

## 高調波制御フィルタ設計支援ソフトの改良

柄澤孝一\*

## Improvement of simulator for a harmonic-controlled filter

Koichi KARASAWA

We have developed simulator, "Microstrip Line Calculator, MSLC" with Visual Basic for a harmonic-controlled filter. It is needed in order to realize the operation of Class F power amplifier. It is, however, difficult to design the optimum filter with the simulator, because only the reflection coefficients corresponding to input data are calculated. In this paper, the simulator is improved to design the optimum filter. Also, it is found that the differences between the calculated and ideal values of reflection coefficients in the fundamental frequency are minimized for each input data.

キーワード: F 級電力増幅器, 高調波制御フィルタ, 最適設計法

## 1. まえがき

F 級電力増幅器は FET のドレイン効率が理論的に 100% の高効率電力増幅器として注目されている<sup>1)</sup>。この増幅器を実現するためには, FET のドレイン端子に生じる高調波を制御するフィルタが必要になる<sup>2)</sup>。しかしながら, このフィルタの設計は難しく, 実用化されていない現状である。

高調波制御フィルタの設計を支援する目的で, Visual Basic を用いて「高調波制御フィルタ設計支援ソフト (MSLC)」を試作してきた<sup>3)4)</sup>。この支援ソフトは, フィルタの寸法を入力することにより, 基本波周波数, 2 次及び 3 次高調波成分のフィルタの入力インピーダンスを算出できるものである。

本論文では, 高調波制御フィルタの最適な設計及び小型化を目的として従来の支援ソフトの改良を行った。その改良点と計算結果について述べる。

## 2. 高調波制御フィルタの設計

## 2-1 高調波制御フィルタの構成

F 級電力増幅器は, B 級電力増幅器と高調波制御フィルタで構成されている<sup>5)</sup>。表 1 は理想的な高調波制御フィルタの条件である。 $f_1$ ,  $f_{2n}$  及び  $f_{2n-1}$  は B 級電力増幅器に入力される信号 (基本) 周波数, B 級電力増幅器で生じる偶数次及び奇数次高調波の周波数である。 $n$  は自然数 ( $n = 1, 2, 3, \dots$ ) である。S21

表 1 理想的な高調波制御フィルタの条件

	S21 [dB]	S11 [ $\Omega$ ]
$f_1$	通過	増幅器の出力インピーダンスに整合
$f_{2n}$	遮断	短絡
$f_{2n-1}$	遮断	開放

及び S11 はいずれも S パラメータであり, S21 は通過 (減衰) 量, S11 は入力インピーダンス [ $\Omega$ ] である。本論文では, 基本波周波数  $f_1$  を 150MHz としている。 $f_1$  における B 級電力増幅器の出力インピーダンスは,  $5.4 + j22.4\Omega$  であるため, フィルタの S11 はその出力インピーダンスに整合させるために, 共役複素数をとらなくてはならない。F 級動作させるためには, 高次の高調波も考えなければならないが, 回路構成が複雑になるため, 本論文では, 3 次高調波までを考慮することにする。

図 1 はインピーダンス調整用スタブを用いた高調波制御フィルタである。line1, line2, line3, stub1, stub2 及び stub3 で構成されている。stub1 及び stub2 はそれぞれ, 2 次高調波及び 3 次高調波成分に対して  $\lambda_g/4$  となるように設定されている。ここで,  $\lambda_g$  はマイクロストリップライン上の波長であり, 基板の実効比誘電率を  $\epsilon_{eff}$ , 真空中の波長を  $\lambda_0$  とすると, 次式で与えられる。

$$\lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (1)$$

\* 電気工学科助教授  
原稿受付 2001 年 9 月 28 日

stub3 及び line3 は原理上は必要ないが、表 1 の入力インピーダンスの条件を満足させるために調整用として用いている。また、stub3 の長さは stub1 の長さよりも長すぎると、 $f_1$  の S21 に影響してしまうため、設計時に、stub1 よりも短くなるように設定しておく。

## 2-2 従来の設計支援ソフト

従来のフィルタ設計支援ソフトは、line1, line2, line3, stub1, stub2 及び stub3 の長さをパラメータとして入力し、フィルタの入力側からみた反射係数の計算値を出力するものである。また、実効比誘電率、基本波周波数の指定が可能であり、また出力結果をスミスチャート上へのプロットも可能である。基本波、2次及び3次高調波に対する実効比誘電率をそれぞれ、3.2, 3.33 及び 3.33 としている。line1, line2, line3 及び stub3 の値をそれぞれ変化させ理想的なインピーダンス特性に近づける方法を用いる。従来のソフトでは、stub 及び line の値を一回一回変化させ最適な条件を探していた。

しかしながら、stub 及び line の組み合わせは数多くあり、これらを一つ一つ計算していったのでは最適の設計が難しいだけでなく、かなりの時間を必要とできていた。

## 2-3 改良した設計支援ソフト

本論文では、stub3, line1, line2 及び line3 の値を自動的に変化させて反射係数を計算し、その結果を理想的な反射係数と比較して理想値に近づけるようソフトの改良を行った。

図 2 は本研究で改良された設計支援ソフトのフローチャートである。stub1, stub2, stub3, line1, line2, line3, 計算回数及び変化の幅のデータを入力すると、次式で与えられる基本波、2次及び3次高調波成分の

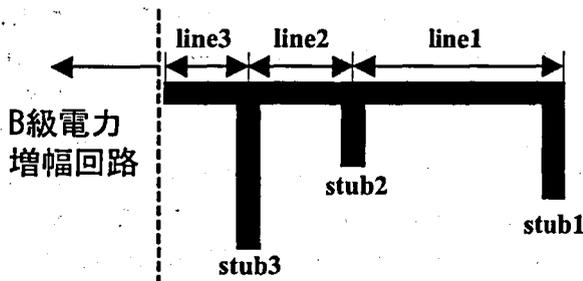


図 1 インピーダンス調整用スタブを用いた高調波制御フィルタの構成

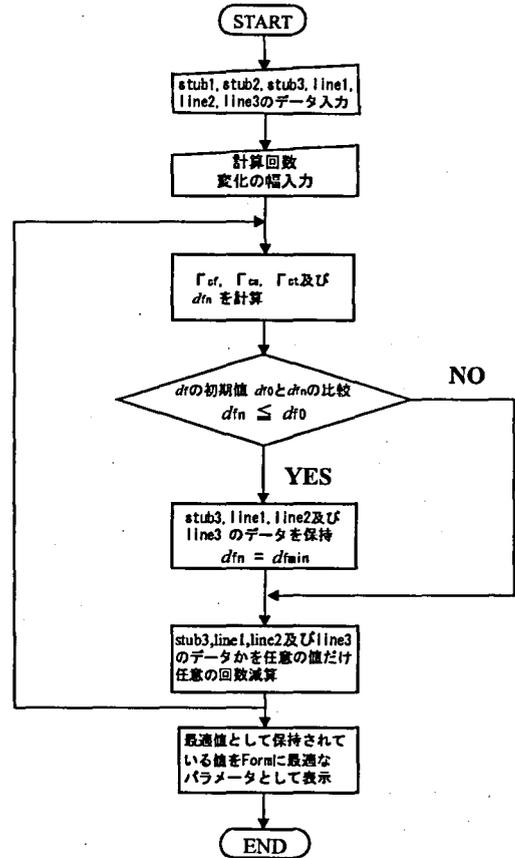


図 2 改良された設計支援ソフトのフローチャート

反射係数 ( $\Gamma_{cf}$ ,  $\Gamma_{cs}$  及び  $\Gamma_{ct}$ ) が計算される。

$$\Gamma_{cf} = \Gamma_{cfr} + j\Gamma_{cfi} \quad (2)$$

$$\Gamma_{cs} = \Gamma_{csr} + j\Gamma_{csi} \quad (3)$$

$$\Gamma_{ct} = \Gamma_{ctr} + j\Gamma_{cti} \quad (4)$$

ここで、添字の一番右の r 及び i はそれぞれ反射係数の実数部及び虚数部を示す。理想的な基本波、2次及び3次高調波成分の反射係数それぞれ  $\Gamma_{If}$ ,  $\Gamma_{Is}$  及び  $\Gamma_{It}$  とするとそれぞれ次式で与えられる。

$$\Gamma_{If} = \Gamma_{Ifr} + j\Gamma_{Ifi} = 0.5514 - j0.6273 \quad (5)$$

$$\Gamma_{Is} = \Gamma_{Isr} + j\Gamma_{Isi} = -1.0 + j0 \quad (6)$$

$$\Gamma_{It} = \Gamma_{It r} + j\Gamma_{It i} = 1.0 + j0 \quad (7)$$

無数の反射係数の計算値から最適値を決定する必要がある。反射係数の理想値と計算値の距離を図 3 に示すように、基本波、2次及び3次高調波に対してそれぞれ  $d_f$ ,  $d_s$  及び  $d_t$  とし、次式で定義する。

$$d_f = \sqrt{(\Gamma_{Ifr} - \Gamma_{cfr})^2 + (\Gamma_{Ifi} - \Gamma_{cfi})^2} \quad (8)$$

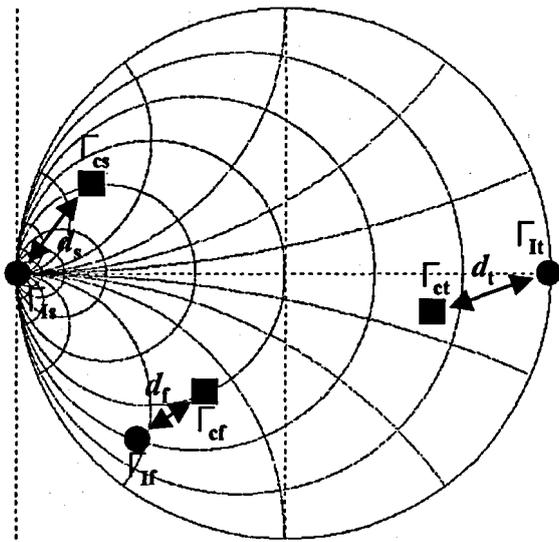


図 3 反射係数の理想値と計算値との関係

$$d_s = \sqrt{(\Gamma_{Isr} - \Gamma_{csr})^2 + (\Gamma_{Isi} - \Gamma_{csi})^2} \quad (9)$$

$$d_t = \sqrt{(\Gamma_{Itr} - \Gamma_{ctr})^2 + (\Gamma_{Iti} - \Gamma_{cti})^2} \quad (10)$$

図 3 に示すように、

$$d = d_f + d_s + d_t \quad (11)$$

となる  $d$  が最小となるようにプログラムを改良すればよいわけだが、ドレーン効率の算出に最も影響があるのは、基本波成分であるため、本論文では、 $d_f$  を最小にすることを考える。初期設定値  $d_{f0}$  と 1 回目で算出された距離  $d_{f1}$  を比較し、小さい方を  $d_{fmin}$  とする。同時に、反射係数  $\Gamma_{cf}$ 、 $\Gamma_{cs}$  及び  $\Gamma_{ct}$  を保持する。

次に、stub3、line1、line2 及び line3 のデータを設定した幅と回数だけ減算して、再び、反射係数及び  $d_f$  を算出し、 $d_{fmin}$  との比較を行う。

計算終了時の  $d_{fmin}$ 、stub3、line1、line2 及び line3 の値を Form に表示する。

### 3. 計算結果

従来の形式では、図 1 に示すように、stub は B 級電力増幅器の出力側から見て stub3、stub2 及び stub1 のように配置されている。stub の位置を変えても、フィルタの通過特性は変わらないが、インピーダンス特性は変化する。これまでは、stub の位置を固定していたが、表 2 に示すようなスタブ配置の組み合わせで解析を行った。

stub1 及び stub2 をそれぞれ 139.75mm ( $0.125\lambda_g$ ) 及び 92.8mm ( $0.083\lambda_g$ ) に設定する。インピー

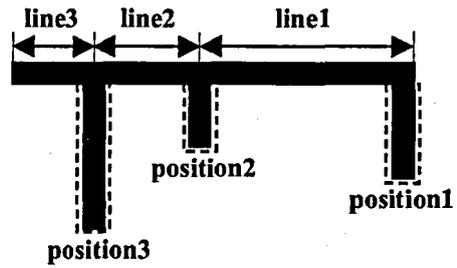


図 4 スタブの配置

表 2 スタブ配置の組み合わせ

配置	position1	position2	position3
配置 1	stub1	stub2	stub3
配置 2	stub2	stub3	stub1
配置 3	stub3	stub1	stub2
配置 4	stub2	stub1	stub3
配置 5	stub1	stub3	stub2

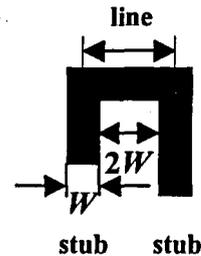


図 5 マイクロストリップライン幅  $W$  と stub 間隔の関係

ダンス調整用 stub3 を 139.75mm から 4.75mm まで、line1、line2 及び line3 の長さをそれぞれ 504mm から 4mm まで 1mm 単位で変化させる。ここで、line の長さの最小値を 4mm に設定しているのは、マイクロストリップラインの幅  $W$  を 1.2mm に設定しており、隣接するラインによる影響が少なくなるように、stub 間の長さがライン幅の 3 倍必要であるためである (図 5)。また、line の長さの最大値を 504mm としたのは、フィルタの小型化を考慮したためである。

表 3 は、表 2 の stub の配置による計算結果である。 $d_f$  が最小になるときの stub3、line1、line2 及び line3 の最適値を示している。表 4 は、各スタブ配置による  $d_f$  及び  $\Gamma_{cf}$  の計算結果である。表 4 から  $d_f$  の最小値は、配置 1 の場合である。以上の結果からでは、配置 1 の設計が最適であると考えられる。しかし

表 3 各スタブ配置による計算結果 1

配置	position1	position2	position3	line1	line2	line3
配置 1	139.75[mm]	92.8[mm]	139.75[mm]	18[mm]	495[mm]	5[mm]
配置 2	92.8[mm]	138.75[mm]	139.75[mm]	16[mm]	483[mm]	5[mm]
配置 3	139.75[mm]	139.75[mm]	92.8[mm]	55[mm]	346[mm]	90[mm]
配置 4	92.8[mm]	139.75[mm]	127.75[mm]	5[mm]	502[mm]	10[mm]
配置 5	139.75[mm]	138.75[mm]	92.8[mm]	6[mm]	373[mm]	93[mm]

表 4 各スタブ配置による計算結果 2

配置	$d_f$	$\Gamma_{cf}$
配置 1	$1.874 \times 10^{-2}$	$-0.5307 - j0.626$
配置 2	$7.044 \times 10^{-2}$	$-0.4898 - j0.6614$
配置 3	0.116	$-0.4497 - j0.5713$
配置 4	$2.876 \times 10^{-2}$	$-0.5217 - j0.6116$
配置 5	$4.919 \times 10^{-2}$	$-0.5216 - j0.5816$

表 5 各スタブ配置による計算結果 3

配置	$d_f$	$d_s$	$d_t$	$d$
配置 1	<b>0.0187</b>	0.1123	0.0155	0.1465
配置 2	0.0705	0.1123	<b>0.0021</b>	0.1849
配置 3	0.1162	0.0149	0.0028	0.1339
配置 4	0.0288	<b>0.0039</b>	0.0064	<b>0.0391</b>
配置 5	0.0492	0.6264	0.1061	0.7817

ながら、改良されたフィルタ設計支援ソフトでは、反射係数の理想値と計算値の各周波数の差のうち、基本波成分だけに注目していた。反射係数は 2 次及び 3 次高調波成分も算出される。そこで、 $d_s$ 、 $d_t$  及び  $d$  も算出することにする。

表 5 は、各スタブ配置による  $d_f$ 、 $d_s$ 、 $d_t$  及び  $d$  の計算結果である。表 5 から、 $d_f$  については、配置 1、 $d_s$  については、配置 4、 $d_t$  については、配置 2、 $d$  については配置 4 が最適と考えられる。

#### 4. むすび

高調波制御フィルタの最適設計を実現するために、高調波制御フィルタ設計支援ソフトの改良を行った。

line1, line2, line3 及び stub3 を 1mm のステップで変化させ、フィルタの反射係数の計算値を算出することが可能となった。また、算出された計算値の中から、最適値を決定する方法として、本論文では、基本波成分の反射係数の理想値と計算値の距離の最小値を求めることとした。さらに、3つの stub の配置が通過特性には影響せず、インピーダンス特性に影響することから、stub の配置を変えた場合についても計算を行った。その結果、配置 1 の場合  $d_f$  が最小値を取ることが明らかとなった。しかしながら、改良された設計支援ソフトは、任意の line 及び stub の基本波成分に対する最適値を計算することができたが、2 次高調波、3 次高調波を考慮すると、必ずしも最適であるとは言えないことが明らかになった。

今後は、基本波だけでなく、2 次及び 3 次高調波も考慮したソフトの開発を行う予定である。

#### 参考文献

- 1) 高山洋一郎：「マイクロ波トランジスタの基礎と応用 [V]」，電子情報通信学会誌 Vol.80, No.9, pp. 976-983, (1993).
- 2) 原広樹：「F 級増幅器用高調波制御フィルタに関する研究」，平成 10 年度 長野工業高等専門学校卒業研究論文 (1999).
- 3) 北澤文康，松尾稔：「マイクロストリップラインを用いた高調波制御フィルタの設計に関する研究」，平成 11 年度卒業論文，(2000).
- 4) 富樫元，沼田朋香：「インピーダンス調整用スタブを用いた F 級電力増幅器用高調波制御フィルタに関する研究」，平成 12 年度 長野工業高等専門学校卒業研究論文 (2001).
- 5) 柄澤孝一，松島久夫：「F 級電力増幅器用高調波制御フィルタの特性」，長野工業高等専門学校紀要，第 33 号，pp. 15-20, (1999).