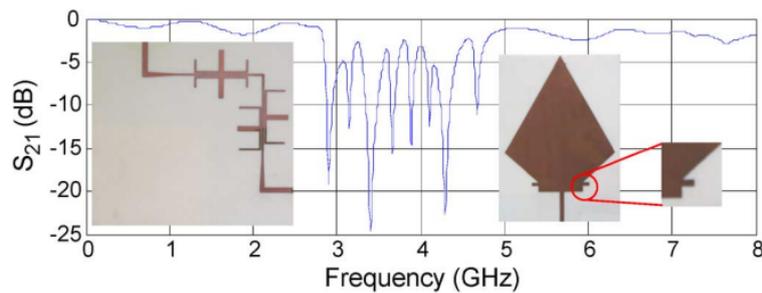


図 1.4: 中央にスタブを装荷した場合の回路構造とその周波数特性

図 1.4 より共振器中央にスタブを装荷する場合には二次共振周波数を基本共振周波数側へシフトさせることが可能であることが確認できる. したがって共振器中央のスタブを装荷するか否かによって単一共振器で 2bit の情報量を表現できる. また図 1.3 及び図 1.4 に示した回路構造及びその周波数特性より中央にスタブを装荷した半波長の共振器を用いて 8bit の情報量を実現していることを確認した.

### 1.3 目的

文献 [10] に示した共振器は二次共振周波数の制御のため共振器中央部にスタブを装荷する必要がある. したがってリング共振器と比較して設計が複雑という問題

がある。また現在、リング共振器を用いて構成したチップレス RFID タグは報告されていない。リング共振器を用いることで単一共振器で2つの異なる共振モードにおける減衰極実現周波数を制御可能であり、単一共振器あたり 2bit の情報量の表現が期待できる。したがって本研究の目的は、設計容易かつ単一共振器で 2bit の情報量を表現するリング共振器を用いたチップレス RFID タグを設計し特性を確認することとする。

## 第2章 リング共振器

本章ではリング共振器の設計について示す. 初めにリング共振器の入力インピーダンスを導出する. 次に導出した入力インピーダンスより減衰極実現条件式を導出する. さらに導出した減衰極実現条件式よりリング共振器の構造パラメータの導出を行う. なおリング共振器の減衰極実現条件の導出には文献 [13][14] を参考にした.

### 2.1 リング共振器の回路解析及び入力インピーダンスの導出

伝送線路及び結合線路モデルを用いて構成したリング共振器の回路構成を図 2.1 に示す.

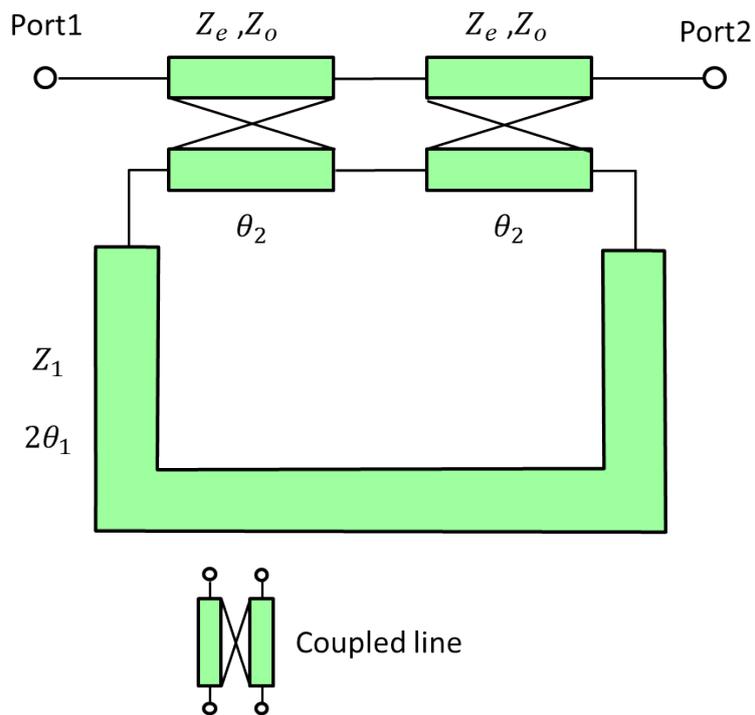


図 2.1: リング共振器の回路構成

平行結合線路を図 2.2 に示す. また図 2.2 に示した平行結合線路の Z 行列を式 2.1 に示す.[12]

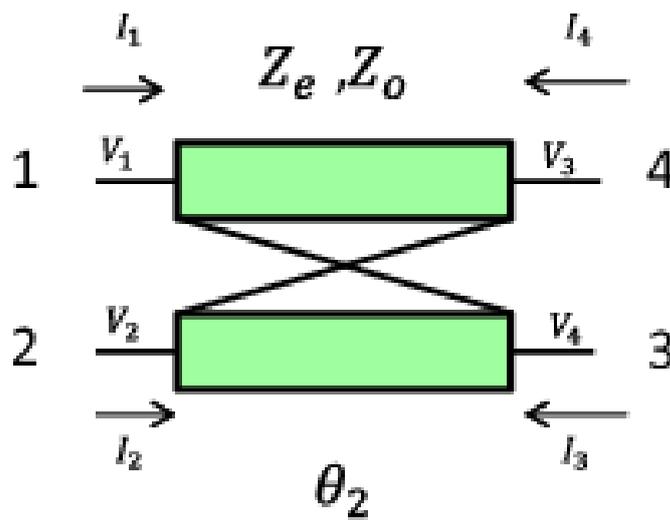


図 2.2: 平行結合線路

$$[Z] = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & Z_{13} & Z_{14} \\ Z_{21} & Z_{22} & Z_{23} & Z_{24} \\ Z_{31} & Z_{32} & Z_{33} & Z_{34} \\ Z_{41} & Z_{42} & Z_{43} & Z_{44} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & Z_{13} & Z_{14} \\ Z_{12} & Z_{11} & Z_{14} & Z_{13} \\ Z_{13} & Z_{14} & Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{14} & Z_{13} & Z_{12} & Z_{11} \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

ただし式 2.1 中の  $Z_{11}, Z_{12}, Z_{13}$  及び  $Z_{14}$  はそれぞれ式 2.2 のように表される.

$$\begin{aligned} Z_{11} &= -jZ_x \cot(\theta_2) \\ Z_{12} &= -jZ_y \cot(\theta_2) \\ Z_{13} &= -jZ_y \csc(\theta_2) \\ Z_{14} &= -jZ_x \csc(\theta_2) \end{aligned} \quad (2.2)$$

なお式 2.2 中の  $Z_x$  及び  $Z_y$  はそれぞれ  $Z_x = \frac{Z_e + Z_o}{2}$  及び  $Z_y = \frac{Z_e - Z_o}{2}$  である.

### 2.1.1 偶モードにおける入力インピーダンスの導出

偶モードにおけるリング共振器の等価回路を図 2.3 に示す.

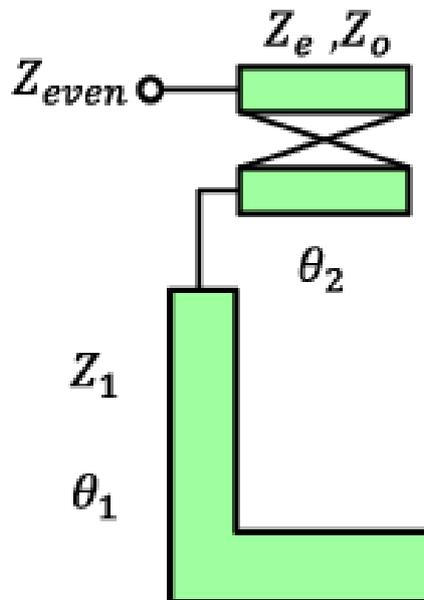


図 2.3: 偶モードにおけるリング共振器の等価回路

偶モードの場合, 対称面に磁気壁 (電氣的に開放) を想定し, 平行結合線路のポート 3 及びポート 4 は開放より  $I_3 = 0, I_4 = 0$  である. したがって式 2.1 より式 2.3 の式が得られる.

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 = Z_2 I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{12} & Z_{11} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

ただし式 2.3 中の  $Z_2$  は式 2.4 である.

$$Z_2 = \frac{V_2}{I_2} = jZ_1 \cot(\theta_1) \quad (2.4)$$

偶モードの場合の入力インピーダンスを  $Z_{even}$  とすると, 入力インピーダンス  $Z_{even}$  は式 2.3 より式 2.5 と表される.

$$Z_{even} = \frac{V_1}{I_1} = \frac{-j\{(Z_x^2 - Z_y^2) \tan(\theta_1) \cot(\theta_2) + Z_1 Z_x\}}{Z_x \tan(\theta_1) + Z_1 \tan(\theta_2)} \quad (2.5)$$

### 2.1.2 奇モードにおける入力インピーダンスの導出

奇モードにおけるリング共振器の等価回路を図 2.4 に示す.

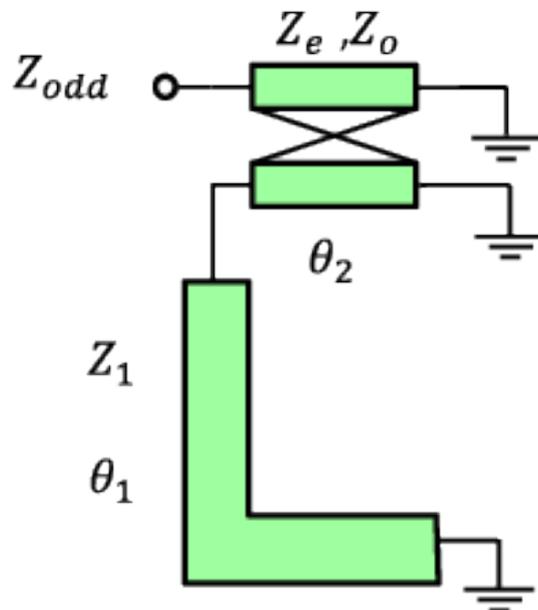


図 2.4: 奇モードにおけるリング共振器の等価回路

奇モードの場合, 対称面に電気壁 (電氣的に短絡) を想定し, 平行結合線路のポート 3 及びポート 4 は短絡より  $V_3 = 0, V_4 = 0$  である. したがって式 2.1 より式 2.6 が

得られる.

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 = Z_2 I_2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & Z_{13} & Z_{14} \\ Z_{12} & Z_{11} & Z_{14} & Z_{13} \\ Z_{13} & Z_{14} & Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{14} & Z_{13} & Z_{12} & Z_{11} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

ただし式 2.6 中の  $Z_2$  は式 2.7 である.

$$Z_2 = \frac{V_2}{I_2} = -jZ_1 \tan(\theta_1) \quad (2.7)$$

奇モードの場合の入力インピーダンスを  $Z_{odd}$  とすると, 入力インピーダンス  $Z_{odd}$  は式 2.6 より式 2.8 と表される.

$$Z_{odd} = \frac{V_1}{I_1} = \frac{-j \tan(\theta_2) \{(Z_x^2 - Z_y^2) \tan(\theta_2) + Z_1 Z_x \tan(\theta_1)\}}{Z_1 \tan(\theta_1) + Z_x \tan(\theta_2)} \quad (2.8)$$

### 2.1.3 減衰極実現条件の導出

$S_{21}$  は式 2.9 のように表される.[14]

$$S_{21} = \frac{\Gamma_{even} - \Gamma_{odd}}{2} \quad (2.9)$$

また  $\Gamma_{even}$  及び  $\Gamma_{odd}$  はそれぞれ式 2.10 のように表される.

$$\begin{aligned} \Gamma_{even} &= \frac{Z_{even} - Z_0}{Z_{even} + Z_0} \\ \Gamma_{odd} &= \frac{Z_{odd} - Z_0}{Z_{odd} + Z_0} \end{aligned} \quad (2.10)$$

減衰極は  $S_{21} = 0$  の条件で実現する. したがって式 2.9 及び式 2.10 より減衰極実現条件は  $Z_{even} = Z_{odd}$  と分かる. 式 2.4 及び式 2.8 よりリング共振器の減衰極実現条件は式 2.11 と表される.

$$\frac{-j\{(Z_x^2 - Z_y^2) \tan(\theta_1) \cot(\theta_2) + Z_1 Z_x\}}{Z_x \tan(\theta_1) + Z_1 \tan(\theta_2)} = \frac{-j \tan(\theta_2) \{(Z_x^2 - Z_y^2) \tan(\theta_2) + Z_1 Z_x \tan(\theta_1)\}}{Z_1 \tan(\theta_1) + Z_x \tan(\theta_2)} \quad (2.11)$$

### 2.1.4 リング共振器の設計

図 2.1 に示したリング共振器の設計にあたり減衰極実現周波数において式 2.11 を満たす共振器の構造パラメータを求める必要がある. ここで図 2.1 に示したリン

グ共振器の電気長  $\theta_1$  を  $3\theta_2$  と設定し検討を進める。 $\theta_1 = 3\theta_2$  とすると、式 2.11 より  $\theta_2$  は式 2.12 と表される。

$$\theta_2 = \tan^{-1}\left(\frac{\sqrt{A(B \pm C)}}{A}\right) \quad (2.12)$$

ただし式 2.12 中の A,B 及び C はそれぞれ式 2.13 のように表される。

$$A = 3Z_1^2 Z_x + 10Z_1 Z_x^2 - 9Z_1 Z_y^2 + 3Z_x^3 - 3Z_x Z_y^2$$

$$B = 5Z_1^2 Z_x + 6Z_1 Z_x^2 - 7Z_1 Z_y^2 + 5Z_x^3 - 5Z_x Z_y^2$$

$$C = 4\sqrt{Z_1^4 Z_x^2 - Z_1^3 Z_x Z_y^2 - 2Z_1^2 Z_x^4 + 4Z_1^2 Z_x^2 Z_y^2 - 2Z_1^2 Z_y^4 - Z_1 Z_x^3 Z_y^2 + Z_1 Z_x Z_y^4 + Z_x^6 - 2Z_x^4 Z_y^2 + Z_x^2 Z_y^4} \quad (2.13)$$

式 2.12 より  $C = 0$  の場合、減衰極は一致する。 $Z_x$  及び  $Z_y$  は平行結合線路の構造によって決定される値であり一律であるため、減衰極が一致する場合において、 $C = 0$  より  $Z_1$  は導出できる。また導出した  $Z_1$  及び式 2.12 より減衰極実現周波数における  $\theta_2$  は  $45^\circ$  と導出される。さらに  $\theta_1 = 3\theta_2$  であるので  $\theta_1$  は  $135^\circ$  である。また式 2.13 より  $C=0$  の場合、 $Z_1$  の解は式 2.14 のように表される。

$$Z_1 = Z_x, \frac{Z_x^2 - Z_y^2}{Z_x} \quad (2.14)$$

ただし、 $C=0$  より導出される  $Z_1$  の値には  $\frac{-Z_x^2 + Z_y^2 + \sqrt{-Z_x^2 Z_y^2 + Z_y^4}}{Z_x}$  及び  $\frac{-Z_x^2 + Z_y^2 - \sqrt{-Z_x^2 Z_y^2 + Z_y^4}}{Z_x}$  も含まれるが、特性インピーダンスの取りうる値は 0 以上であるため、 $Z_1$  の解は  $Z_x$  及び  $\frac{Z_x^2 - Z_y^2}{Z_x}$  の 2 つである。

$C > 0$  の場合、それぞれ異なる周波数で減衰極が実現する。減衰極実現周波数をそれぞれ  $f_a$  及び  $f_b$  とすると式 2.12 より  $C = 0$  の場合の周波数からそれぞれ等しい周波数分だけシフトした周波数において減衰極が実現する。つまり  $C = 0$  の場合の減衰極実現周波数を  $f_o$  とすると、 $\frac{f_a + f_b}{2} = f_o$  と表される。また所望の減衰極実現周波数  $f_a$  及び  $f_b$  を設定すると、 $\theta_2$  は  $\frac{45^\circ * f_a}{f_o}$  または  $\frac{45^\circ * f_b}{f_o}$  と表される。したがって  $\frac{45^\circ * f_a}{f_o}$  または  $\frac{45^\circ * f_b}{f_o}$  を式 2.12 に代入すると、所望の減衰極実現周波数  $f_a$  及び  $f_b$  を満たす  $Z_1$  の値が導出される。ただし  $f_o$  における電気長  $\theta_1$  及び  $\theta_2$  はそれぞれ  $135^\circ$  及び  $45^\circ$  である。

## 2.2 リング共振器の周波数特性

本節では回路シミュレーションを用いて計算した周波数特性を示す. リング共振器を構成する線路のパラメータを表 2.1 に示す. ただし表 2.1 に示した平行結合線路部の構造により決定される偶モード及び奇モードインピーダンス  $Z_e$  及び  $Z_o$  は実現性を考慮し設定した.

表 2.1:  $f = 7.35$  GHz におけるリング共振器の線路パラメータ

$Z_e$	59.58 $\Omega$
$Z_o$	37.97 $\Omega$
$\theta_1$	135 $^\circ$
$\theta_2$	45 $^\circ$

### 2.2.1 減衰極をそれぞれ 7.35 GHz に設定した場合

減衰極が一致する場合, 表 2.1 及び式 2.14 より,  $Z_1$  の値は 48.77  $\Omega$  及び 46.38  $\Omega$  と導出される. 導出された  $Z_1$  の値を用いて設計したリング共振器を回路シミュレーションを用いて計算した周波数特性をそれぞれ図 2.5 及び図 2.6 に示す.

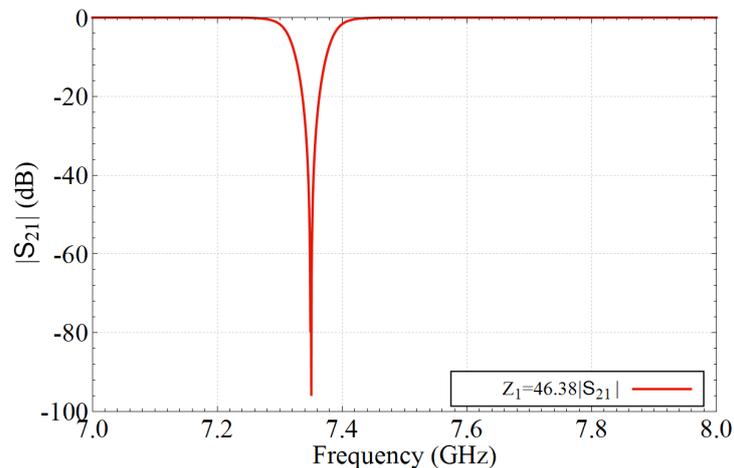


図 2.5:  $Z_1$  を 46.38  $\Omega$  と設定した場合の周波数特性

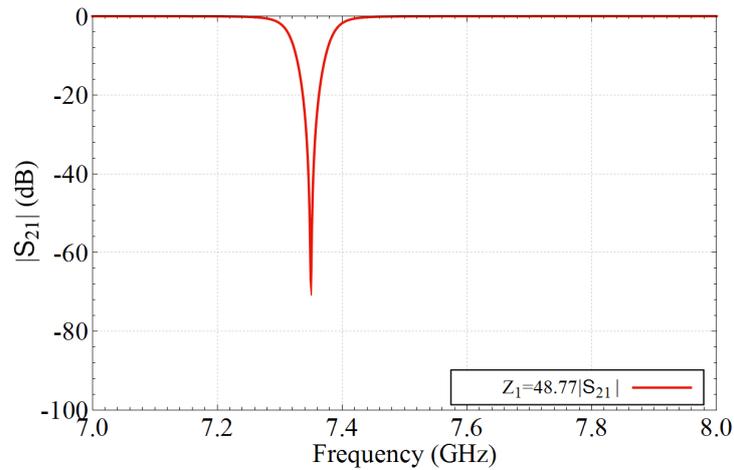


図 2.6:  $Z_1$  を  $48.77 \Omega$  と設定した場合の周波数特性

図 2.5 及び図 2.6 に示した周波数特性より減衰極実現周波数はそれぞれ  $7.35 \text{ GHz}$  であり, 表 2.1 及び式 2.14 から導出される  $Z_1$  の値を用いて設計したリング共振器は所望の周波数特性を有していることを確認した.

### 2.2.2 減衰極をそれぞれ $7.25 \text{ GHz}$ 及び $7.45 \text{ GHz}$ に設定した場合

減衰極をそれぞれ  $7.25 \text{ GHz}$  及び  $7.45 \text{ GHz}$  に設定した場合, 表 2.1 及び式 2.12 より  $Z_1$  の値は  $43.53 \Omega$  及び  $51.97 \Omega$  と導出される. 導出された  $Z_1$  の値を用いて設計したリング共振器を回路シミュレーションを用いて計算した周波数特性を図 2.7 及び図 2.8 にそれぞれ示す.

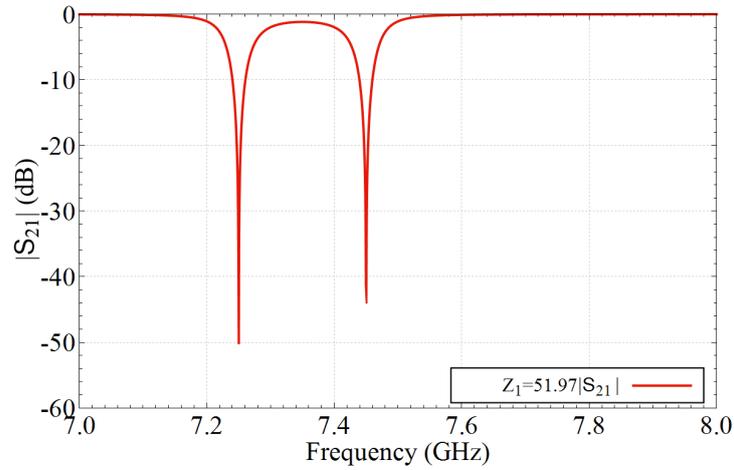


図 2.8:  $Z_1$  を  $51.97 \Omega$  と設定した場合の周波数特性

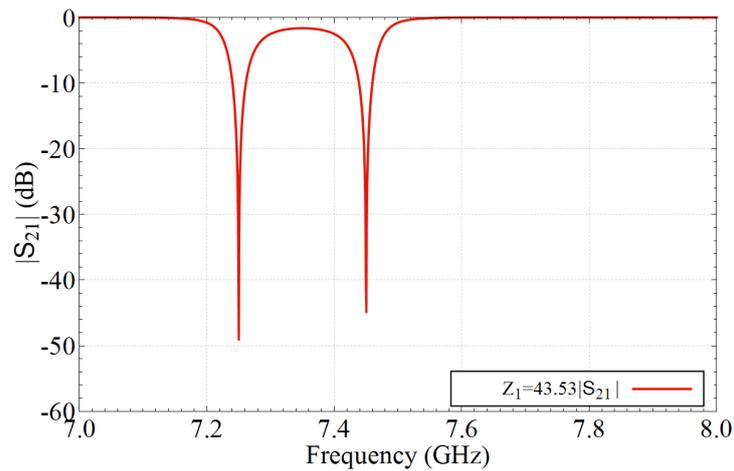


図 2.7:  $Z_1$  を  $43.53 \Omega$  と設定した場合の周波数特性

図 2.7 及び図 2.8 に示した周波数特性より減衰極実現周波数はそれぞれ  $7.25 \text{ GHz}$  及び  $7.45 \text{ GHz}$  であり, 表 2.1 及び式 2.14 から導出される  $Z_1$  の値を用いて設計したリング共振器は所望の周波数特性を有していることを確認した.

### 2.2.3 平行結合線路部の幅を変更した場合の特性変化

図 2.1 に示した回路構成の構造パラメータを表記したリング共振器の回路構成を図 2.9 に示す. なお, 図 2.9 に示した伝送線路の線路幅及び線路長をそれぞれ  $w_1$  及

び  $l_1$  とし, 平行結合線路の線路幅, 線路長及び線路間隔をそれぞれ  $w_2, l_2$  及び  $s$  とした. また図 2.9 に示したリング共振器の平行結合線路の幅  $w_2$  を変化させた場合における線路パラメータを表 2.2 に示す. ただし表 2.2 に示した線路パラメータは基板に MEGTRON7(N) を想定し算出した. MEGTRON7(N) の基板諸元を表 2.3 に示す. また表 2.2 に示した線路パラメータは減衰極実現周波数をそれぞれ 7.25 GHz 及び 7.45 GHz となるよう設計した. リング共振器の平行結合線路の幅  $w_2$  を変化させた場合における周波数を図 2.10 に示す.

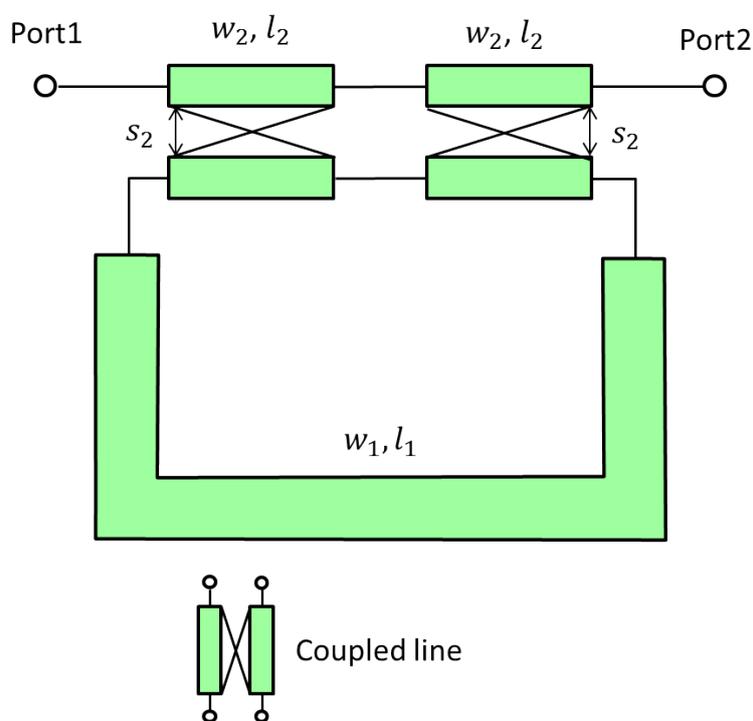


図 2.9: リング共振器の回路構造

表 2.2: 平行結合線路の幅  $w_2$  によるリング共振器のパラメータ

$w_2$	1.1 mm	0.8 mm	0.5 mm
$w_1$	1.05 mm	0.77 mm	0.48 mm
$l_1$	18.76 mm	19 mm	19.35 mm
$l_2$	3.18 mm	3.21 mm	3.27 mm
$s$	0.2 mm	0.2 mm	0.2 mm

表 2.3: MEGTRON7(N) の基板諸元

比誘電率 $\epsilon_r$	3.4(@1.0 GHz)
誘電正接 $\tan \delta$	0.001
誘電体厚 H	0.5 mm
導体厚 t	18 $\mu\text{m}$
導電率 $\sigma$	$5.8 \times 10^7 \text{ S/m}$

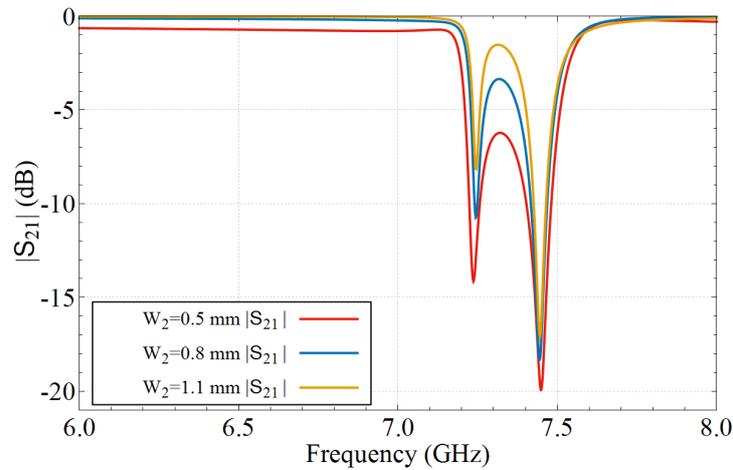


図 2.10: 平行結合線路の幅  $w_2$  を変化させた場合のリング共振器の周波数特性

図 2.10 に示した周波数特性より平行結合線路の幅  $w_2$  を細くすることにより 7.25 GHz 及び 7.45 GHz における減衰極実現周波数による挿入損失が増加することを確認した. また 7.25 GHz から 7.45 GHz の減衰極実現周波数における挿入損失の増加に伴い, 減衰極間の周波数帯域挿入損失もまた増加することを確認した. さらにおよそ 6 GHz から約 7.2 GHz 及び約 7.6 GHz から 8 GHz での周波数帯域で挿入損失が増加することを確認した. 線路幅  $w_2$  の変化によって減衰極実現周波数における挿入損失が変化する原因として平行結合線路の結合の大きさが変化したことが考えられる. また 6 GHz から約 7.2 GHz 及び約 7.6 GHz から 8 GHz での周波数帯域で挿入損失が変化する原因として平行結合線路の線路幅が変化することによりポート間のマッチングが崩れていることが考えられる.

## 第3章 チップレスRFIDタグの設計

本章ではリング共振器を用いたチップレスRFIDタグを設計し、その周波数特性を確認する。初めに第2章で検討したリング共振器の設計方法に従い設計したチップレスRFIDタグを構成するリング共振器の周波数特性を確認する。次に設計したリング共振器を同一の給電線へ接続しチップレスRFIDタグを構成しその周波数特性を確認する。

チップレスRFIDタグは減衰極の有無によりタグ情報を表現する。本検討ではある周波数において減衰極が実現する場合に情報を1と表現し、実現しない場合の情報を0と表現とする。第2章に記したようにリング共振器は減衰極実現周波数を平行結合線路部に接続する線路の特性インピーダンスによって制御可能という特徴を有している。すなわち減衰極実現周波数をそれぞれ異なる周波数となるようリング共振器を設計する場合、単一のリング共振器で11の情報を表現可能である。また減衰極実現周波数をそれぞれ同じ周波数となるようリング共振器を設計する場合単一のリング共振器で10または01の情報を表現可能である。情報量00の場合についてはリング共振器を装荷しないことで表現可能である。また所望の減衰極実現周波数及び式2.11より導出される $Z_1$ には2通りの値が存在する。結合線路へ接続する伝送線路幅は平行結合線路部の線路幅に近いほど構造化し易いため、導出された2通りの $Z_1$ から構造化した際に結合線路部の線路幅により近くなる値を選択し、チップレスRFIDタグを構成するリング共振器を設計した。

### 3.1 4bitの情報量を有するチップレスRFIDタグ

本検討では7.25 GHz, 7.45 GHz, 7.65 GHz 及び 7.85 GHz における減衰極の有無により符号を判別するチップレスRFIDタグの設計をした。それぞれの減衰極は

1bit 分の情報量に相当する. 図 3.1 に検討した 4bit の情報量を有するチップレス RFID タグの回路構造を示す.

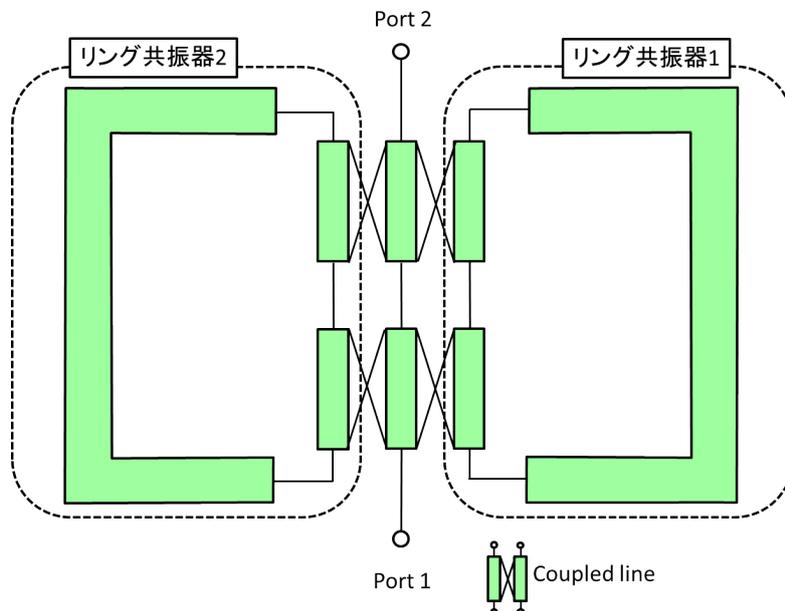


図 3.1: 4bit の情報量を有するチップレス RFID タグの回路構造

図 3.1 示すように 4bit の情報量を有するチップレス RFID タグは 2 周波数での減衰極を制御可能な 2 個のリング共振器を用いて構成される. 図 3.1 に示したリング共振器 1 は 7.25 GHz 及び 7.45 GHz の周波数における減衰極の有無を制御する. またリング共振器 2 は 7.65 GHz 及び 7.85 GHz の周波数における減衰極の有無を制御する.

## 3.2 リング共振器 1 の構造及びその周波数特性

図 3.1 に示した 7.25 GHz 及び 7.45 GHz の周波数における減衰極の有無を制御するリング共振器 1 の構造及びその周波数特性について述べる.

### 3.2.1 減衰極をそれぞれ 7.25 GHz 及び 7.45 GHz に設定した場合

減衰極をそれぞれ 7.25 GHz 及び 7.45 GHz に設定した場合のリング共振器の回路パラメータを表 3.1 に示す.



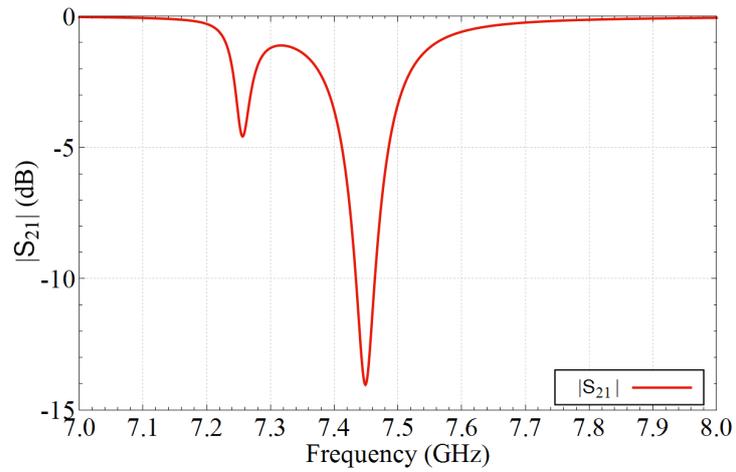


図 3.3: 図 3.2 に示した回路の周波数特性

図 3.3 に示した周波数特性より減衰極はそれぞれ 7.256GHz 及び 7.449GHz に実現することを確認した. またそれぞれの減衰極での挿入損失は 4.58 dB 及び 14.04 dB であった.

### 3.2.2 減衰極をどちらも 7.25 GHz に設定した場合

表 3.2:  $f=7.25$  GHz の回路パラメータ

$Z_e$	59.58 $\Omega$
$Z_o$	37.97 $\Omega$
$Z_1$	48.77 $\Omega$
$\theta_1$	135 $^\circ$
$\theta_2$	45 $^\circ$

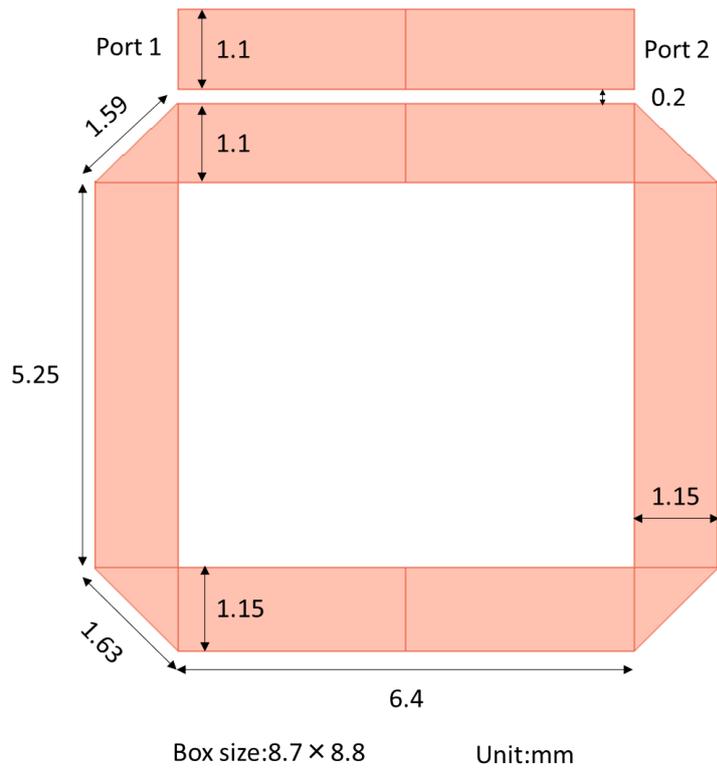


図 3.4: 減衰極をそれぞれ 7.25 GHz に設定した場合の回路構造

また図 3.4 に示した回路を電磁界シミュレーションを用いて計算した周波数特性を図 3.5 に示す。

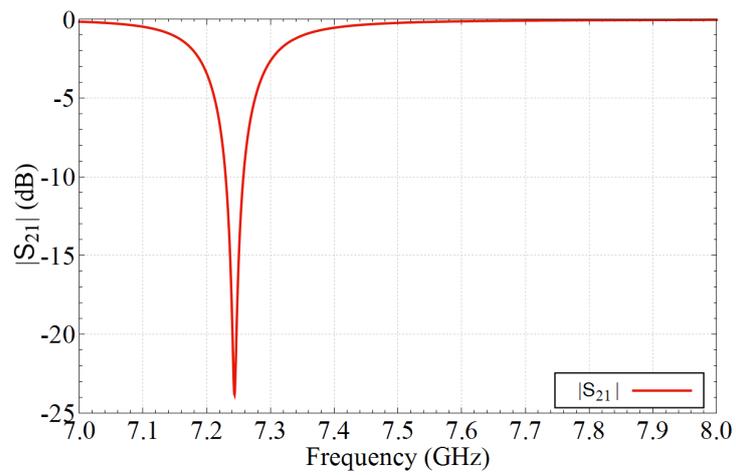


図 3.5: 図 3.4 に示した回路の周波数特性



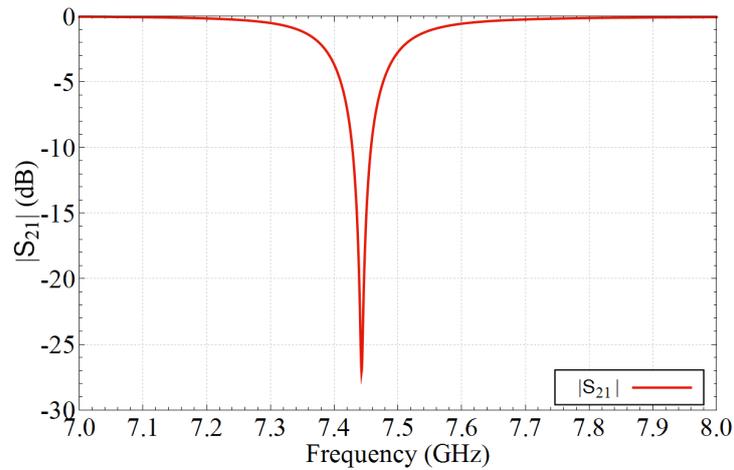


図 3.7: 図 3.6 に示した回路の周波数特性

図 3.7 に示した周波数特性より減衰極は 7.443GHz に実現することを確認した。また減衰極での挿入損失は 27.12 dB であった。

### 3.3 リング共振器 2 の構造及びその周波数特性

図 3.1 に示した 7.65 GHz 及び 7.85 GHz の周波数における減衰極を有無を制御するリング共振器 2 の構造及びその周波数特性について述べる。

#### 3.3.1 減衰極をそれぞれ 7.65 GHz 及び 7.85 GHz に設定した場合

減衰極をそれぞれ 7.65 GHz 及び 7.85 GHz に設定した場合のリング共振器の回路パラメータを表 3.4 に示す。

表 3.4:  $f=7.75\text{GHz}$  の回路パラメータ

$Z_e$	59.58 $\Omega$
$Z_o$	37.97 $\Omega$
$Z_1$	51.75 $\Omega$
$\theta_1$	135 $^\circ$
$\theta_2$	45 $^\circ$

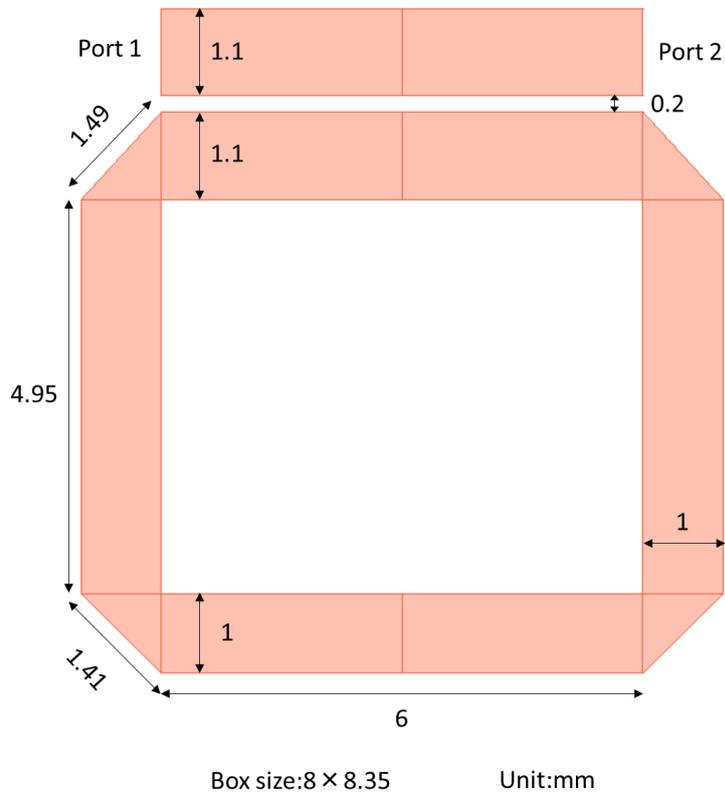


図 3.8: 減衰極をそれぞれ 7.65 GHz 及び 7.85 GHz に設定した場合の回路構造

また図 3.8 に示した回路を電磁界シミュレーションを用いて計算した周波数特性を図 3.9 に示す。

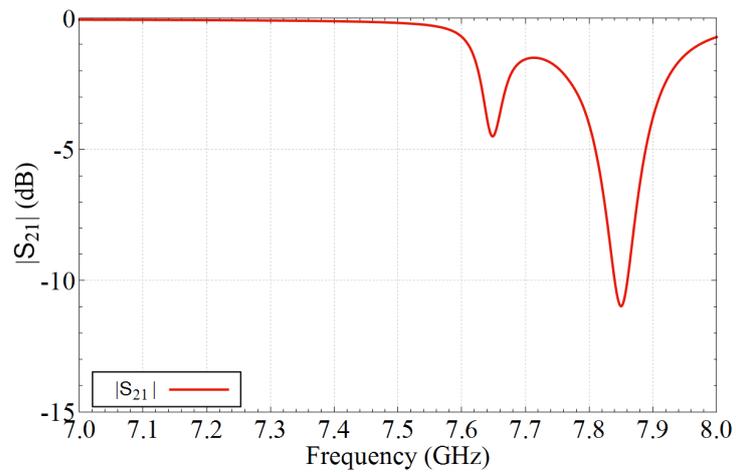


図 3.9: 図 3.8 に示した回路の周波数特性



また図 3.10 に示した回路を電磁界シミュレーションを用いて計算した周波数特性を図 3.11 に示す。

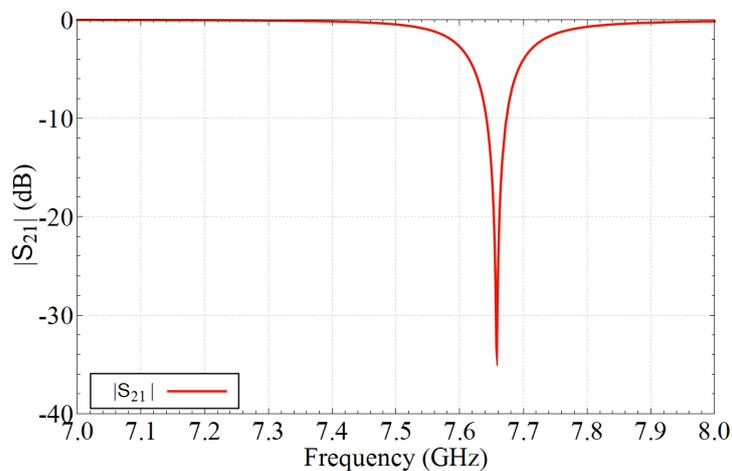


図 3.11: 図 3.10 に示した回路の周波数特性

図 3.11 に示した周波数特性より減衰極は 7.658GHz に実現することを確認した。また減衰極での挿入損失は 33.91 dB であった。

### 3.3.3 減衰極をどちらも 7.85 GHz に設定した場合

表 3.6:  $f=7.85\text{GHz}$  の回路パラメータ

$Z_e$	59.58 $\Omega$
$Z_o$	37.97 $\Omega$
$Z_1$	48.77 $\Omega$
$\theta_1$	135 $^\circ$
$\theta_2$	45 $^\circ$

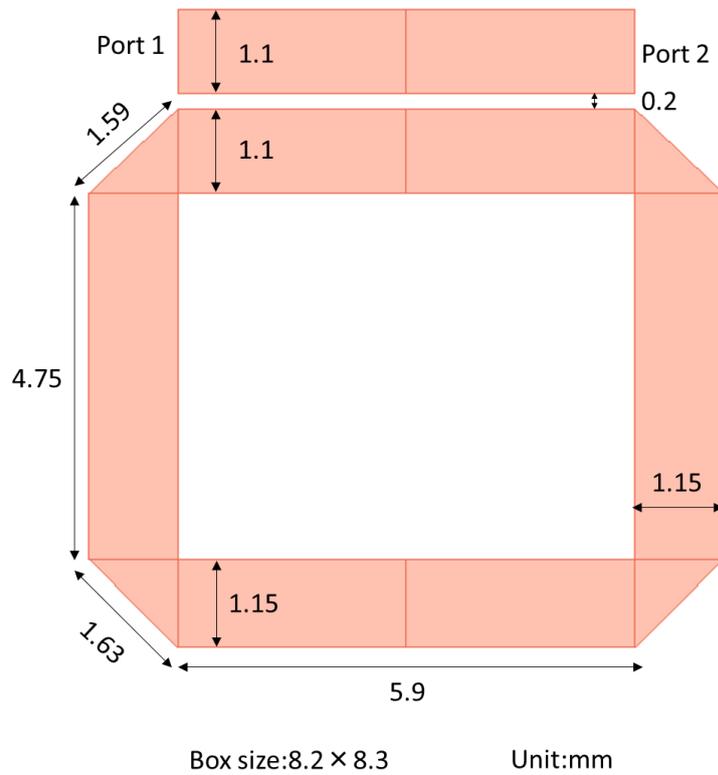


図 3.12: 減衰極をそれぞれ 7.85 GHz に設定した場合の回路構造

また図 3.12 に示した回路を電磁界シミュレーションを用いて計算した周波数特性を図 3.13 に示す。

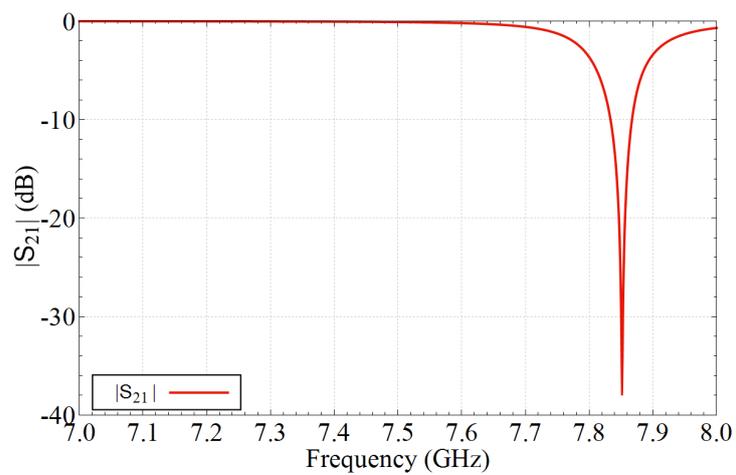


図 3.13: 図 3.12 に示した回路の周波数特性

図 3.13 に示した周波数特性より減衰極は 7.851GHz に実現することを確認した。  
また減衰極での挿入損失は 36.79 dB であった。

### 3.4 チップレス RFID タグの周波数特性

#### 3.4.1 1111 を表現する場合

情報 1111 を持つチップレス RFID タグの回路構造を図 3.14 に示す。図 3.14 に示すように情報 1111 を持つチップレス RFID タグは図 3.2 及び図 3.8 に示したリング共振器を同一の給電線へ結合する構成である。

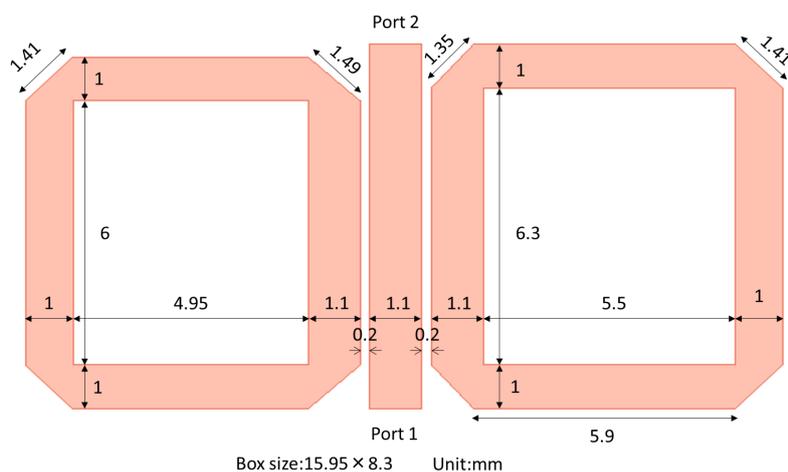


図 3.14: 情報 1111 を持つチップレス RFID タグの回路構造

また図 3.14 に示した回路を電磁界シミュレーションを用いて計算した周波数特性を図 3.15 に示す。

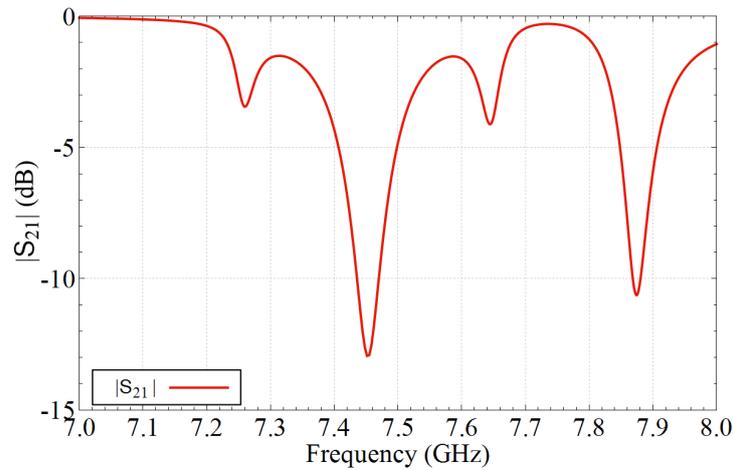


図 3.15: 図 3.14 に示した回路の周波数特性

図 3.15 に示した周波数特性より各減衰極実現周波数は低域側からそれぞれ 7.259 GHz, 7.448 GHz, 7.644 GHz 及び 7.873 GHz であることを確認した. したがって減衰極実現周波数は図 3.2 及び図 3.8 の共振器の減衰極実現周波数とほぼ一致することを確認できた. またそれぞれの減衰極での挿入損失はそれぞれ 3.41 dB, 12.94 dB, 4.12 dB 及び 10.63 dB であり, 図 3.2 及び図 3.8 に示した共振器の減衰極実現周波数における挿入損失に比べ小さくなっていった.

### 3.4.2 1010 を表現する場合

情報 1010 を持つチップレス RFID タグの回路構造を図 3.16 に示す. 図 3.16 に示すように情報 1010 を持つチップレス RFID タグは図 3.4 及び図 3.10 に示したリング共振器を同一の給電線へ結合する構成である.

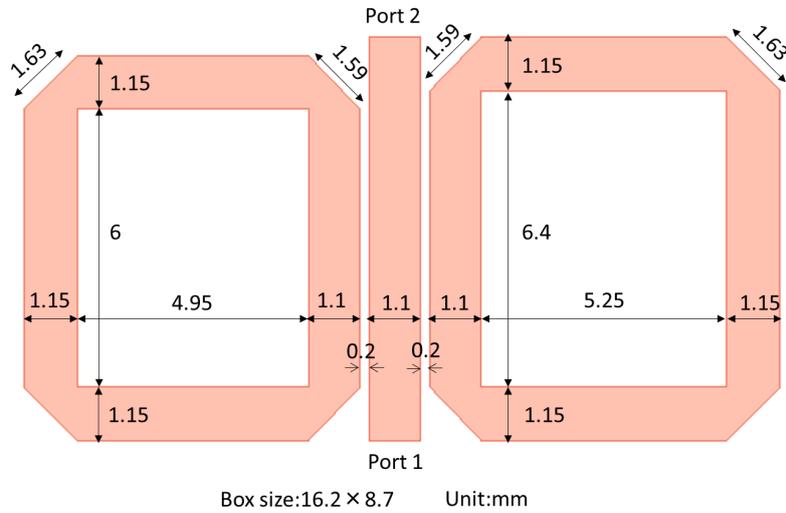


図 3.16: 情報 1010 を持つチップレス RFID タグの回路構造

また図 3.16 に示した回路を電磁界シミュレーションを用いて計算した周波数特性を図 3.17 に示す。

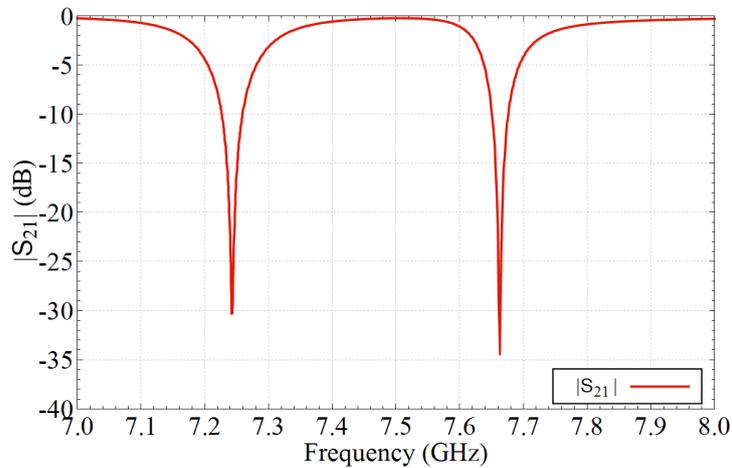


図 3.17: 図 3.16 に示した回路の周波数特性

図 3.17 に示した周波数特性より各減衰極実現周波数は低域側からそれぞれ 7.242 GHz 及び 7.663 GHz であることを確認した. したがって減衰極実現周波数は図 3.4 及び図 3.10 の共振器の減衰極実現周波数とほぼ一致することを確認できた. またそれぞれの減衰極での挿入損失はそれぞれ 30.28 dB 及び 33.32 dB であり, 7.242 GHz

における挿入損失は図 3.4 に示した共振器の挿入損失よりも増加したことを確認した。また 7.663 GHz における挿入損失は図 3.4 に示した共振器の挿入損失とおおよそ一致した。

### 3.4.3 0101 を表現する場合

情報 0101 を持つチップレス RFID タグの回路構造を図 3.18 に示す。図 3.18 に示すように情報 1010 を持つチップレス RFID タグは図 3.6 及び図 3.12 に示したリング共振器を同一の給電線へ結合する構成である。

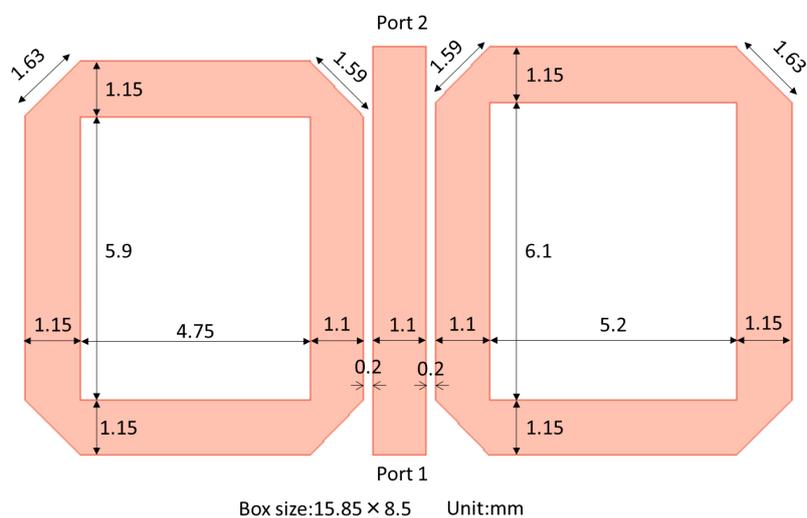


図 3.18: 情報 0101 を持つチップレス RFID タグの回路構造

また図 3.18 に示した回路を電磁界シミュレーションを用いて計算した周波数特性を図 3.19 に示す。

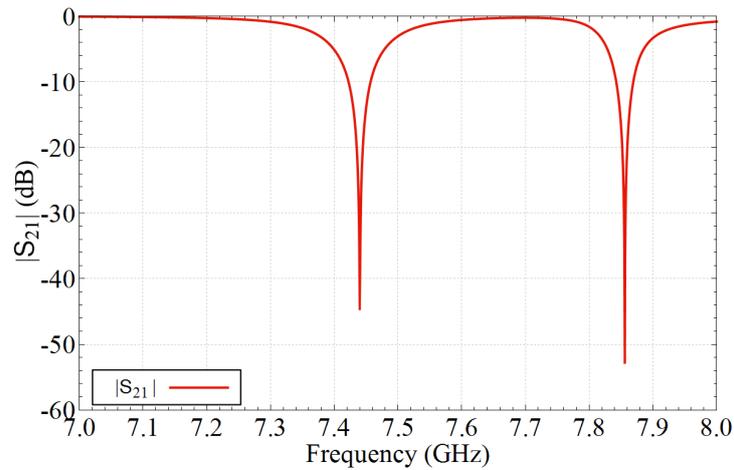


図 3.19: 図 3.18 に示した回路の周波数特性

図 3.19 に示した周波数特性より各減衰極実現周波数は低域側からそれぞれ 7.439 GHz 及び 7.856 GHz であることを確認した. したがって減衰極実現周波数は図 3.6 及び図 3.12 の共振器の減衰極実現周波数とほぼ一致することを確認できた. またそれぞれの減衰極での挿入損失はそれぞれ 42.95 dB 及び 51.12 dB であり図 3.6 及び図 3.12 に示した共振器の減衰極実現周波数における挿入損失に比べ大きくなった. しかしながら単体のリング共振器の周波数特性と比較して 15 dB 以上も挿入損失が大きくなるとは考えにくい. 挿入損失が大きくなった原因として電磁界シミュレーションのメッシュ密度が十分でなく正確な値が計算されていないと考えられる.

## 第4章 タグ読み取りを想定した電磁界シミュレーション

本章ではタグ情報の読み取りに関する検討を行う。3章までは給電線及び共振器が同一基板上で結合する構成を想定しチップレス RFID タグの設計を行った。タグ情報の読み取りに関して空気層を介して共振器を励振する方式が既に検討されている [11]。空気層を介して給電線及び共振器が結合する場合、タグ情報の読み取りに関して電磁界シミュレーションを用いて検討した。

### 4.1 タグ読み取りを想定した場合のプロープ及び共振器の構成

タグ読み取りを想定した場合のプロープとタグの電磁界シミュレーションモデルを図 4.1 に示す。図 4.1 に示した通りプロープ及び共振器はそれぞれ別の基板上に存在する。また基板間は空気層である。なお本検討では図 3.2 に示した偶モード及び奇モードによる減衰極をそれぞれ 7.25 GHz 及び 7.45 GHz に設定した共振器をタグとして用い電磁界シミュレーションを行った。

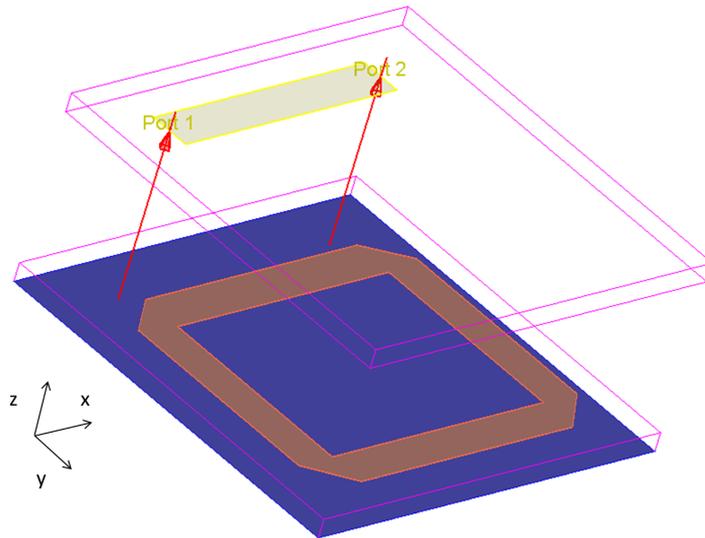


図 4.1: 測定を想定した場合のプローブとタグの構成

## 4.2 同一基板上的構成及びタグ読み取りを想定した構成の周波数特性比較

図 3.2 に示したタグのように同一基板の上に給電線及び共振器を配置した場合及び図 4.1 に示すタグ読み取りを想定した場合の周波数特性の比較を行う. なお同一基板の上に給電線及び共振器を配置した場合は第 3 章での検討通り給電線及び共振器の間隔  $s$  は 0.2 mm のままとした. またタグ読み取りを想定した場合のプローブ及び共振器の  $y$  軸方向の間隔は 0.2 mm, 空気層の厚み  $h$  は 0.2 mm とした.

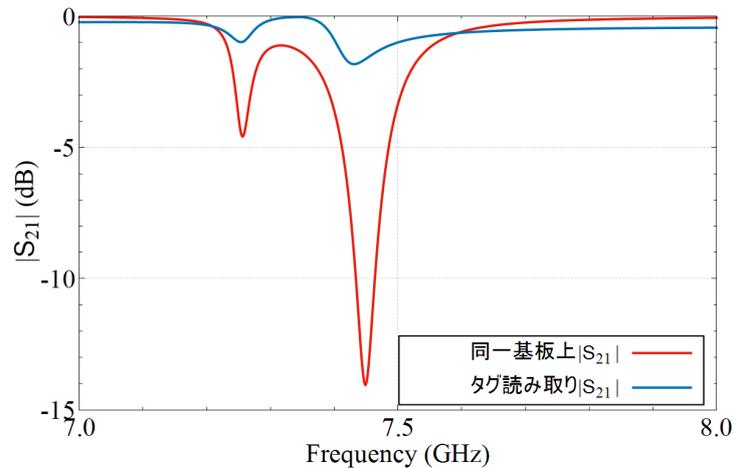


図 4.2: 同一基板上に給電線及び共振器を配置した場合及びタグ読み取りを想定した場合の周波数特性の比較

図 4.2 に示した周波数特性よりタグ読み取りを想定する場合、偶モード及び奇モードにおける減衰極実現周波数は 7.253 GHz 及び 7.43GHz とおおよそ同一基板上に給電線及び共振器を配置した場合と一致したことを確認した。また減衰極実現周波数 7.253 GHz 及び 7.43GHz において挿入損失はそれぞれ 0.99 dB 及び 1.82 dB となった。減衰極実現周波数での挿入損失が大きく減少した原因としてタグ読み取りを想定する場合には同一基板上に給電線及び共振器を配置した場合と比べ結合が小さくなることが考えられる。またおよそ 7 GHz から 7.2 GHz 及び 7.6 GHz から 8 GHz までの減衰極以外での周波数帯で挿入損失が大きくなっていることがわかる。タグ読み取りを想定する場合に減衰極以外での周波数帯で挿入損失が大きくなった原因としては電磁界シミュレーション条件が空気層の厚み  $h$  が 0.2 mm ほどと十分に空気層を設けられていないこと原因と考えられる。

### 4.3 プロブの配置による周波数特性の変化傾向

本節ではプローブの配置による周波数特性の変化傾向を確認する。

### 4.3.1 プローブ及びタグ間の垂直方向距離の変化

垂直方向距離 ( $z$  方向) を変化させた場合, つまり空気層の厚み  $h$  を変化させた場合の周波数特性を図 4.3 に示す. また図 4.3 の拡大図を図 4.4 に示す.

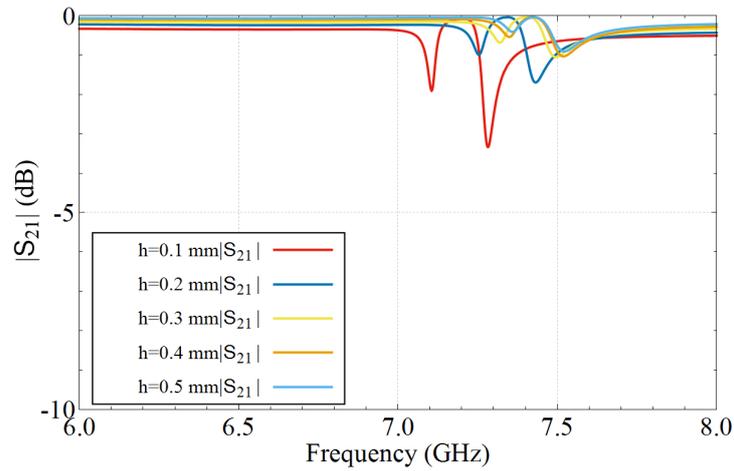


図 4.3: 垂直方向距離  $h$  を変化させた場合の周波数特性

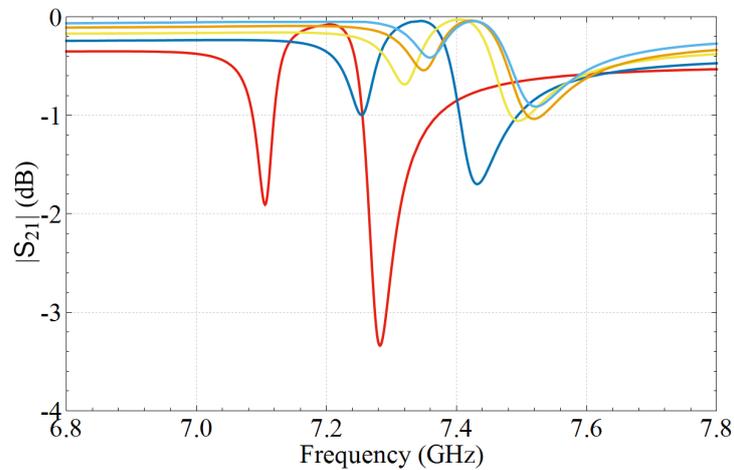


図 4.4: 図 4.3 の拡大図

図 4.3 に示した周波数特性より空気層の厚み  $h$  の変化により減衰極実現周波数が変化することを確認した. 減衰極実現周波数が変化する原因として設計で用いた平行結合線路の偶モード及び奇モードインピーダンスのパラメータが空気層の厚み  $h$  により変化することが原因と考えられる. また空気層の厚み  $h$  を大きなるほど挿

入損失は減少することを確認した. 原因として空気層の厚み  $h$  が大きくなるにつれ結合が小さくなることが考えられる.

### 4.3.2 プローブ及びタグ間の水平方向距離の変化

図 4.5 及び図 4.6 にプローブの配置を  $y$  方向に変化させた場合の周波数特性の変化を示す.

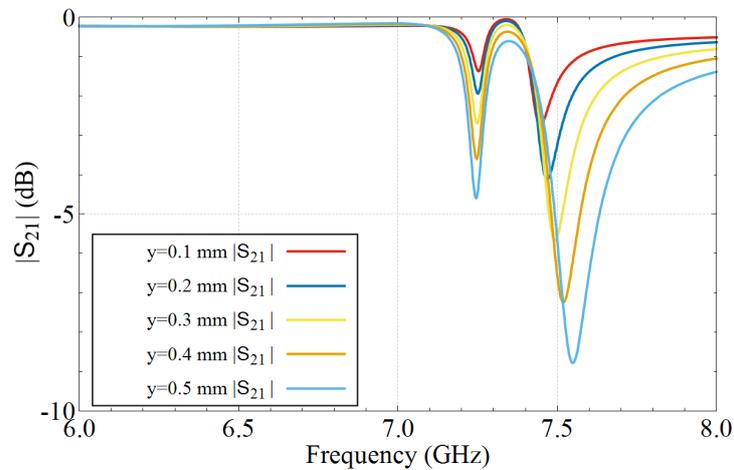


図 4.5: プローブの配置を水平方向距離  $y$  に 0.1mm から 0.5mm まで変化させた場合の周波数特性

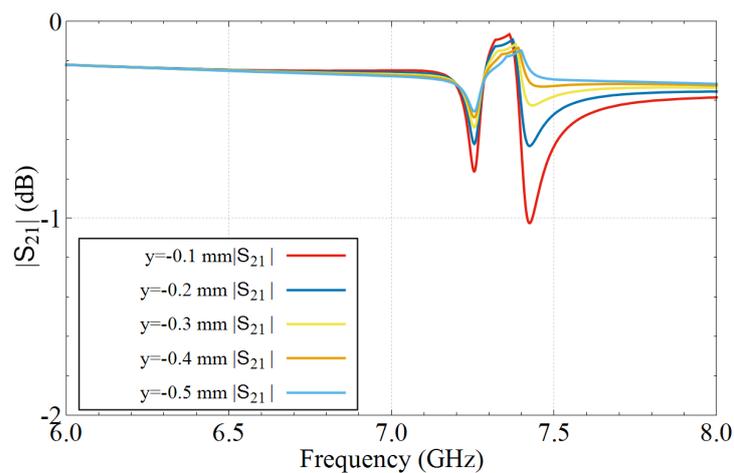


図 4.6: プローブの配置を水平方向距離  $y$  に -0.1mm から -0.5mm まで変化させた場合の周波数特性

図 4.5 及び図 4.6 に示した周波数特性よりプローブを水平方向距離  $y$  の変化により減衰極実現周波数が変化することを確認した. 減衰極実現周波数が変化する原因として設計で用いた平行結合線路の偶モード及び奇モードインピーダンスのパラメータが変化したことが考えられる. また図 4.5 に示した周波数特性より奇モードにおける減衰極実現周波数は水平方向距離  $y$  に増加に伴い高域側へシフトしていることを確認した. 奇モードによる減衰極のみが高域側へシフトした原因として空気層の厚み  $h$  は変化せず線路間の距離のみが変化したためと考えられる.

## 第5章 結論

本論文は、リング共振器を用いたチップレス RFID タグに関する研究を行った。

第2章では、リング共振器の減衰極実現条件及びリング共振器の設計式を導出した。また回路シミュレーションにより周波数特性の確認を行い、導出した式の妥当性を示した。

第3章では、第2章で導出したリング共振器の設計式を用いて4bitの情報量を有するチップレス RFID タグを構成する2つのリング共振器の構造化及びその周波数特性を確認した。また4bitの情報量を有するチップレス RFID タグの構造化及びその周波数特性を確認した。

第4章では、電磁界シミュレーションを用いてタグ読み取りに関する検討を行った。また給電線及びタグ間の距離を変化させ周波数特性を確認した。

以上の検討よりリング共振器を用いたチップレス RFID タグの設計した。今後の課題として、リング共振器の小型化及び読み取りを想定したリング共振器の設計パラメータの導出が考えられる。

# 謝辞

本研究を進めるにあたり、多くの方々からご指導、ご協力を頂きました。主任指導教員である和田光司教授および指導教員小野哲助教に心より感謝申し上げます。和田光司教授にはご自身もお忙しいところ、主任指導教員として様々なご助言、ご指導を頂きました。また研究活動だけでなく就職活動に関するご相談にまで親身に乗ってくださりました。ここに感謝申し上げます。また小野哲助教には本研究に関し多くのアドバイス、ご協力をして頂きました。とりわけ私が悩んだ際にはお考えを示してくださり感謝しております。

また、研究室の事務手続き等、研究活動に専念できるよう取り計らって下さった夏山暁美秘書に深く感謝申し上げます。

そして、共に研究に励んできた先輩方や同期、後輩の皆様にも3年間大変お世話になりました。大学院から編入し何も分からない状態の私をサポートして下さったこと、研究室を取りまとめて下さったこと、議論を通じ様々なことを学ばせて頂いたこと心より感謝申し上げます。

和田光司教授および小野哲助教をはじめとする研究室の皆様の助けがなければ修士論文を執筆する段階に達することが出来ませんでした。あらためましてここに感謝を述べさせていただきます。本当にありがとうございました。

なお、本研究の一部は東京大学大規模集積システム設計教育研究センターを通し、Keysight Technologies, inc. の協力で行われたものである。

## 参考文献

- [1] C. M. Nijas, R. Dinesh, U. Deepak, Abdul Rasheed, S. Mridula, K. Vasudevan, and P. Mohanan, "Chipless RFID Tag Using Multiple Microstrip Open Stub Resonators," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 60, Issue. 9, pp. 4429-4432, Sep. 2012.
- [2] P. Prabavathi and S Subha Rani, "Design of Frequency-Signature Based Multiresonators Using Quarter Wavelength Open Ended Stub for Chipless RFID Tag," 2019 National Conference on Communications (NCC), pp.1-6, Jun 2019.
- [3] M. Sumi, R. Dinesh, C. M. N. P. Mohanan, and S. Mridula, "Frequency signature based chipless RFID tag using shorted stub resonators," 2015 IEEE 4th Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation (APCAP), pp.296-299, Jul 2015.
- [4] Palniyappan Prabavathi, Sundaresan Subha Rani, and Ganesan Meena, "Spectral Signature Based Chipless RFID Tag Loaded by Meandered Line Multi-Resonator," *Progress In Electromagnetics Research C*, Vol. 100, pp.121-131, 2020.
- [5] E. M. Amin, and N. Karmakar, "Development of a chipless RFID temperature sensor using cascaded spiral resonators," *SENSORS 2011 IEEE*, pp.554-557, Oct 2011.
- [6] G. T. Santos-Souza, A. A. d. C. Alves, L. L. Bravo-Roger, and H. E. Hernandez-Figueroa, "Numerical determination of frequency guard band resonances for Chipless RFID Tags," 2014 IEEE Brasil RFID, pp.10-12, Sep 2014.

- [7] SH Zainud-Deen, M Abo El-Hassan, HA. Malhat, and K.H Awadalla, "Simple Microstrip Bandstop Resonators for Chipless RFID Tag," 30th National Radio Science Conference (NRSC 2013) ,pp.74-81,Apl 2013.
- [8] 桑沢龍亮, "平面アンテナと複数の SIR で構成したチップレス平面伝送線路 RFID タグに関する研究," 修士論文 Jan.2018.
- [9] V. Sharma and M. Hashmi, "Chipless RFID tag based on open-loop resonator," 2017 IEEE Asia Pacific Microwave Conference (APMC), pp.543-546, Nov. 2017.
- [10] D. Girbau, J. Lorenzo, A. Lazaro, C. Ferrater, and R. Villarino, "Frequency-Coded Chipless RFID Tag Based on Dual-Band Resonators," IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, Volume: 11, pp.126-128, Dec. 2012.
- [11] 酒井 文則, "マルチモード SIR を用いたチップレス RFID タグに関する研究," 博士論文 Sep.2019.
- [12] 牧本三夫, 佐川守一, 松尾道明, 和田光司, "マイクロ波伝送線路共振器の構成と応用-ステップインピーダンス共振器/フィルタの理論と設計," 森北出版, 東京, 2014.
- [13] Hitoshi Ishida and Kiyomichi Araki, "Coupled-line sharp notch filter with significant improvement of attenuation," 2006 Asia-Pacific Microwave Conference, pp. 1264-1267, Dec 2006.
- [14] Min Hung Weng, Cheng-Yuan Hung, and Wu-Nan Chen, "Dual-mode band-pass filters using triangular ring resonators with coupling stubs," Microwave and Optical Technology Letters, Vol.43, No.6, pp.512-515, Dec 2004.