

「のいぜふ」仕様書

Copyright (c) 2006-2008 by Kappa v.v.v

1.目的

「のいぜふ」は、電子回路の電源系のインピーダンス特性を簡易的に計算するプログラムです。電源系の回路特性は、電源を供給する経路にあたる電源配線（またはプレーン）の特性と、電流を消費する電子デバイスの寄生特性によって決まります。「のいぜふ」では、これらのパラメータを簡単に指定することが出来ます。また、インピーダンス特性を周波数軸でグラフ表示することが出来ます。

2.背景

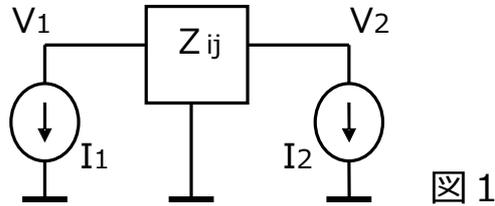
近年の電子デバイスの高速化に伴い、電子回路の電源系のインピーダンス特性に起因する様々な課題が身近に出現しています。電子デバイスで消費される交流電流は電源配線から電磁波を放出し、周辺の無線装置に影響を与えます。また、電子デバイスの消費電流によって電圧降下が発生し、信号の動作タイミングに影響を与えたり（=ジッタ）、電子デバイスを誤動作させたりします。

このような電子回路の電源系のインピーダンス特性を定量的に把握する手段として、S p i c eシミュレーションが用いられています。しかし、S p i c eシミュレーションを行う為には、電源配線や電子デバイスの特性を電子回路の基本素子を用いてモデリングする必要があります。モデリングには専門知識が必要であり、間違ったモデリングを行うと結果が大きく異なってしまいます。

手軽に電源系のインピーダンス特性を把握したい、というのが「のいぜふ」を開発したきっかけです。手軽さを追求する為、多くの特性を簡易化しています。正確な特性の把握はS p i c eシミュレーションに譲ります。

3. F 行列とインピーダンス

「のいぜふ」は F 行列を用いてインピーダンス計算を行っています。F 行列とは 2 x 2 の要素で構成される行列で、電子回路のインピーダンス特性を次のように表現します。



$$\begin{pmatrix} V_1 \\ I_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F_{11} & F_{12} \\ F_{21} & F_{22} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} V_2 \\ I_2 \end{pmatrix} \text{ 式 1}$$



図 2

$$= \begin{pmatrix} 1 & R \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \text{ 式 2}$$

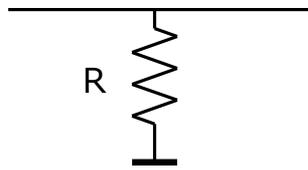


図 3

$$= \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 1/R & 1 \end{pmatrix} \text{ 式 3}$$

「のいぜふ」はこの F 行列を用いて、次のような等価回路をモデリングしています。V 2 は電子回路に供給する電源電圧を表していて、電源系のインピーダンス特性を計算する際は、便宜上ゼロ[V]と定義します。F 行列には電源配線や電子デバイスの寄生特性を任意に定義することが出来ます（ネットリスト仕様を参照）。I 1 は電子デバイスの消費電流を表しています。そして「のいぜふ」は、I 1 によって V 1 が発生する場合のインピーダンス特性（Z）を、 $Z = V_1 / I_1$ として計算します。

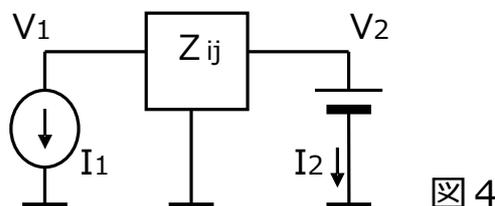


図 4

$$\begin{pmatrix} V_1 \\ I_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F_{11} & F_{12} \\ F_{21} & F_{22} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ I_2 \end{pmatrix} \quad \text{式 4}$$

$$V_1 = F_{12} \cdot I_2 = \frac{F_{12}}{F_{22}} \cdot I_1$$

4.コンデンサの特性

コンデンサは電子回路の電源系のインピーダンス特性を決める重要な部品です。通常、バイパスコンデンサ（通称、パスコン）として、電子デバイスの周辺に接続して使用します。コンデンサは静的な容量だけでなく、交流的に寄生インダクタンス（ESL）や寄生抵抗（ESR）を持つことが知られています。インピーダンス特性にはこの寄生素子の影響が強く現れ、特に他の電子デバイスとの共振特性により複雑な振る舞いをする場合があります。コンデンサの付け替えにより電子回路が予想外の振る舞いをするところがあるのは、この共振特性が影響していることがあります。

「のいぜふ」は、コンデンサの静的な容量を指定するだけで、寄生パラメータを自動的に計算して付加します。従って正確さには欠けますので、正確な値を使用して設計する際にはSpiceシミュレーションを使用してください。コンデンサの寄生パラメータは、村田製作所やTDKなど大手部品メーカーのホームページから入手可能です。

5.マイクロストリップライン

電源配線は、太めで一定幅の配線形状にてレイアウトすることがあります。そのような場合は、グランドプレーンに対するマイクロストリップラインとしてモデリングするのが適当です。マイクロストリップラインは、配線幅とグランドプレーンとの距離（高さ）のほか、絶縁体の誘電率によって特性が決まります。

「のいぜふ」は、誘電率を4.5に固定していますので、それ以外の値で設計する場合はLCRの等価回路で指定してください。なお、マイクロストリップラインの特性を求める近似式は様々なものが公開されていますので、各種ホームページや書籍など参照してください。

6. フェライトビーズ

フェライトビーズは、電源電流によって発生する電磁放射を抑制するために使用されます。フェライトビーズは、内部に大きなインダクタンスと容量を持っているため、電源系のインピーダンスを大きく変化させます。場合によっては共振特性に注意が必要ながあります。

「のいぜふ」では、遮蔽特性のピークのインピーダンスと周波数を指定するだけで、簡易的にLCRの等価回路を生成して付加します。従って実際のデバイスの特性とは異なります。なお、正確な等価回路はTDKなど大手部品メーカーのホームページから入手可能です。

7. ネットリスト仕様

「のいぜふ」はネットリストから電子回路の電源系の構造を読み込みます。ネットリストは上側が電子回路の電源側、下側が電子デバイスの電流源側になります。電源と電流源は、それぞれ1個ずつモデリング可能です。より複雑な電源系の設計には、Spiceシミュレーションを用いてください。

* ネットリストの構造

電子デバイス 1

電子デバイス 2

:

電子デバイス n

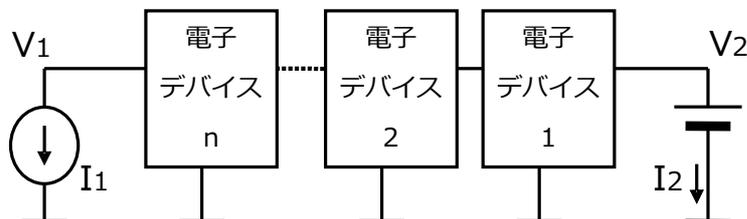


図 5

以下、「のいぜふ」で使用できる電子デバイスを説明します。各特性値には単位が使用できます。数字に続けて空白を入れずに次の単位を記述してください。

※ 使用可能な単位： f p n u m k meg g t

(1) コイル（インダクタンス） 《直列》

フォーマット： L <インダクタンス値[H]>

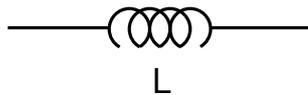


図6

(2) 抵抗（レジスタ）

《直列》

フォーマット： R <抵抗値[Ω]>



図7

《並列》

フォーマット： R P <抵抗値[Ω]>

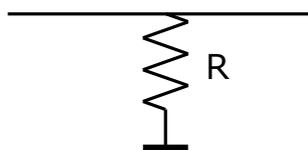


図8

(3) 容量（コンデンサ） 《並列》

フォーマット： C <容量値[F]>

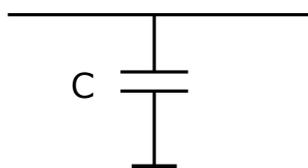


図9

(4) バイパスコンデンサ (パスコン) 《並列》

フォーマット: P C <容量値[F]> [個数 [ESL [ESR]]]

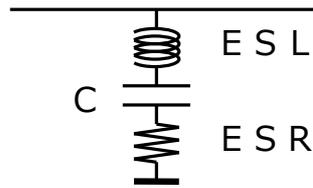


図 1 0

$$ESL = (0.003 \cdot \log(C) + 0.5) \cdot 10^{-9}$$

$$ESR = e^{0.018 \cdot \log^2(C) + 0.12 \cdot \log(C) - 6.4}$$

式 5、式 6

参考) Murata Chip S-Parameter & Impedance Library(1005/1608/3216/3224)

(5) フェライトビーズ 《直列》

フォーマット: F B <インピーダンス値[Ω]> <周波数[Hz]>

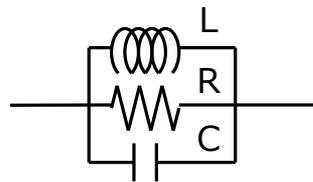


図 1 1

$$R = Z$$

$$L = \frac{2Z}{2\pi f}$$

$$C = \frac{1}{2\pi f \cdot 2Z}$$

式 7、式 8、式 9

(6) マイクロストリップライン 《直列》

フォーマット: U S <導体幅[m]> <絶縁体高[m]> <線長[m]>

[εr]

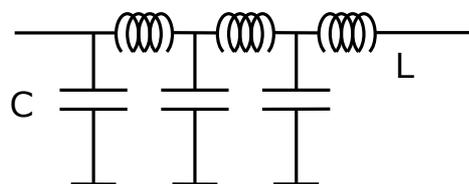


図 1 2

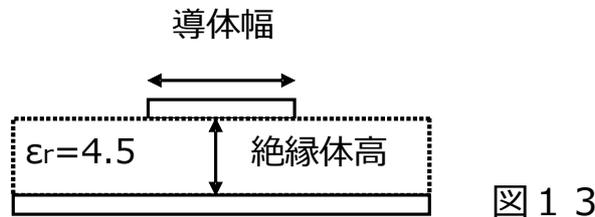


図 1 3

$$\epsilon_{re} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \cdot \left\{ \left(1 + \frac{12 \cdot h}{W} \right)^{-\frac{1}{2}} + 0.04 \cdot \left(1 - \frac{W}{h} \right)^2 \right\} : \frac{W}{h} \leq 1$$

$$\epsilon_{re} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \cdot \left\{ \left(1 + \frac{12 \cdot h}{W} \right)^{\frac{1}{2}} \right\} : \frac{W}{h} \geq 1$$

$$Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_{re}}} \cdot \log \left(\frac{8 \cdot h}{W} + 0.25 \cdot \frac{W}{h} \right) : \frac{W}{h} \leq 1$$

$$Z_0 = \frac{120 \cdot \pi}{\sqrt{\epsilon_{re}}} \cdot \left\{ \frac{W}{h} + 1.393 + 0.667 \cdot \log \left(\frac{W}{h} + 1.444 \right) \right\}^{-1} : \frac{W}{h} \geq 1$$

$$T_d = \frac{\sqrt{\epsilon_r}}{C}$$

$$L_{UNIT} = Z_0 \cdot T_d$$

$$C_{UNIT} = \frac{T_d}{Z_0}$$

式 1 0、式 1 1、式 1 2、式 1 3、式 1 4、式 1 5、式 1 6

出典) MWAVE-LABORATORY(<http://www.mwave-lab.jp/mline.htm>)

(7) マルチ周波数消費電流源

「のいぜふ」でノイズ電圧を計算する場合に指定する、電子デバイスの電流源です。クロック周波数と平均電流を指定すると、一般的な論理回路を想定した電流スペクトル計算します。計算した電流スペクトルは、ネットリストに記載された電源系のインピーダンス特性を用いてノイズ電圧に変換し、ヒストグラム表示します。

フォーマット： CLK <周波数[Hz]> <平均電流[A]>

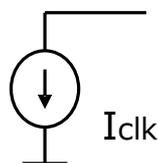


図 1 4

※ 使用している電流スペクトル（周波数は正規化しています）

周波数[UNIT]	0.1	0.11	0.12	0.14	0.17	0.20	0.25	0.33	0.5
消費電流[A]	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.2

周波数[UNIT]	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0
消費電流[A]	0.48	0.28	0.22	0.18	0.15	0.12	0.10	0.09	0.08	0.07

表 1

(8) サイン波形消費電流源

単一周波数の消費電流源です。上述のマルチ周波数消費電流源と併用も可能です。

8.インピーダンスの定義

「のいぜふ」でグラフ表示されるインピーダンスは、閉回路の2端子間に電流を印加した際に2端子間に発生する電圧が印加電流の何倍になるかを示しています。また、トランスファーインピーダンスとは、同様に閉回路の2端子間に電流を印加した際に閉回路の任意の2点間に発生する電圧が印加電流の何倍になるかを示しています。たとえば図15では、インピーダンスは V_0/I_0 、トランスファーインピーダンスは $V_1/I_0 \cdot V_2/I_0 \cdots V_n/I_0$ です。

「のいぜふ」には、電源に最も近い位置にあるバイパスコンデンサのトランスファーインピーダンスを自動的に表示する機能があります。

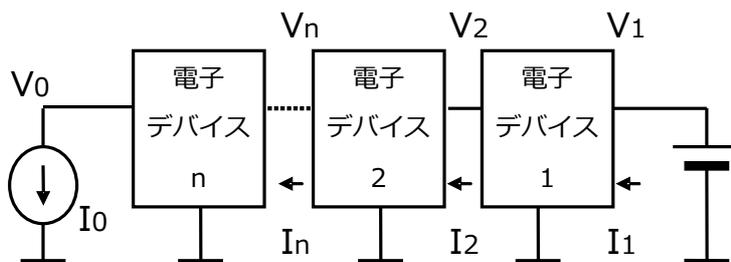


図 1 5

9.カレントゲインの定義

「のいぜふ」でグラフ表示されるカレントゲインは、閉回路の2端子間に電流を印加した際に、閉回路の任意の点を電源に向かって流れる電流が印加電流の何倍になるかを示しています。たとえば図15では、カレントゲインは $I_1/I_0 \cdot I_2/I_0 \cdots I_n/I_0$ です。

「のいぜふ」には、電源に最も近い位置にあるバイパスコンデンサのカレントゲインを自動的に表示する機能があります。

10.ノイズ波形の算出

ノイズ電圧は、インピーダンスと印加電流の積により算出しています。またノイズ波形は、ノイズ電圧を正弦波形に変換し、それを周波数毎に重ね合わせて算出しています。

また、電源に最も近い位置にあるバイパスコンデンサのノイズ波形と電流波形も算出しています。これらの波形は、それぞれトランスファーインピーダンスとカレントゲインに印加電流を積算して求めています。

11.連絡先

本プログラムに関してご質問などありましたら、お気軽にご連絡ください。なお、諸般の事情により返信できない場合がありますことを、あらかじめご容赦ください。

秋本 哲也 (kappa.v.v.v@nifty.com)

以上