

第4回 電子回路設計で用いる言葉の定義

TDU



参考書
根日屋英之 小川真紀 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
更新：2017年4月16日

ユビキタス無線工学
担当：根日屋 英之

2017年4月27日

1

デシベル

2017年4月27日

2

dB(デシベル)とは

TDU

電子工学の世界では, P_1 と P_2 の電力の比はかなり広範囲にわたる.

① 電力の比の桁数が多くならないようにしたい ... 対数を用いる.

$$\frac{P_2}{P_1} \Rightarrow \log \left(\frac{P_2}{P_1} \right)$$

② 電力比で出てくる頻度が高いのは, 1桁倍なので, 対数で比を表すときも, その桁数は1桁にしたい.

$$dB = 10 \log \left(\frac{P_2}{P_1} \right)$$

2017年4月27日

3

dB(デシベル)とは

TDU

dBとは電力の比で, 2つの電力を P_1 と P_2 とすると

$$dB = 10 \log(\text{電力比}) = 10 \log \frac{P_2}{P_1}$$

電力比を計算する上で基準になる電力(分母の P_1)を, 1mWとしたとき1mW=0dBmのように基準の単位のmをdBの後に付加する.

2017年4月27日

4

dB(デシベル)とは

TDU

[注記] 電力で10dBは電圧でも10dB



重要!

なぜなら100倍の電力は20 dBであるが、 $P = V^2/R = I^2 \cdot R$ より、 P が100倍のときは V も I も10倍にしかない。

2017年4月27日

5

dB(デシベル)とは

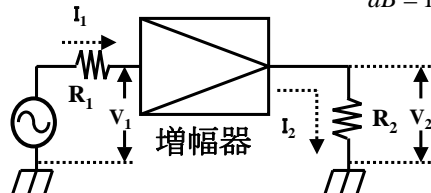
TDU

比べる2つの電力を P_1 と P_2 とすると

$$P_1 = \frac{V_1^2}{R_1}, \quad P_2 = \frac{V_2^2}{R_2}$$

P_1 と P_2 の比をdBでとると

$$dB = 10 \log \frac{P_2}{P_1} = 10 \log \frac{\left(\frac{V_2^2}{R_2}\right)}{\left(\frac{V_1^2}{R_1}\right)}$$



2017年4月27日

6

dB (デシベル) とは

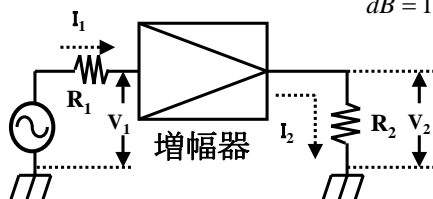
TDU

比べる2つの電力を P_1 と P_2 とすると

$$P_1 = R_1 \cdot I_1^2, \quad P_2 = R_2 \cdot I_2^2$$

P_1 と P_2 の比をdBでとると

$$dB = 10 \log \frac{P_2}{P_1} = 10 \log \frac{I_2^2 \cdot R_2}{I_1^2 \cdot R_1}$$



2017年4月27日

7

dB (デシベル) とは

TDU

ここで, $R_1 = R_2$ の時

$$\begin{aligned} dB &= 10 \log \frac{P_2}{P_1} = 10 \log \frac{\left(\frac{V_2^2}{R_2} \right)}{\left(\frac{V_1^2}{R_1} \right)} = 10 \log \frac{V_2^2}{V_1^2} \\ &= 10 \log \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^2 = 20 \log \left(\frac{V_2}{V_1} \right) \end{aligned}$$

また,

$$\begin{aligned} dB &= 10 \log \frac{P_2}{P_1} = 10 \log \frac{I_2^2 \cdot \cancel{R_2}}{I_1^2 \cdot \cancel{R_1}} = 10 \log \frac{I_2^2}{I_1^2} \\ &= 10 \log \left(\frac{I_2}{I_1} \right)^2 = 20 \log \left(\frac{I_2}{I_1} \right) \end{aligned}$$

2017年4月27日

8

dB(デシベル)の定義の整理

TDU

電力比から(基本定義)

$$dB = 10 \log \left(\frac{P_2}{P_1} \right)$$

$R_1=R_2$ の時のみ電圧比から

$$dB = 20 \log \left(\frac{V_2}{V_1} \right)$$

$R_1=R_2$ の時のみ電流比から

$$dB = 20 \log \left(\frac{I_2}{I_1} \right)$$

2017年4月27日

9

対数表記が便利なところ

更新: 2017年4月16日

TDU

対数表記の便利なところは、掛け算、割り算を足し算、引き算で計算できる。

$$\begin{cases} \log(A \times B) = \log A + \log B \\ \log(A \div B) = \log A - \log B \end{cases}$$

利得が31倍(14.9dB)のアンプAと利得が17倍(12.3dB)のアンプBと電力を1/4倍(-6dB)に減衰するアッテネータを接続すると、総合利得はどれくらいになるか?

$$\begin{cases} G[\text{倍}] = 31 \times 17 \times \frac{1}{4} = 131.75 \rightarrow 21.2[\text{dB}] \\ G[\text{dB}] = 14.9 + 12.3 - 6 = 21.2[\text{dB}] \end{cases}$$

2017年4月27日

10

総合利得の計算の事例

更新：2017年4月16日

TDU

$$\begin{cases} G[\text{倍}] = 100 \times 2.512 \div 2 \times 1 \times 1 \times 1 \times 2 \times 2 = 502.4 \rightarrow 27[\text{dB}] \\ G[\text{dB}] = 20 + 4 - 3 + 0 + 0 + 0 + 3 + 3 \rightarrow 27[\text{dB}] \end{cases}$$

2017年4月27日

11

スミスチャート

2017年4月27日

12

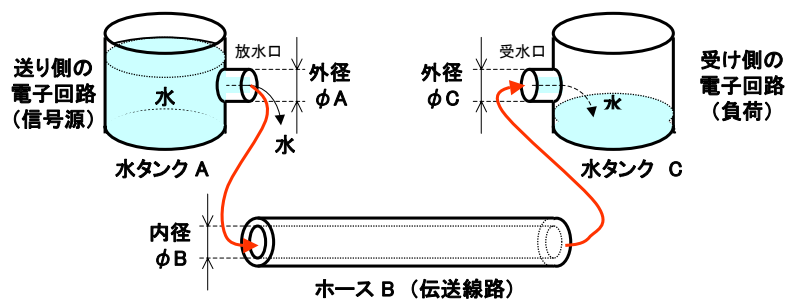
インピーダンスの意味するものは

2017年4月27日

13

電気信号の流れは水の流れで考える

TDU



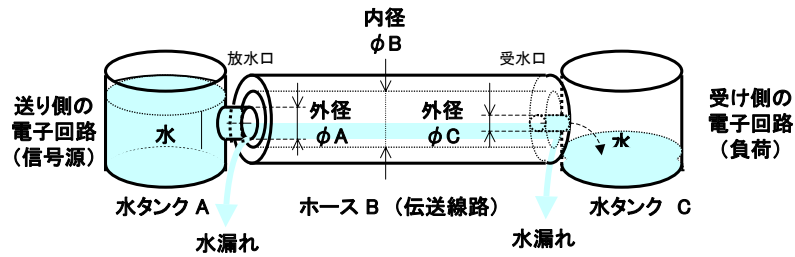
水タンク A と水タンク C をホース B でつなぐとき、 $\phi A = \phi B = \phi C$ であれば、水は途中で漏れることなく、水タンク A から水タンク C へ送ることができる。この ϕA 、 ϕB 、 ϕC の外径や内径の概念を、電子回路ではインピーダンスと考える。

2017年4月27日

14

ホースの内径が水タンクの放水口や受水口の外径と異なるときは

TDU



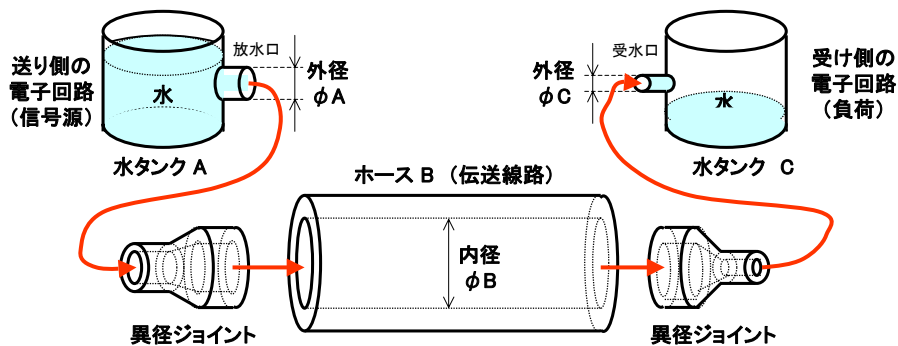
水タンク A と水タンク C をホース B でつなぐとき、 $\phi A \neq \phi B$ 、 $\phi B \neq \phi C$ であると、水はタンクとホースのつなぎ目から水が漏れる。電子回路ではこの概念をインピーダンスの不整合といい、インピーダンスの不整合が起こっている箇所では電気信号が一部、反射を起こす。

2017年4月27日

15

ホースの内径が水タンクの放水口や受水口の外径と異なるときは、異径ジョイントを入れる

TDU

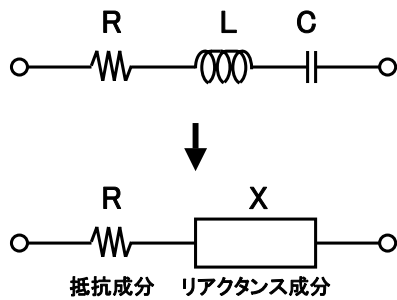


ホースの内径が水タンクの放水口や受水口の外径と異なるときは、異径ジョイントを入れる。この異径ジョイントを入れることは、電子回路ではインピーダンス整合回路を入れることになる。

2017年4月27日

16

改めて、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,

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

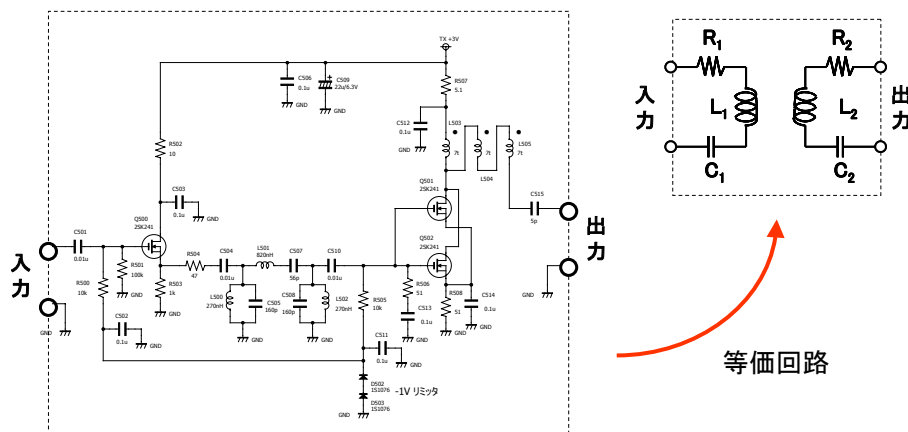
$$= R + jX$$

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4月27日

17

どんな電子回路もインピーダンスで表される



2017年4月27日

18

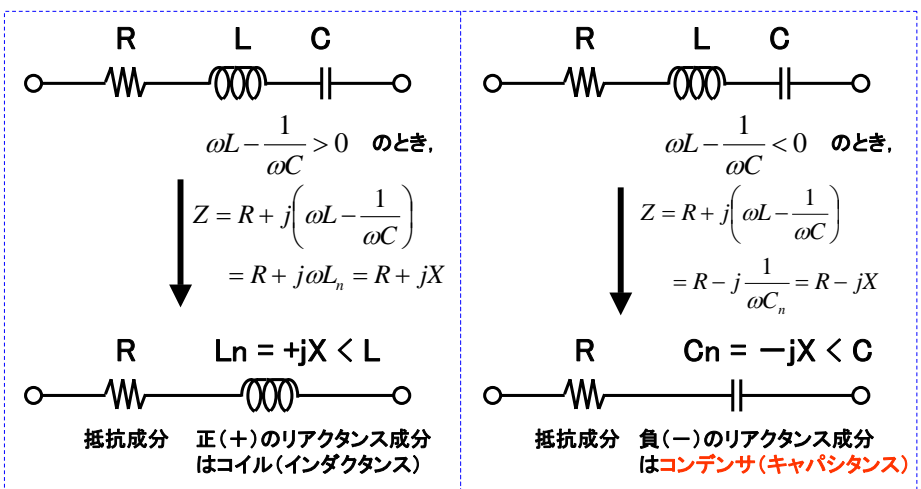
どんな電子回路もインピーダンスで表される



2017年4月27日

19

抵抗成分とリアクタンス成分

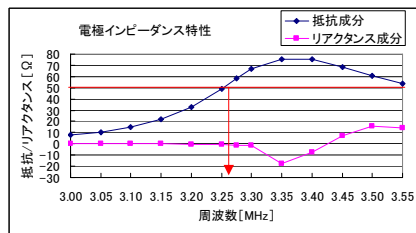
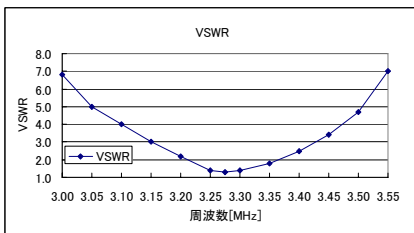


2017年4月27日

20

アンテナの電気的特性

周波数 [MHz]	VSWR	R(Ω)	L(μH)	XL(Ω) = 2πfL	C(pF)	Xc(Ω) = 1/(2πfC)	X(Ω)
3.00	6.8	8	0.30	5.65	9380	5.66	0.00
3.05	5.0	10	0.55	10.60	4919	10.61	-0.01
3.10	4.0	15	0.79	15.29	3351	15.32	-0.03
3.15	3.0	22	1.13	22.36	2252	22.44	-0.07
3.20	2.2	33	1.67	33.58	1468	33.88	-0.30
3.25	1.4	49	2.43	49.62	975	50.23	-0.60
3.28	1.3	58	2.83	58.29	817	59.43	-1.14
3.30	1.4	67	3.23	66.97	704	68.51	-1.53
3.35	1.8	75	2.80	58.94	618	76.88	-17.94
3.40	2.5	75	3.23	69.00	614	76.24	-7.24
3.45	3.4	68	3.50	75.87	670	68.85	7.02
3.50	4.7	61	3.48	76.53	743	61.20	15.33
3.55	7.0	54	3.10	69.15	813	55.14	14.00



2017年4月27日

インピーダンス平面

インピーダンス平面の $R \geq 0$ の範囲の

$R = \text{一定}$

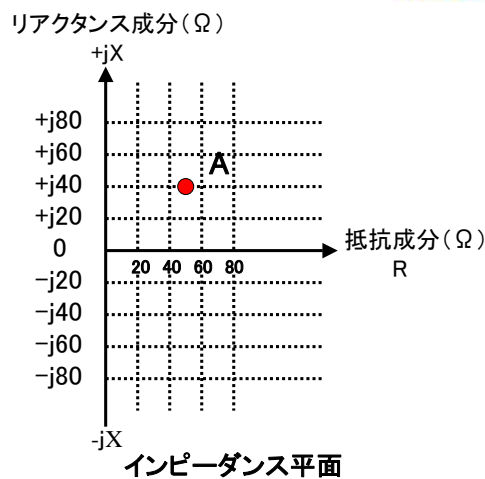
$X = \text{一定}$

の直線群を平面に写像した図表

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

$$= R + jX$$

$$= 50 + j40$$



根日屋 英之、植竹 古都美:「ユビキタス無線工学と微細RFID」(第2版)(東京電気大学出版局)より転載

2017年4月27日

正規化インピーダンス平面

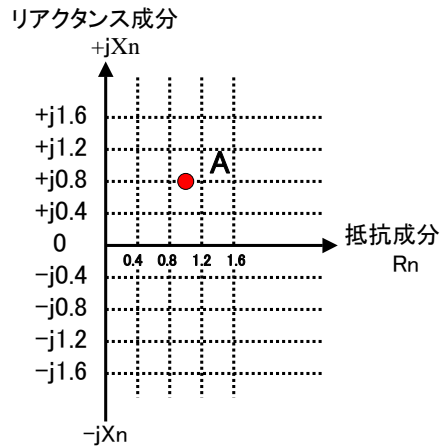
正規化インピーダンス

抵抗成分とリアクタンス成分の値を、そのシステムで使われる特定インピーダンス Z_0 で割った値を、正規化(ノルマライズされた)インピーダンスという。

特性インピーダンスが 50Ω のとき、

$$50\Omega \rightarrow 1, 40\Omega \rightarrow 0.8$$

$$\begin{aligned} Z_n &= R_n + jX_n \\ &= 1 + j0.8 \end{aligned}$$



正規化インピーダンス平面

根日屋 英之, 植竹 古都美:「ユビキタス無線工学と微細RFID」(第2版)(東京電気大学出版局)より転載

2017年4月27日

23

軸の重み付け

$$\text{重み付けの軸上の長さ} = 1 + \frac{R_n - 1}{R_n + 1} \quad \text{又は} \quad 1 + \frac{X_n - 1}{X_n + 1}$$

ここで、 R_n は正規化インピーダンスの抵抗成分
 X_n は正規化インピーダンスのリアクタンス成分

R_n	$(R_n-1)/(R_n+1)$	軸上距離	R_n	$(R_n-1)/(R_n+1)$	軸上距離	R_n	$(R_n-1)/(R_n+1)$	軸上距離
0	-1	0	7	0.75	1.75	100	0.98019802	1.98019802
0.1	-0.81818182	0.18181818	7.5	0.764705882	1.764705882	200	0.990049751	1.990049751
0.2	-0.66666667	0.33333333	8	0.777777778	1.777777778	300	0.993355482	1.993355482
0.3	-0.53846154	0.46153846	8.5	0.789473684	1.789473684	400	0.995012469	1.995012469
0.4	-0.42857143	0.57142857	9	0.8	1.8	500	0.996007984	1.996007984
0.5	-0.33333333	0.66666667	9.5	0.80952381	1.80952381	600	0.996672213	1.996672213
0.6	-0.25	0.75	10	0.818181818	1.818181818	700	0.997146933	1.997146933
0.7	-0.17647059	0.82352941	20	0.904761905	1.904761905	800	0.997503121	1.997503121
0.8	-0.11111111	0.88888889	30	0.935483871	1.935483871	900	0.997780244	1.997780244
0.9	-0.05263158	0.94736842	40	0.951219512	1.951219512	1000	0.998001998	1.998001998
1	0	1	50	0.960784314	1.960784314	10000	0.99980002	1.99980002
1.5	0.2	1.2	60	0.967213115	1.967213115	100000	0.99998	1.99998
2	0.33333333	1.33333333	70	0.971830986	1.971830986	1000000	0.999998	1.999998
2.5	0.428571429	1.428571429	80	0.975308642	1.975308642	10000000	0.9999998	1.9999998
3	0.5	1.5	90	0.978021978	1.978021978	100000000	0.99999998	1.99999998
3.5	0.55555556	1.55555556	100	0.98019802	1.98019802	1000000000	0.999999998	1.999999998
4	0.6	1.6				∞	1	2
4.5	0.63636364	1.63636364						
5	0.66666667	1.66666667						
5.5	0.692307692	1.692307692						
6	0.714285714	1.714285714						
6.5	0.733333333	1.733333333						

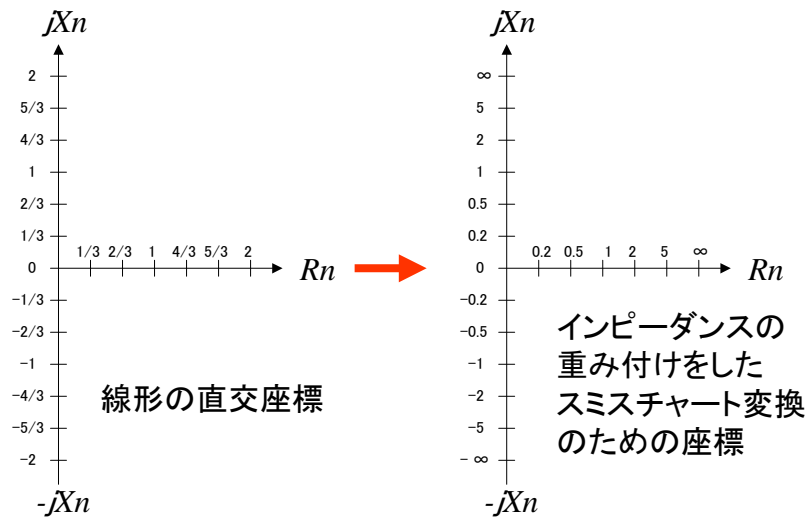
[注記] X_n も同様に計算する

2017年4月27日

24

重み付け正規化インピーダンス平面

TDU

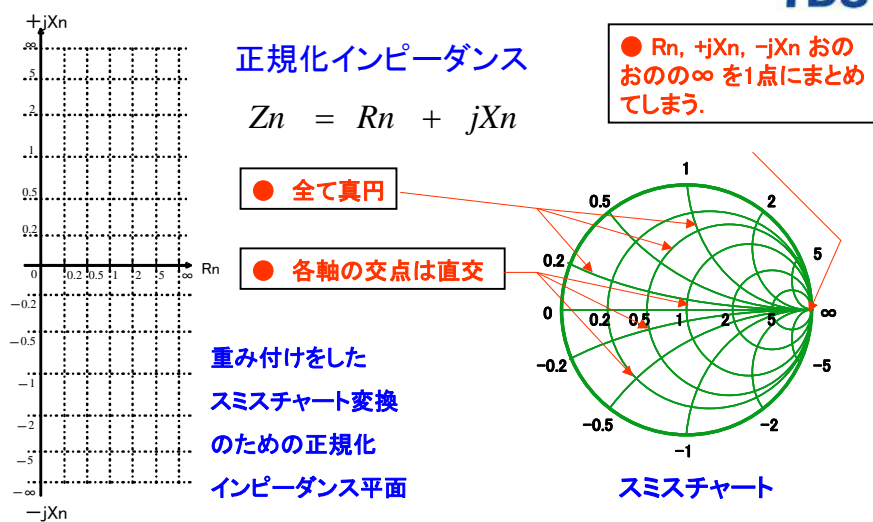


2017年4月27日

25

スミスチャート

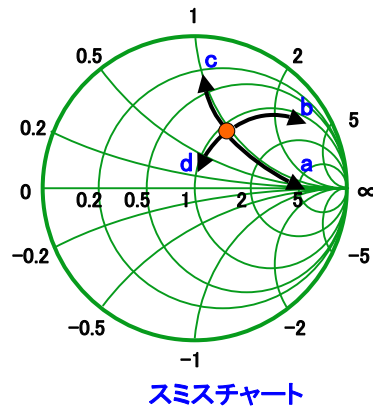
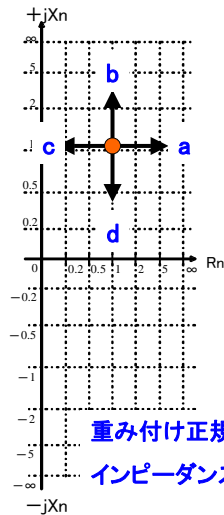
TDU



2017年4月27日

26

インピーダンスの動き



2017年4月27日

27

測定器で見ると



人体通信用電極のインピーダンス特性の測定風景

アンテナの特性の測定(ネットワークアナライザによる)事例です。

2017年4月27日

28

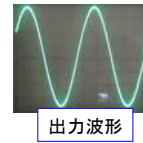
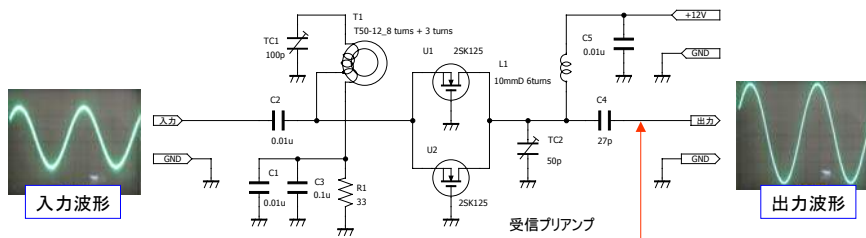
Sパラメータ

2017年4月27日

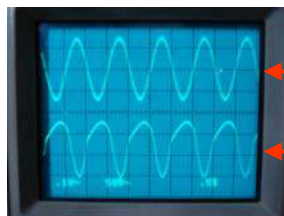
29

高周波回路の信号ラインに、高周波プローブを、直接、触れられない

TDU



波形観測点



高周波プローブを観測点に触れないときの波形

高周波プローブを観測点に触れたときの波形

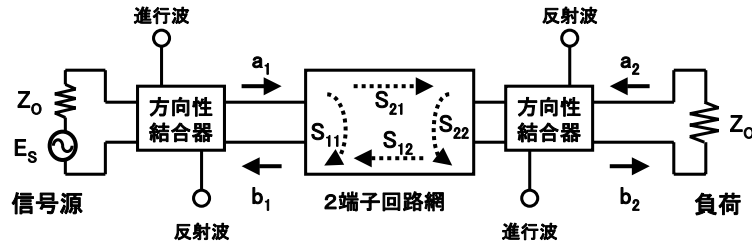


高周波プローブ

2017年4月27日

30

Sパラメータ（散乱パラメータ）



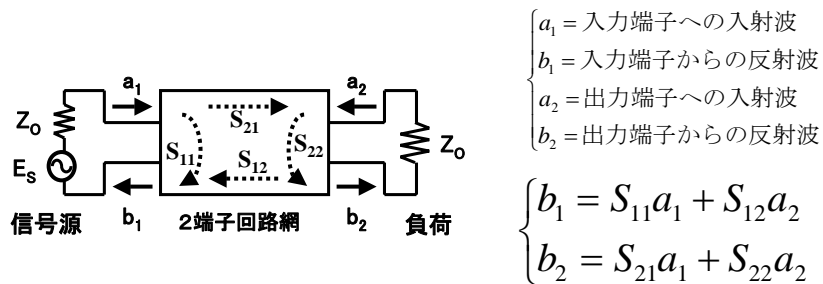
方向性結合器

2017年4月27日

31

Sパラメータ（散乱パラメータ）

★回路の伝搬特性を表現するパラメータのひとつ。



根日屋 英之、植竹 古都美:「ユビキタス無線工学と微細RFID」(第2版)(東京電気大学出版局)より転載

2017年4月27日

32

Sパラメータ（散乱パラメータ）

TDU

Sパラメータをトランジスタのデータシートより調べる.

$V_{CE} = 10 \text{ V}$, $I_c = 20 \text{ mA}$, $Z_0 = 50 \Omega$

f (MHz)	$ S_{11} $	$\angle S_{11}$	$ S_{21} $	$\angle S_{21}$	$ S_{12} $	$\angle S_{12}$	$ S_{22} $	$\angle S_{22}$
200	0.339	-107.0	16.516	108.7	0.035	66.1	0.459	-36.6
400	0.258	-147.3	8.928	92.1	0.060	71.0	0.343	-32.9
600	0.243	-167.7	6.022	83.0	0.085	71.9	0.305	-29.9
800	0.242	177.0	4.633	76.2	0.109	72.2	0.284	-29.4
1000	0.260	164.5	3.744	69.9	0.136	70.4	0.266	-31.7
1200	0.269	157.6	3.193	65.7	0.160	69.9	0.246	-35.0
1400	0.294	148.7	2.750	58.8	0.187	66.7	0.233	-40.4
1600	0.314	143.1	2.479	55.5	0.212	65.2	0.208	-43.6
1800	0.343	136.5	2.185	50.1	0.238	62.4	0.190	-50.5
2000	0.367	131.4	2.016	47.8	0.254	61.6	0.173	-48.3

$$S_{11} = 0.26 \angle 164.5$$

$$S_{22} = 0.266 \angle -31.7$$

2017年4月27日

33

Sパラメータ（散乱パラメータ）

TDU

$|S_{11}| = 0.26$: トランジスタの入力側(ベース)にインピーダンス整合回路を設けずに、 50Ω 系の信号発生器から1GHzの信号を入力すると、 $(0.26)^2 \times 100 = 6.8\%$ の電力の反射がおこることを意味している。

$|S_{21}| = 3.744$: トランジスタに電源を供給し、インピーダンス整合回路を設けずに、 50Ω 系の信号発生器から1GHzの信号を入力すると、 $10 \log(3.744)^2 = 11.5 \text{ dB}$ の利得があることがわかる。

$|S_{12}| = 0.136$: トランジスタの出力側(コレクタ)にインピーダンス整合回路を設けずに、 50Ω 系の信号発生器から1GHzの信号を入力すると、 $10 \log(0.136)^2 = -17.3 \text{ dB}$ 減衰してトランジスタの入力側(ベース)に出力される。

$|S_{22}| = 0.266$: トランジスタの出力側(コレクタ)にインピーダンス整合回路を設けずに、 50Ω 系の信号発生器から1GHzの信号を入力すると、 $(0.266)^2 \times 100 = 7.1\%$ の電力の反射がおこることを意味している。

2017年4月27日

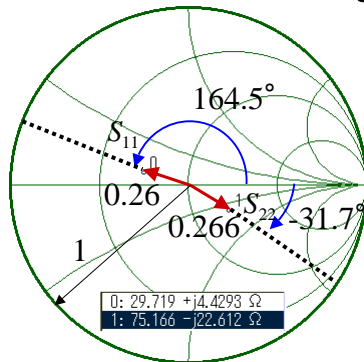
34

Sパラメータ（散乱パラメータ）

TDU

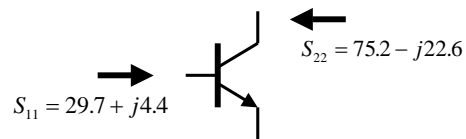
$$S_{11} = 0.26 \angle 164.5 \quad S_{22} = 0.266 \angle -31.7$$

をスミスチャートにプロットすると



$$S_{11} = 29.7 + j4.4$$

$$S_{22} = 75.2 - j22.6$$



2017年4月27日

35

Sパラメータ(反射係数∠位相角)をインピーダンス表示に変換する

TDU

Sパラメータを「S=反射係数∠位相角 ($S = \Gamma \angle \theta$)」で与えられたとき、その正規化インピーダンス $Z_n = R_n + jX_n$ において、 R_n と X_n は以下の式により計算できる。

$$R_n = \frac{1 - (\Gamma \cos \theta)^2 - (\Gamma \sin \theta)^2}{(1 - \Gamma \cos \theta)^2 + (\Gamma \sin \theta)^2}$$

$$X_n = \frac{2\Gamma \sin \theta}{(1 - \Gamma \cos \theta)^2 + (\Gamma \sin \theta)^2}$$

2017年4月27日

36

Sパラメータのインピーダンス表示から反射係数 Γ と位相角 θ を求める

TDU

正規化インピーダンス $Z_n = R_n + jX_n$ から, Sパラメータの反射係数 Γ と位相角 θ ($S = \Gamma \angle \theta$)は以下の式により計算できる. 式中の“1”は, 正規化インピーダンスを定める特性インピーダンスである.

$$|\Gamma| = \sqrt{\frac{(R_n - 1)^2 + X_n^2}{(R_n + 1)^2 + X_n^2}}$$

$$\begin{aligned}\theta &= \tan^{-1} \left\{ \frac{2 \cdot 1 \cdot X_n}{(R_n - 1)(R_n + 1) + X_n^2} \right\} \\ &= \tan^{-1} \left\{ \frac{2 \cdot X_n}{(R_n - 1)(R_n + 1) + X_n^2} \right\}\end{aligned}$$

2017年4月27日

37

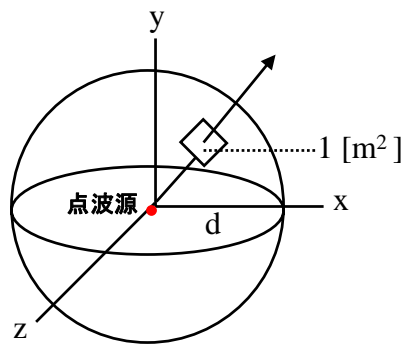
電界強度

2017年4月27日

38

電界強度

TDU



$$\begin{aligned} \text{円の面積} &= d^2 \cdot \pi \\ \text{球の表面積} &= 4d^2 \cdot \pi \end{aligned}$$

$$\text{電力密度 } P_{iso} = \frac{W}{4\pi d^2}$$

$$\text{電界強度 } E = \sqrt{120\pi \cdot P_{iso}}$$

2017年4月27日

39

電界強度

TDU

〈アイソトロピックアンテナの場合〉

$$\text{電界強度 } E = \sqrt{120\pi \cdot P} = \sqrt{120\pi \frac{W}{4d^2\pi}} = \frac{\sqrt{30W}}{d}$$

〈ダイポールアンテナの場合〉

利得が 2.14dBi=1.6368 であるので,

$$\begin{aligned} \text{電界強度 } E &= \sqrt{120\pi \cdot P} = \sqrt{120\pi \frac{1.6368 \times W}{4d^2\pi}} \\ &= \frac{\sqrt{1.6368 \times 30W}}{d} = \frac{\sqrt{49W}}{d} = 7 \frac{\sqrt{W}}{d} \end{aligned}$$

1.6368は

$$10^{\frac{Gain}{10}} = 10^{\frac{2.14}{10}} = 1.6368$$

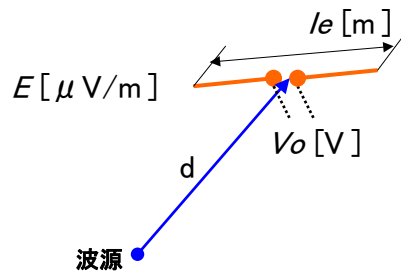
より計算できる。

2017年4月27日

40

電界強度

TDU



一般的な線状アンテナで、実効長 le のアンテナを、電界強度 E の強さの電界方向に平行に置くと、アンテナの受信開放電圧 V_o は、

$$V_o = E \cdot le \quad [V]$$

で求められる。受信アンテナの放射抵抗を R_R とすると、受信電力 P_R は、

$$P_R = \frac{(E \cdot le / 2)^2}{R_R} \\ = \frac{(E \cdot le)^2}{4R_R} \quad [W]$$

PD(Potential Difference)は電位差の略で、負荷インピーダンスで終端した状態の電圧である事を示す。

EMF(Electro Motive Force)は起電力の略で、負荷が無い状態での信号源電圧(開放電圧)を表す。EMFとPDには、電圧表記で $EMF = 2 \times PD$ の関係がある。

2017年4月27日

41