

第8回 インピーダンス整合について(分布定数回路)

TDU



参考書
根日屋英之 植竹古都美 共著

講義資料は
<http://amplet.tokyo/tdu>
からダウンロードできます。

初版：2017年3月19日

ユビキタス無線工学
担当：根日屋 英之

2017年6月1日

1

回路の設計

2017年6月1日

2

回路の設計

回路の設計

バイアス設計 ...

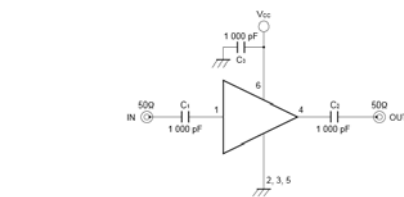
- ① 電源の加え方。
- ② 真空管、トランジスタ、FETの動作点の設定

インピーダンス整合 ... 回路と回路を接続する
インターフェース設計

2017年6月1日

3

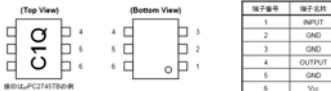
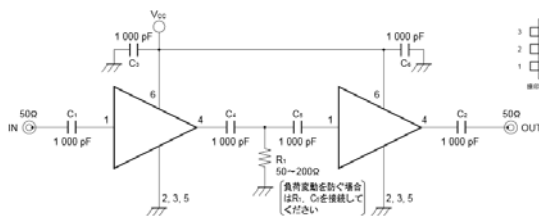
ルネサス μ PC2745TB



端子説明

| 端子番号 | 端子名称 | 端子電圧 | 端子電流 | 接続方法 | 接続時の注意事項 | 内部接続図 |
|------|--------|---------|------|---------|--|-------|
| 1 | INPUT | --- | 0.01 | 1000 pF | 入力端子です。接続は必ずロウソクハンパインで接続し、接続している端子の電圧が0Vを確保してください。また、オフセット電圧を調整し、DCカットしてください。 | |
| 2 | GROUND | 0 | --- | --- | アンプの電源端子です。 | |
| 3 | GROUND | 0 | --- | --- | アンプの電源端子に接続してください。アンプの動作点調整時に、アンプの動作点調整のために、接続している端子の電圧を調整してください。また、オフセット電圧を調整し、DCカットしてください。 | |
| 4 | OUTPUT | --- | 1.96 | --- | 出力端子です。接続は必ずロウソクハンパインで接続し、接続している端子の電圧が0Vを確保してください。また、オフセット電圧を調整し、DCカットしてください。 | |
| | | | 2.84 | --- | アンプの電源端子です。接続は必ずロウソクハンパインで接続し、接続している端子の電圧が0Vを確保してください。 | |
| 6 | Vcc | 2.7-3.3 | --- | --- | 電源電圧端子です。電源電圧は、接続している端子の電圧を調整し、接続している端子の電圧が0Vを確保してください。 | |

注：端子電圧はVcc = 3.0V、VDD = 0V、上段：μPC2745TB、下段：μPC2745TB。



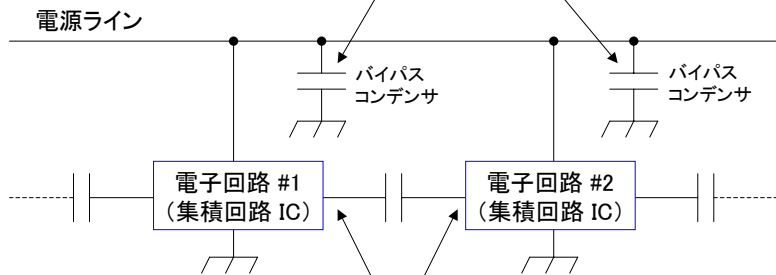
2017年6月1日

4

今どきの回路設計

TDU

電子回路に電源を供給するときは、その集積回路の電源供給ピンに、雑音を落とすためのバイパスコンデンサを入れる。



電子回路 #1 の出カインピーダンスの抵抗成分と電子回路 #2 の入力インピーダンスの抵抗成分が等しい IC が部品として購入できる。そのような IC を接続するときには、IC 間にカップリングコンデンサを入れて、直結する。

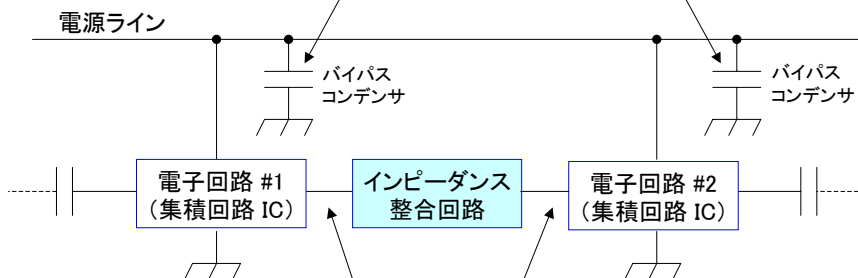
2017年6月1日

5

今どきの回路設計

TDU

電子回路に電源を供給するときは、その集積回路の電源供給ピンに、雑音を落とすためのバイパスコンデンサを入れる。



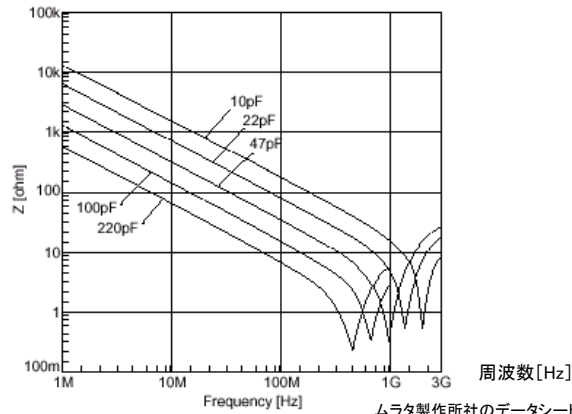
電子回路 #1 の出カインピーダンスの抵抗成分と電子回路 #2 の入力インピーダンスの抵抗成分が等しくないときは、インピーダンス整合回路を、電子回路 #1 と電子回路 #2 の間に挿入する。

2017年6月1日

6

コンデンサCの容量値の決め方

インピーダンス[Ω] GRMシリーズ (SL特性)



ムラタ製作所社のデータシートより転載

2017年6月1日

7

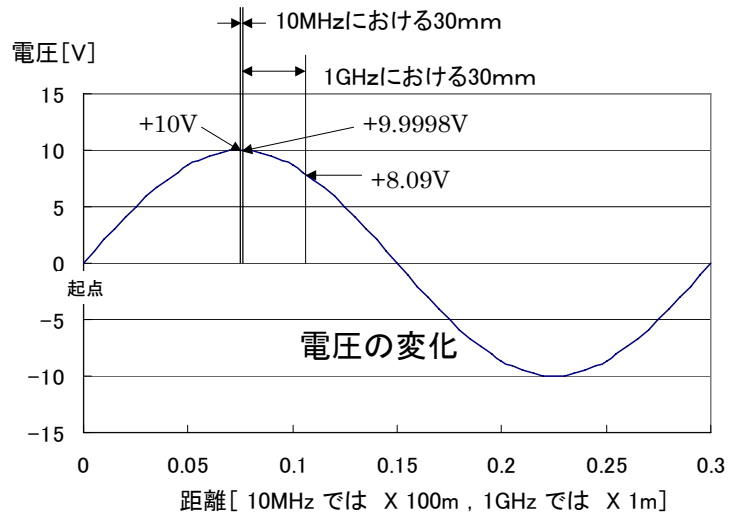
集中定数回路と分布定数回路

2017年6月1日

8

集中定数回路と分布定数回路

TDU

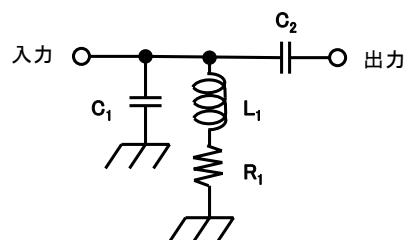


2017年6月1日

9

集中定数回路

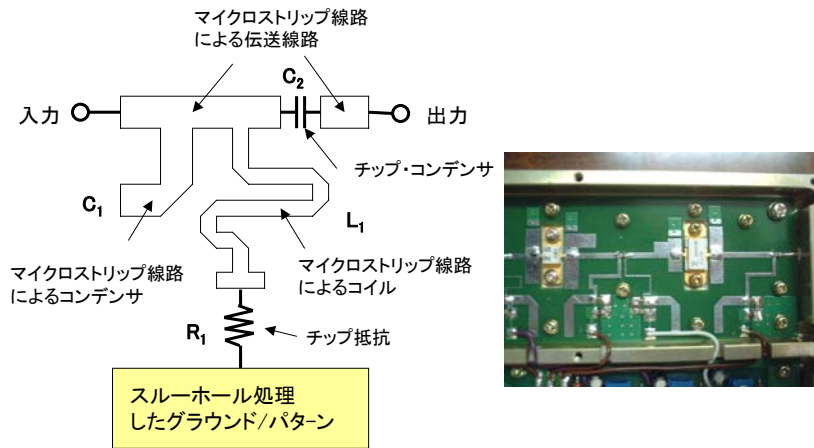
TDU



2017年6月1日

10

分布定数回路



2017年6月1日

11

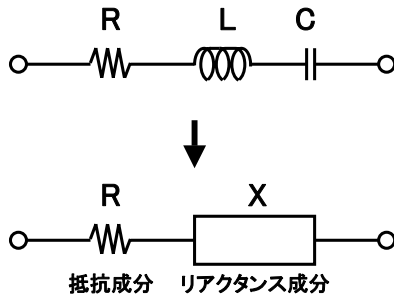
分布定数回路によるインピーダンス整合回路

2017年6月1日

12

インピーダンスとは

全ての電子回路はR, L, Cの直列回路の等価回路で表され、



$$Z = R + \left(j\omega L + \frac{1}{j\omega C} \right)$$

$$Z = R + \left(j\omega L + \frac{j}{j^2\omega C} \right)$$

$$Z = R + j \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)$$

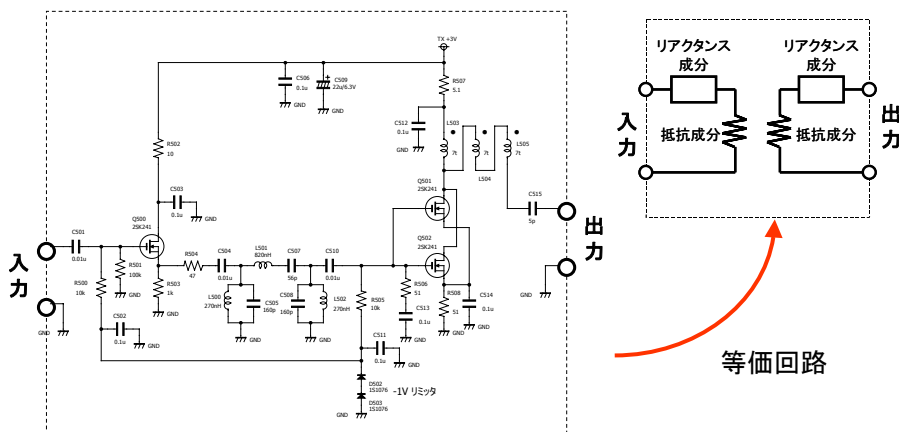
$$= R + jX$$

で与えられるZをインピーダンスという。ここで、 ω は角速度(各周波数)で、 f を周波数とすると、 $\omega = 2\pi f$ となる。

2017年6月1日

13

どんな電子回路もインピーダンスで表される

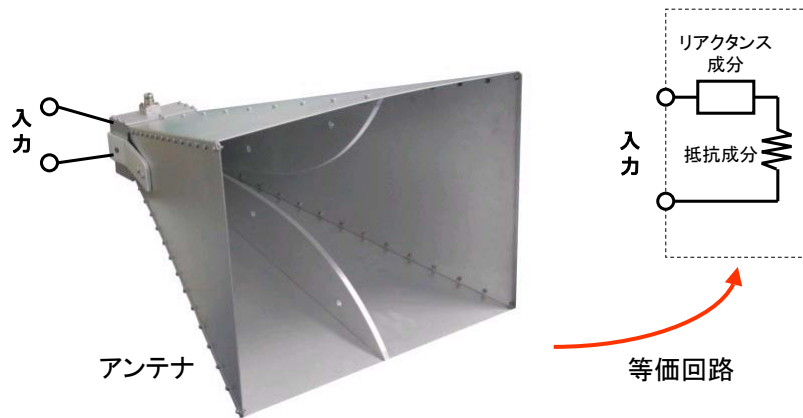


2017年6月1日

14

どんな電子回路もインピーダンスで表される

TDU



2017年6月1日

15

アンテナの電気的特性

TDU

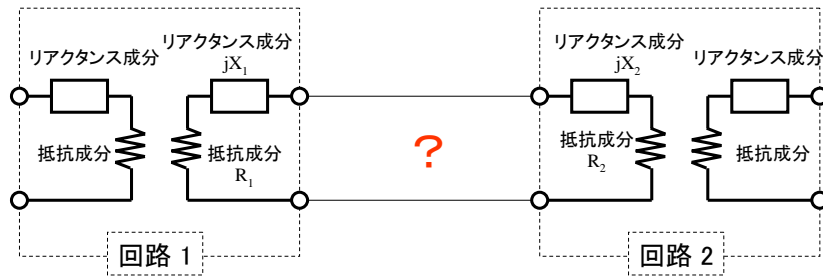


2017年6月1日

16

インピーダンス整合回路の考え方

TDU



「回路1」と「回路2」をうまく接続して信号が効率よく伝送できるには？

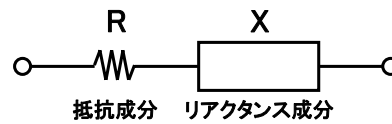
2017年6月1日

17

インピーダンス整合回路の設計（考え方）

TDU

- ★ 抵抗成分：エネルギーの伝送に関与する。
- ★ リアクタンス成分：損失を発生する。



インピーダンス整合回路の設計

Step 1：リアクタンス成分を無くす。（ゼロにする。）

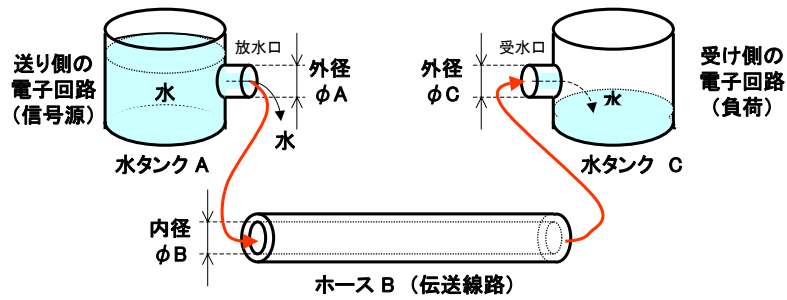
Step 2：抵抗成分をうまく接続する。

2017年6月1日

18

電気信号の流れは水の流りで考える

TDU



水タンク A と水タンク C をホース B でつなぐとき、 $\phi A = \phi B = \phi C$ であれば、水は途中で漏れることなく、水タンク A から水タンク C へ送ることができる。この ϕA 、 ϕB 、 ϕC の外径や内径の概念を、電子回路ではインピーダンスと考える。

2017年6月1日

19

インピーダンス整合回路の設計

Step 1 : リアクタンス成分をゼロにする.

Step 2 : 抵抗成分をうまく接続する.

2017年6月1日

20

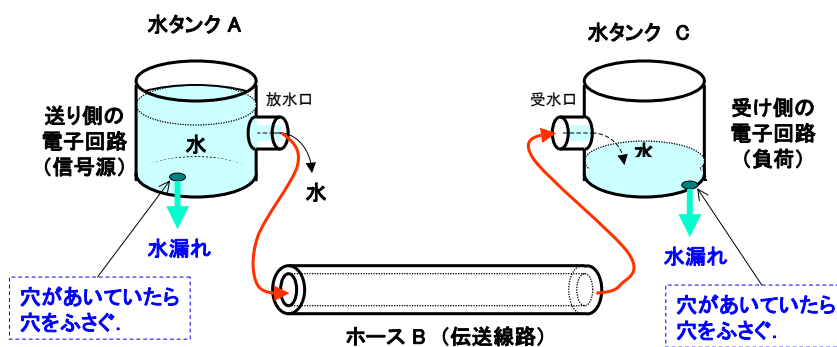
インピーダンス整合回路の設計 (Step 1 : リアクタンス成分をゼロにする.)

2017年6月1日

21

Step 1 : リアクタンス成分をゼロにする

TDU

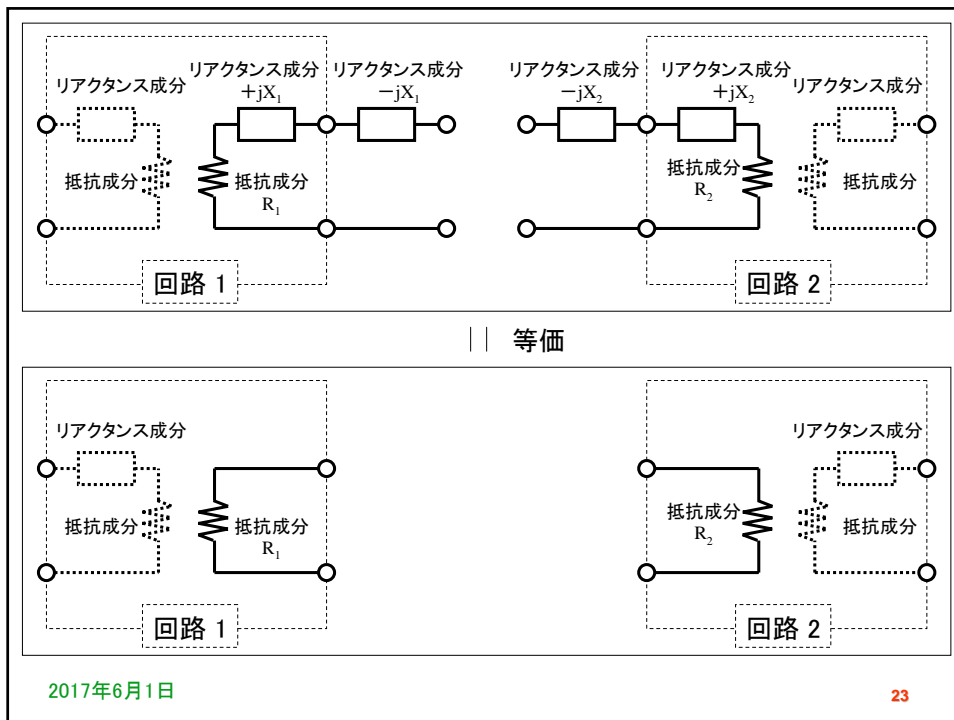


$Z=R+jX$ のリアクタンス成分 (jX) をゼロにするということは ...

もし、水タンク A、水タンク C に穴が開いていたなら → 穴をふさぎ、水漏れを防ぐ。

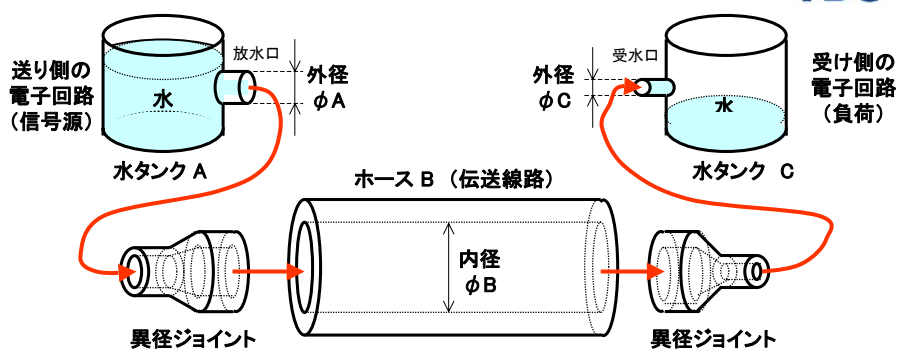
2017年6月1日

22



Step 2 : 抵抗成分をうまく接続する

TDU



$Z=R+jX$ の抵抗成分 (R) は、図中の 外径 ϕA 、内径 ϕB 、外径 ϕC に相当し、抵抗成分をうまく接続するということは ...

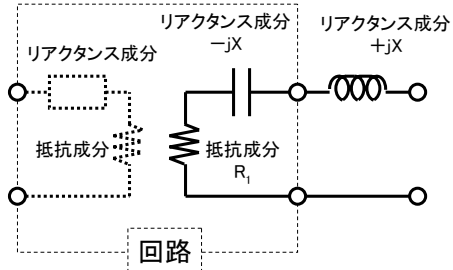
もし、外径 ϕA 、内径 ϕB 、外径 ϕC が異なれば → それらを異径ジョイントを介して接続する。

2017年6月1日


24


「-」と「+」のリアクタンス

TDU



インダクタンス (コイル)

「-」のリアクタンス $-jX$ は、キャパシタンス(コンデンサ)  を示す。

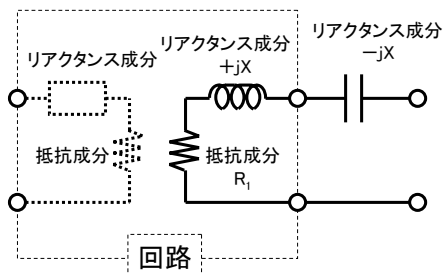
「+」のリアクタンス $+jX$ は、インダクタンス(コイル)  を示す。

2017年6月1日


25


「+」と「-」のリアクタンス

TDU



キャパシタンス (コンデンサ)

「+」のリアクタンス $+jX$ は、インダクタンス(コイル)  を示す。

「-」のリアクタンス $-jX$ は、キャパシタンス(コンデンサ)  を示す。

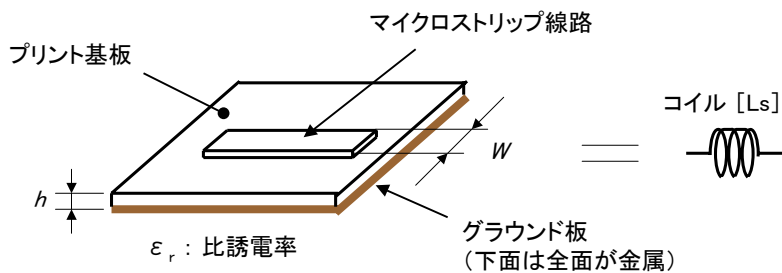
2017年6月1日

26

マイクロストリップ線路のインダクタンス L_s

TDU

$$L_s [nH/cm] = 1.97 \cdot \ln \left(2\pi \frac{h}{W} \right)$$



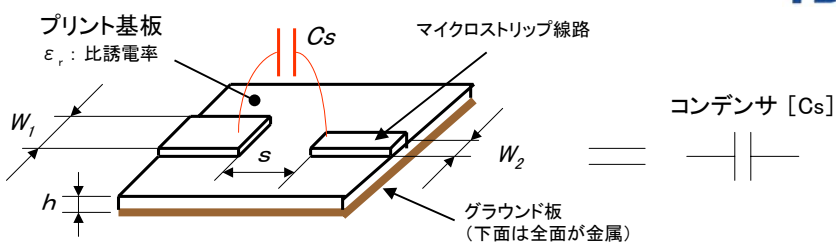
www.kawakawa.net/note/useful_eq/useful_eq.html を参考

2017年6月1日

27

マイクロストリップ線路のキャパシタンス C_s

TDU



$$C_s [pF] = 500 \cdot h \cdot \exp \left(-1.81 \cdot \frac{s}{h} \right) \cdot Q_1 \cdot \left[1 + 4.19 \left\{ 1 - \exp \left(-0.785 \sqrt{\frac{h}{W_1} \cdot \frac{W_2}{W_1}} \right) \right\} \right]$$

$$Q_1 = 0.04598 \cdot \left\{ 0.03 + \left(\frac{W_1}{h} \right)^{0.5} \right\} \cdot (0.272 + 0.07 \cdot \varepsilon_r)$$

$$Q_2 = \frac{1.23}{1 + 0.12 \cdot \left(\frac{W_2}{W_1} - 1 \right)^{0.9}}$$

<http://qucs.sourceforge.net/tech/node79.html> を参考

2017年6月1日

28

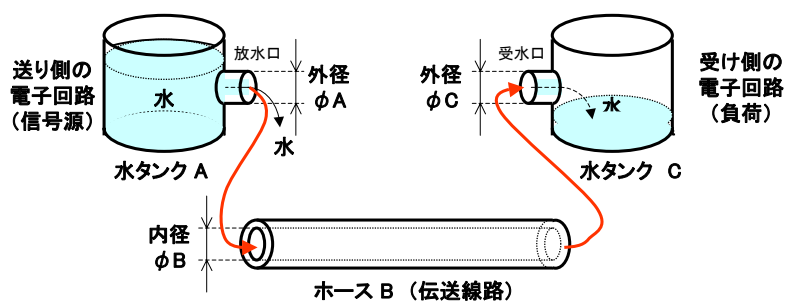
インピーダンス整合回路の設計 (Step 2 : 抵抗成分をうまく接続する.)

2017年6月1日

29

Step 2 : 抵抗成分をうまく接続する

TDU



$Z=R+jX$ の抵抗成分(R)は, 図中の 外径 ϕA , 内径 ϕB , 外径 ϕC に相当し, 抵抗成分をうまく接続するということは ...

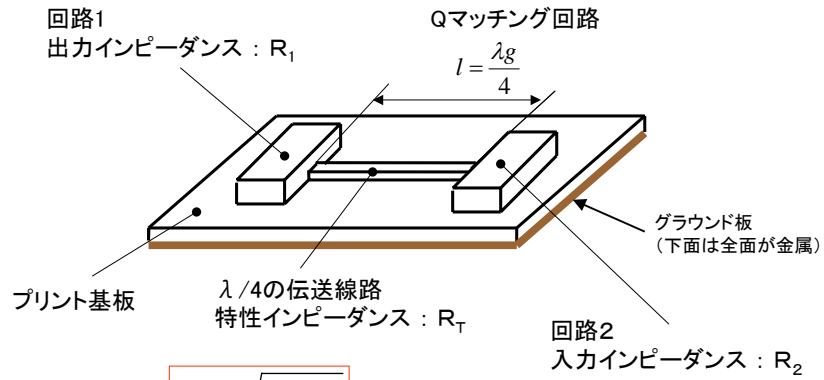
もし, 外径 ϕA , 内径 ϕB , 外径 ϕC が等しければ → それらをただ接続すればよい.

2017年6月1日

30

結論を先に言うとマイクロストリップ線路
によるQマッチング回路($\lambda/4$ の伝送線路)

TDU



2017年6月1日

31

マイクロストリップ線路の設計

2017年6月1日

32

マイクロストリップ線路の設計

1 : 波長短縮率から線路長を決める.

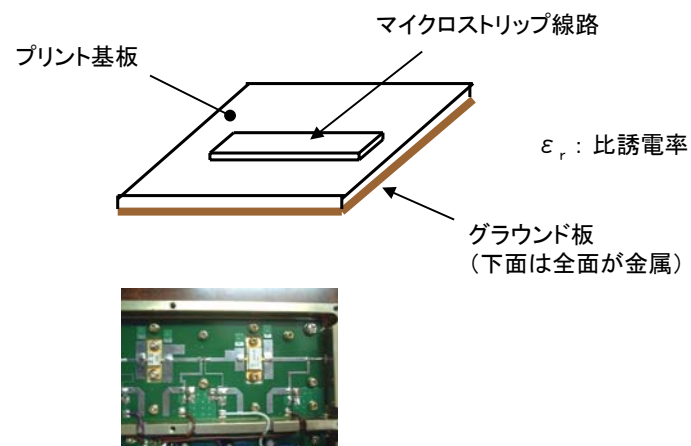
2 : 特性インピーダンスを決める.

2017年6月1日

33

マイクロストリップ線路

TDU

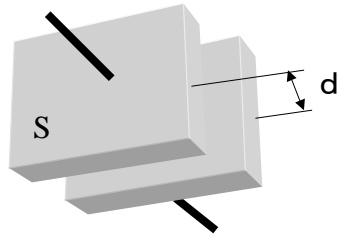


2017年6月1日

34

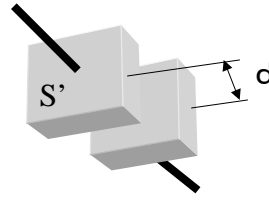
コンデンサの静電容量

TDU



$$C = \epsilon_0 \frac{S}{d}$$

$$\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} (F/m)$$



$$C = \epsilon_r \epsilon_0 \frac{S'}{d} = \epsilon \frac{S'}{d}$$

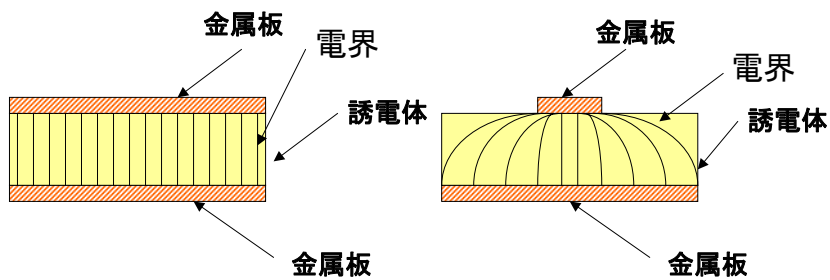
↑ 比誘電率 ↑ 誘電率
 真空中の誘電率

2017年6月1日

35

比誘電率と実効誘電率

TDU



比誘電率

実効誘電率

2017年6月1日

36

誘電率

TDU

誘電率 :

$$\varepsilon = \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0$$

ここで,

$$\begin{cases} \varepsilon: \text{誘電率} \\ \varepsilon_r: \text{比誘電率} \\ \varepsilon_0: \text{真空の誘電率} \end{cases}$$

誘電損失を伴うときは :

$$\varepsilon_r = \varepsilon_r' - i\varepsilon_r''$$

と誘電率を複素数で表す.

このとき,

$$\tan \delta = \frac{\varepsilon_r''}{\varepsilon_r'}$$

を誘電正接という.

2017年6月1日

37

マイクロストリップ線路の設計

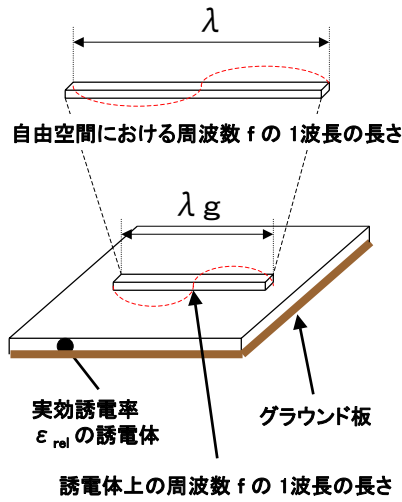
1 : 波長短縮率から線路長を決める.

2017年6月1日

38

誘電体による波長短縮

TDU



$$\lambda_g = \frac{\lambda}{\sqrt{\epsilon_{rel}}}$$

λ_g : 誘電体により波長短縮された周波数 f の 1 波長の長さ

λ : 自由空間における周波数 f の 1 波長の長さ

ϵ_{rel} : 実効誘電率

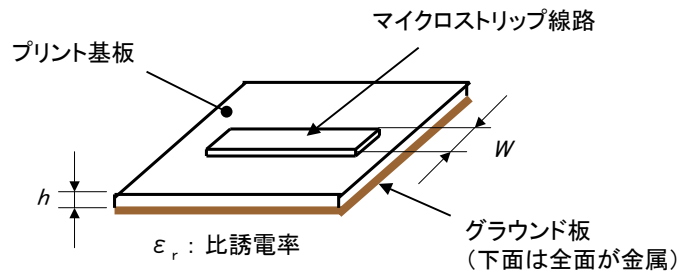
2017年6月1日

39

比誘電率から実効誘電率を計算する

TDU

実効誘電率 ϵ_{rel} と 比誘電率 ϵ_r の関係式(実験式)



2017年6月1日

40

比誘電率から実効誘電率を計算する

TDU

実効誘電率 ϵ_{rel} と 比誘電率 ϵ_r の関係式(実験式)

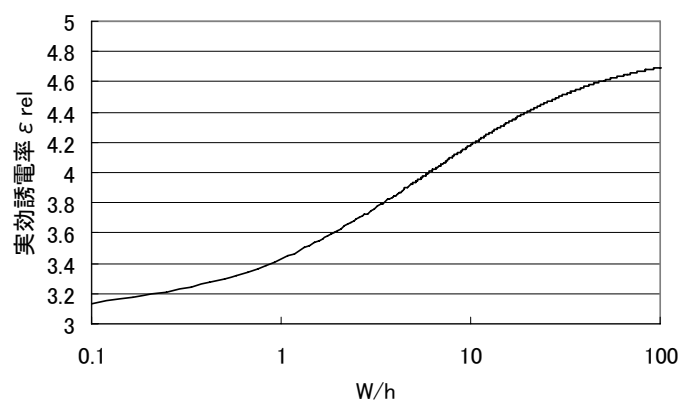
$$\left\{ \begin{array}{l} W/h < 1 \text{ のとき} \\ \\ W/h \geq 1 \text{ のとき} \end{array} \right. \left\{ \begin{array}{l} \epsilon_{rel} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left\{ \frac{1}{\sqrt{1 + 12 \frac{h}{W}}} + 0.04 \left(1 - \frac{W}{h} \right)^2 \right\} \\ \\ \epsilon_{rel} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left\{ \frac{1}{\sqrt{1 + 12 \frac{h}{W}}} \right\} \end{array} \right.$$

2017年6月1日

41

比誘電率と実効誘電率の関係

TDU



比誘電率 $\epsilon_r = 4.8$

根日屋 英之, 小川 真紀:「ユビキタス無線デバイス」(東京電機大学出版局)より転載

2017年6月1日

42

マイクロストリップ線路の設計

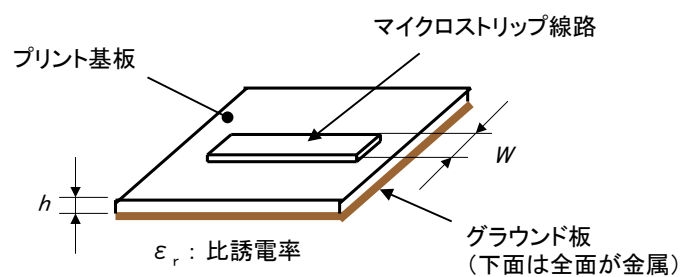
2 : 特性インピーダンスを決める.

2017年6月1日

43

マイクロストリップ線路の特性インピーダンス

TDU



$$R_T = \frac{120\pi}{\left(\frac{W}{h} + 1\right) \sqrt{\epsilon_r + \sqrt{\epsilon_r}}} \quad [\Omega]$$

2017年6月1日

44

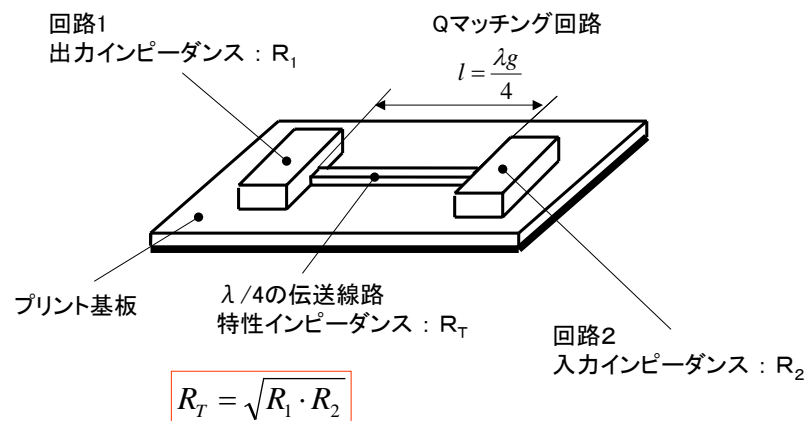
分布定数回路のインピーダンス整合回路

2017年6月1日

45

マイクロストリップ線路 によるQマッチング回路 ($\lambda/4$ の伝送線路)

TDU

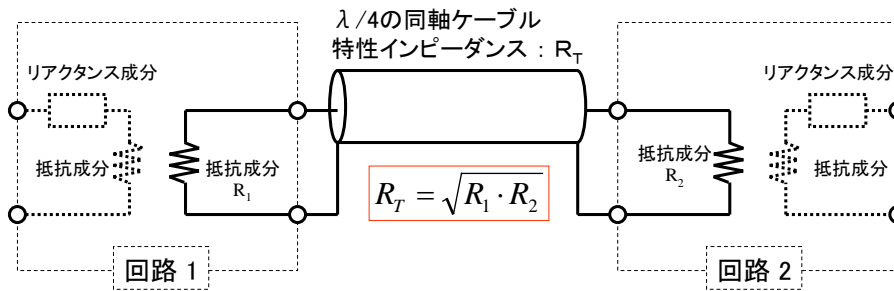


2017年6月1日

46

同軸ケーブルによるQマッチング回路

TDU



2017年6月1日

47

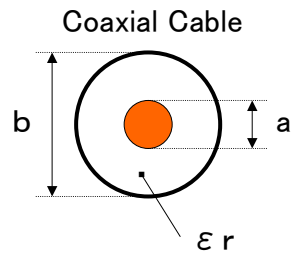
各ストリップラインの特性インピーダンス

2017年6月1日

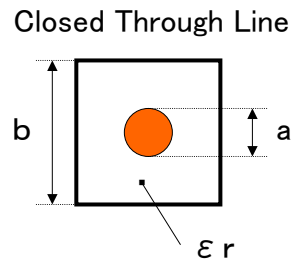
48

各ストリップラインの特性インピーダンス

TDU



$$Z_0(\Omega) = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln\left(\frac{b}{a}\right)$$



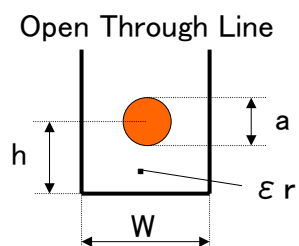
$$Z_0(\Omega) = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln\left(1.08 \frac{b}{a}\right)$$

2017年6月1日

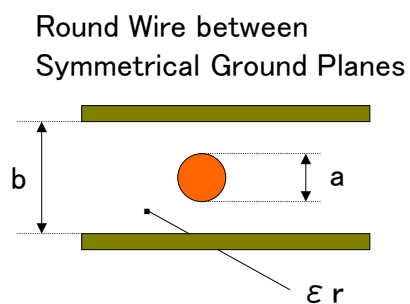
49

各ストリップラインの特性インピーダンス

TDU



$$Z_0(\Omega) = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln\left(\frac{4W \tanh\left(\frac{\pi h}{W}\right)}{\pi a}\right)$$



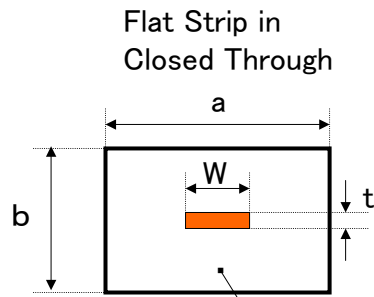
$$Z_0(\Omega) = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln\left(\frac{4b}{\pi a}\right)$$

2017年6月1日

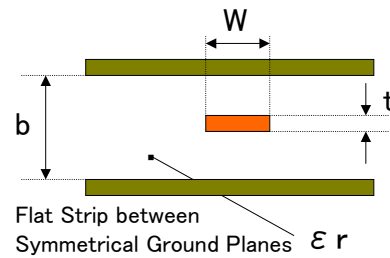
50

各ストリップラインの特性インピーダンス

TDU



$$Z_0(\Omega) = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln\left(\frac{a+b}{W+t}\right)$$



ここで

$$Z_0(\Omega) = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln\left(\frac{4b}{\pi d}\right)$$

$$d = \frac{W}{2} \left[1 + \frac{t}{W} \left\{ 1 + \ln\left(\frac{4\pi W}{t}\right) + \left(\frac{\pi}{2}\right) \left(\frac{t}{W}\right)^2 \right\} \right]$$

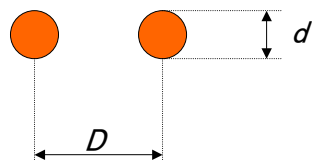
2017年6月1日

51

平行2線伝送路

TDU

Parallel Wire



$$Z_0(\Omega) = 120 \ln\left(\frac{D}{d} + \sqrt{\left(\frac{D}{d}\right)^2 - 1}\right)$$

$d \ll D$ の時

$$Z_0(\Omega) = 120 \ln\left(\frac{2D}{d}\right)$$

2017年6月1日

52

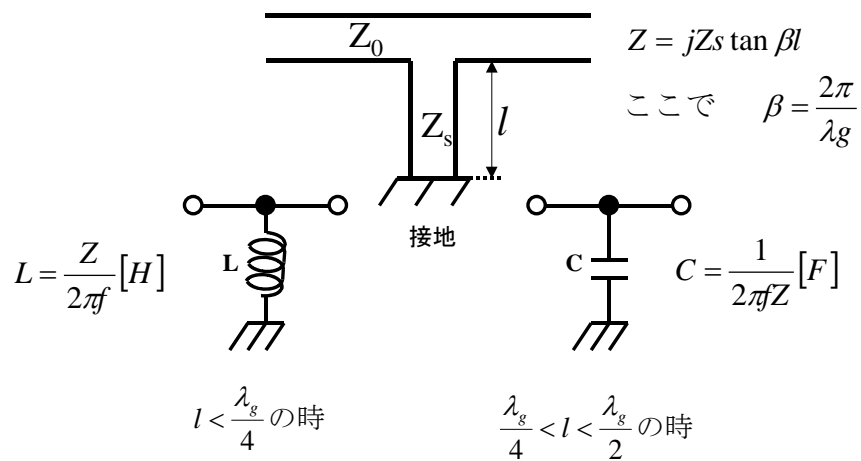
スタブ回路

2017年6月1日

53

マイクロストリップ線路によるショート・スタブ回路

TDU

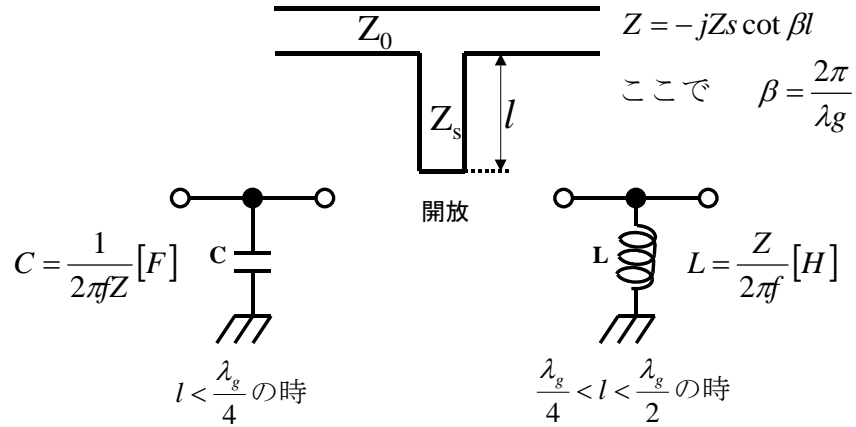


2017年6月1日

54

マイクロストリップ線路によるオープン・スタブ回路

TDU



2017年6月1日

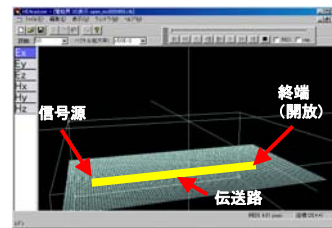
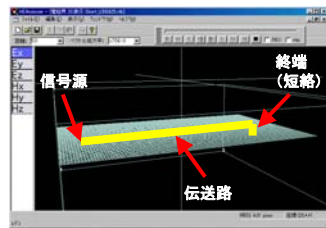
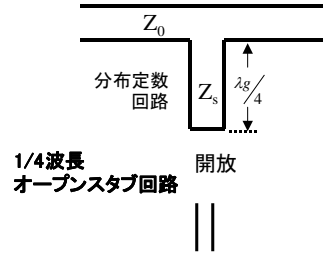
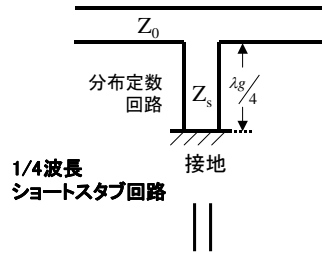
55

1/4波長スタブ回路

2017年6月1日

56

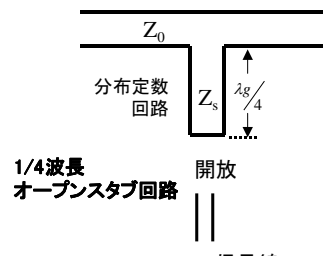
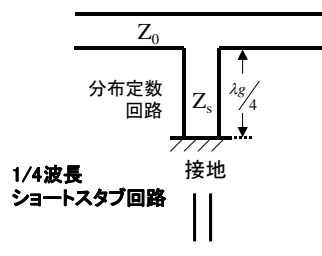
1/4波長スタブ回路



2017年6月1日

57

1/4波長スタブ回路



(a) 並列共振

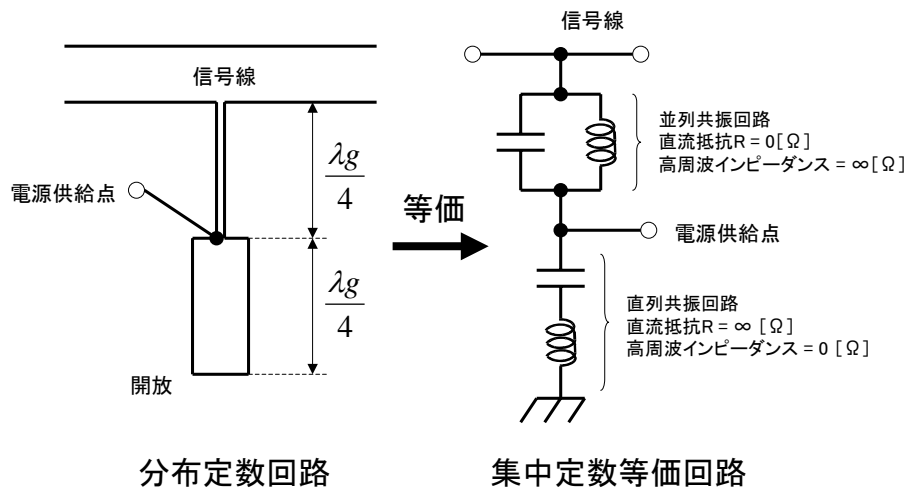
(b) 直列共振

2017年6月1日

58

1/4波長スタブ回路を用いた電源の供給

TDU



2017年6月1日

59