

入力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*

柄澤孝一**・富樫元***・沼田朋香***
松島久夫****

A Harmonic-controlled Filter for Class F Power Amplifier with Adjustable Stub

Koichi KARASAWA**, Hajime TOGASHI***, Tomoka NUMATA*** and Hisao MATSUSHIMA****

A new harmonic-controlled filter for class F power amplifier is designed and examined. It has an additional stub and line in order to adjust an input impedance of the filter. A micro strip line circuit simulator with Visual Basic is developed to simulate the input impedance. In this paper, the measured impedance is compared with the simulated impedance. From the result, we clarify that the new filter has excellent reflection(impedance) and transmission characteristics.

キーワード： 調整用スタブ, F級電力増幅器, 高調波制御フィルタ, 反射特性, 通過特性

1. まえがき

F級電力増幅器はドレーン効率が理論的に100%である高効率高周波用増幅器として実用化が望まれている¹⁾。しかしながら、F級動作させるために必要となる高調波制御フィルタの設計及び試作が困難であるためF級電力増幅器が実用化していない。

本研究では、Visual Basicを用いて高調波制御フィルタの設計支援ソフトを開発し、必要とされる条件を満足するフィルタを製作することを目的としている。今回は、従来のフィルタにインピーダンス調整用スタブとラインを追加した構成のフィルタのシミュレーション結果と測定結果を比較した結果について述べる。

2. 高周波回路シミュレータを用いた高調波制御フィルタの設計

B級電力増幅器を用いてF級動作させるためには、図1に示すような高調波制御フィルタが必要になる。高調波制御フィルタの条件としては、反射(インピーダンス)特性と通過特性について表1の条件を満足する必要がある。表1の基本波成分とは、B級電力増幅器を動作させる基本周波数であり、B級動作させると、その高調波成分が生じる。そのうち偶数と奇数成分をそれぞれ偶数次高調波成分、奇数次高調波成分としている。高調波制御フィルタの反射特性(インピーダンス特性)が基本波については整合、偶数次高調波成分及び奇数次高調波成分についてはそれぞれ短絡及び開放であると、図1のドレーン

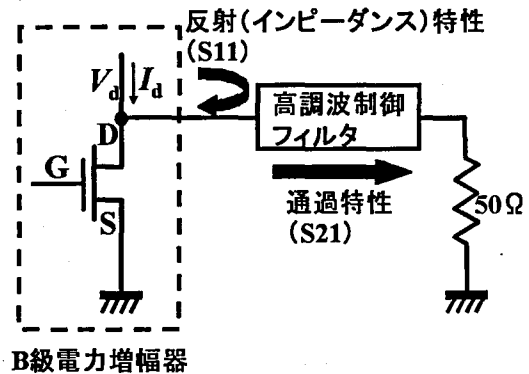


図1 F級電力増幅器の構成

表1 高調波制御フィルタの条件

周波数	反射特性 S11 (インピーダンス特性)	通過特性 S21
基本波成分	整合	通過
偶数次高調波成分	短絡	遮断
奇数次高調波成分	開放	遮断

電圧が方形波となり、ドレーンにおける損失が理想的には0となる。一方、出力端では基本波成分のみ必要であるため、通過特性は基本波成分のみ通過できればよいことになる。また、S11およびS21はSパラメータであり、ネットワークアナライザで測定することができる。

F級動作を追及するためには、高次の高調波成分まで考慮する必要がある。しかしながら、設計及び構成が複雑になるため、本論文では3次高調波成分まで考慮することにする。

図2は表1の通過特性のみを考慮したフィルタの構成

* 平成12年度電子情報通信学会信越支部大会で発表
** 電気工学科助教授
*** 電気工学科学生
**** 電気工学科教授
原稿受付 2000年10月31日

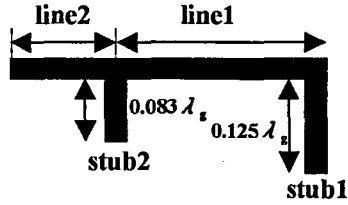


図2 通過特性のみを考慮したフィルタ

である。図中の λ_g はライン上の波長であり、次式で与えられる。

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

ここで、 λ_0 及び ϵ_{eff} はそれぞれ真空中の波長及び実効比誘電率である。実効比誘電率は、比誘電率と使用する基板の諸定数から算出される。

先端開放スタブのインピーダンス Z_o はスタブの長さを l とすると、次式で与えられる。

$$Z_o = -jZ_0 \cot \frac{2\pi}{\lambda_g} l \quad (2)$$

ここで、 Z_0 はラインの特性インピーダンスである。本論文では以後、 Z_0 を 50Ω とすることにする。図2において、stub1は

$$l = 0.125\lambda_g = \lambda_g/8 \quad (3)$$

である。2次高調波成分を想定すると、波長は $\lambda_g/2$ となるため、2次高調波成分に対するインピーダンス Z_{ss} は

$$Z_{ss} = -jZ_0 \cot \frac{2\pi}{\lambda_g} \frac{\lambda_g}{8} = 0 \quad (4)$$

となる。また、stub2は

$$l = 0.083\lambda_g = \lambda_g/12 \quad (5)$$

となる。3次高調波成分を想定すると、波長は $\lambda_g/3$ となるため、3次高調波成分に対するインピーダンス Z_{st} は

$$Z_{st} = -jZ_0 \cot \frac{2\pi}{\lambda_g} \frac{\lambda_g}{12} = 0 \quad (6)$$

となる。よって、stub1及びstub2はそれぞれ2次高調波及び3次高調波成分短絡用となる。

フィルタの設計には、Visual Basic で作成した高周波回路シミュレータ (MSLC) を用いている²⁾。図3は試作したシミュレータの初期画面である。フィルタのスタブ及びスタブ間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見た反射係数の計算値を出力するものである。線路の長さは基本波の波長 λ_g に対する倍率もしくはミリメートル単位で指定する。パラメータの数及び内容はメモリが許す範囲で任意に指定できる。出力形式

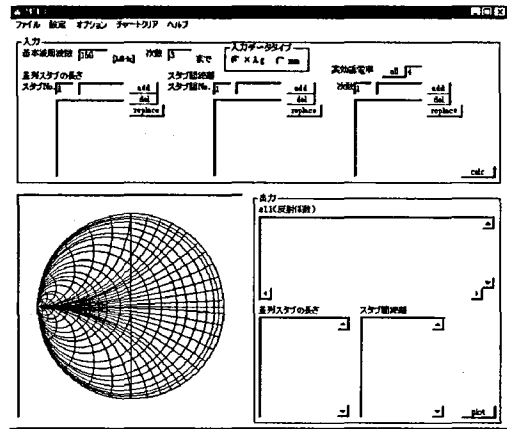


図3 高周波回路シミュレータの初期画面

表2 F級電力増幅器用高調波制御フィルタの設計仕様

$S11_f$	$5.4 - j22.4\Omega$
$S11_s$	0Ω
$S11_t$	$\infty\Omega$
ϵ_{eff_f}	3.2
ϵ_{eff_s}	3.2
ϵ_{eff_t}	3.33

は計算値の数値での表示に加え、スミスチャート上への点のプロットの2つが可能である。また、基本波の周波数、線路の実効比誘電率、計算する最大次数の指定が可能になっている。ただし、周波数別の実効比誘電率の指定はミリメートル単位での入力時のみ有効である。

このシミュレータで図2の line1及びline2の長さを変えて、表2の設計仕様を満足する組み合わせを見つける。

基本波に対するフィルタの入力インピーダンス $S11_f$ はB級電力増幅器の出力インピーダンスの共役複素数となるように設計されている。今回は、B級電力増幅器の出力インピーダンスを $5.4 + j22.4\Omega$ 、 $S11_f$ を $5.4 - j22.4\Omega$ としている。2次及び3次高調波成分に対する入力インピーダンス $S11_s$ 及び $S11_t$ はそれぞれ 0Ω 及び無限大近くなるように設計されている。添え字の f, s 及び t は基本波、2次及び3次高調波成分を意味する。各周波数に対する実効比誘電率の値は文献³⁾の測定結果を用いている。

試作したシミュレータを用いたが、表2の条件に合う組み合わせを見つけることが難しい。そのため、インピーダンス特性を満足させるために図2に調整用スタブ stub3及び調整用ライン line3の長さの設けることにする。以降、line1, line2, line3及びstub3を変えてインピーダンス特性を満足する組み合わせを調べる。その結果、図4の実行結果が得られている。

3. 高調波制御フィルタの試作及び測定

基本波、2次及び3次高調波の周波数をそれぞれ 150,

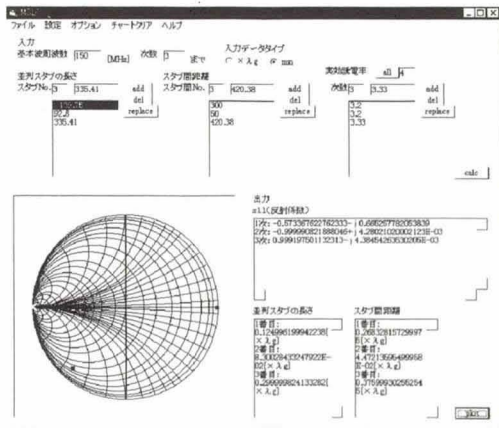


図4 高周波回路シミュレータの実行画面

表3 フィルタのスタブ及びラインの長さ

	基板上的長さ [λ_g]	基板上的長さ [mm]
stub1	0.125	139.8
stub2	0.083	92.8
stub3	0.3	335.4
line1	0.268	300
line2	0.045	50
line3	0.376	420.4

300 及び 450MHz とする. 図4より, stub1, stub2, stub3, line1, line2 及び line3 の基板上的長さは表3 のようになる.

100mm×150mm, 厚さ1.6mm の両面ガラスエポキシ基板に特性インピーダンスが50 Ω (幅2.7mm) となる表3のスタブとラインをレイアウトすることは非常に難しい, そのため, 今回は0.8mm厚両面ガラスエポキシ基板(特注)を使用する. その結果, ライン幅を1.2mmにすることが可能となり, フィルタの小型化ができる⁴⁾. フィルタの製作過程は以下の手順で行っている.

- (1) Microsoft PowerPoint で100mm×150mm の長方形内に幅1.2mmのスタブとラインを作成し, OHPシートに印刷する.
- (2) ライトボックスで基板を感光させ, その後, 現像する. 現像後, パターンの修正を行う.
- (3) エッチングマシンでエッチングを行い, アルコールで塗料をふき取る.
- (4) フィルタの入力と出力端にSMAコネクタを接続する.

図5は今回設計・製作したフィルタの構成である⁵⁾. 図中のstub3が調整用スタブでありline3とあわせて微調整用として用いられる. 図6は試作した高調波制御フィルタである.

図7は試作したフィルタの入力インピーダンス (S11) の計算値とネットワークアナライザを用いて測定された実験値をアドミタンスチャートにプロットしたものである. 図中の●及び▲はそれぞれ計算値と実験値を示して

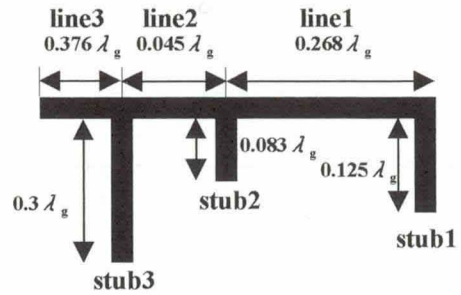


図5 補正用スタブを用いた高調波制御フィルタ

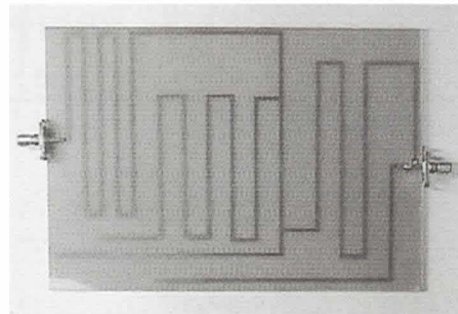


図6 試作した高調波制御フィルタ

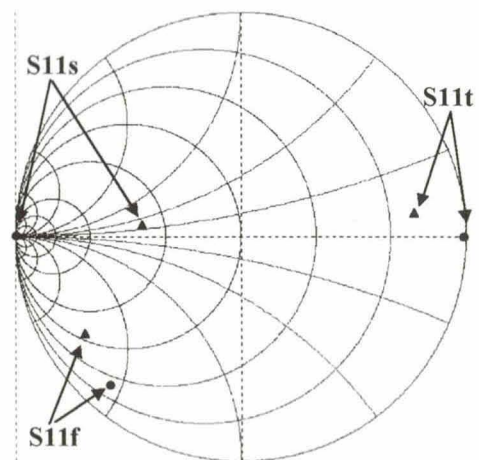


図7 高調波制御フィルタのインピーダンスの計算値と実験値の比較

表4 基本波, 2次及び3次高調波成分のS11の計算値と実験値の比較

	計算値 [Ω]	実験値 [Ω]
S11 _f	3.9 - j22.8	5.4 - j14.4
S11 _s	+ j0.1	19.6 + j2.2
S11 _t	3989 - j22068	322.5 + j159.7

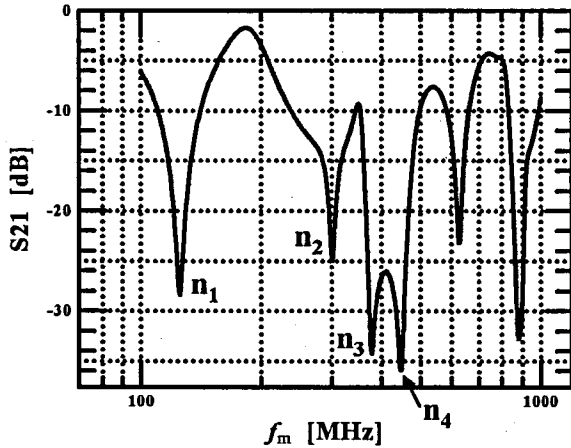


図8 フィルタの通過特性

表5 フィルタのノッチ周波数と減衰量 (S21)

ノッチ	ノッチ周波数 [MHz]	S21 [dB]
n ₁	125.3	-28.39
n ₂	301.4	-24.75
n ₃	377.9	-34.28
n ₄	448.2	-35.76

いる。表4はフィルタのS11_f, S11_s及びS11_tの計算値と実験値を示したものである。表4からS11_fの実験値は計算値にかなり近い値を示していることがいえる。しかしながらS11_s及びS11_tの実験値については計算値とかなり異なっている。この原因としては、スタブのインピーダンスを純虚数、ラインの特性インピーダンスを50 Ω として計算したために差が生じてしまったものと考えられる。

図8は、試作したフィルタの通過特性である。縦軸のS21は減衰量を示している。また、 f_m はネットワークアナライザの測定周波数である。表5は各ノッチ周波数と減衰量を示したものである。図5より、ノッチn₁及びn₃はstub3, n₂及びn₄はそれぞれstub1及びstub2

によるものと予想される。n₂及びn₄の周波数がそれぞれ300MHz及び450MHzに近いことから、周波数に対する実効比誘電率の設定が適切であることが言える。しかしながら、n₁の影響で基本波の周波数150MHzでのS21が-7.24となってしまう。

4. むすび

自作した高周波回路シミュレータでF級電力増幅器用高調波制御フィルタを設計・製作し、インピーダンス特性と通過特性を測定した。その結果、通過特性については、2次及び3次高調波の周波数付近でノッチが得られ、各成分に対する実効比誘電率の設定が適切であることを明らかにした。しかしながら、調整用スタブstub3の影響により、基本波成分に対する減衰が大きくなってしまった。インピーダンス特性については、S11_fについては計算値と実験値に良い一致が得られたが、S11_s及びS11_tについてはかなりの差が生じてしまった。今後は、stub3の長さの検討とマイクロストリップラインの損失を考慮したシミュレータの改良を行う予定である。

謝辞

高調波フィルタの設計に関してご協力を頂いた本校卒業生 北澤文康, 松尾稔君に感謝いたします。

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 [VI] —インピーダンス整合回路, 電力増幅器—,” 電子情報通信学会誌 Vol. 80, No. 10, pp. 1056-1064, 1997.
- 2) 北澤文康, 松尾稔: “マイクロストリップライン用いた高調波制御フィルタの設計に関する研究,” 長野工業高等専門学校電気工学科平成11年度卒業論文, 2000.
- 3) 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.
- 4) 吉田武: “高周波回路設計ノウハウ,” CQ出版, 1998.
- 5) 柄澤孝一, 富樫元, 沼田朋香, 松島久夫: “F級電力増幅器用高調波制御フィルタ,” 電子情報通信学会信越支部大会講演論文集, pp. 33-34, 2000.