

誘電体共振器を使用した High Q 低損失・周波数可変 BPF の設計法

1. 序文

High Q の誘電体共振器とそれに並列接続した同調トリコンデンサで構成される並列共振回路を 2 組接続して最大平坦型 2 次 BPF を形成する。自動計算シートの所定欄に、BPF の目標仕様と誘電体共振器のパラメータ [電気特性値] を入力して、BPF の回路条件を算出する。この回路を SNAP 回路データ上に作成し、回路シミュレーションすると、目標仕様の BPF の高選択性能 [周波数特性] が得られる。また BPF の回路に於いて、各共振回路のトリマ容量を同様に調整・変化すると、BPF の高選択性能 [形状] を殆ど変えずに、その中心周波数 f_0 を約 5% の範囲で変化 [平行移動] させることができる。

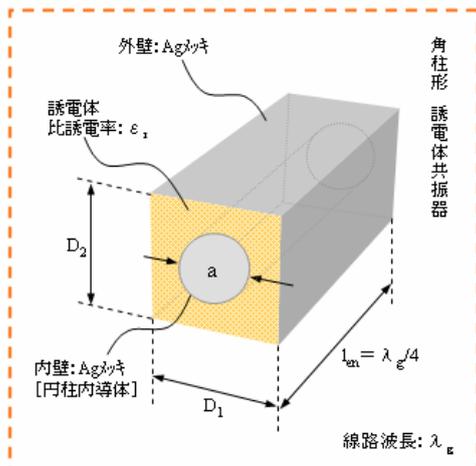
2. 設計手順および解析手順の概要

角柱形の誘電体共振器の特性インピーダンス Z_0 は次式で与えられる。

$$Z_0 \approx \frac{138}{\sqrt{\epsilon_r}} \log_{10} \left(0.6 \frac{(D_1 + D_2)}{a} \right) \dots \dots \dots (002)$$

但し、 ϵ_r : 誘電体共振器の比誘電率

Fig.1



(1) 誘電体共振器の自己共振周波数 f_s 近傍における、電気特性を等価並列共振回路で表し、誘電体共振器の電気特性パラメータを用いて、その回路定数を定量的に導出する。

(2) 誘電体共振器および並列接続された同調トリコンデンサ C_{tm} からなる並列共振回路を容量結合 C_2 にて 2 組接続し、さらに各々の共振回路を容量 C_1/C_3 で入出力に結合する BPF を形成する。この 2 次 BPF の通過帯域が平坦となる、最大平坦型 [Butterworth Filter] BPF を形成するようにフィルタパラメータ g_1, g_2, g_3 を設定し、BPF の目標仕様を得られるように各結合容量 $C_1/C_2/C_3$ と同調トリマ容量 C_{tm} を求める関係式を導出する。

(3) BPF の目標仕様 [中心周波数 f_0 と 3dB 通過帯域幅 B_w] と誘電体共振器のパラメータ [電気特性値] を入力し、上記関係式を適用して BPF の所要回路条件 [各結合容量 $C_1/C_2/C_3$ と同調トリマ容量 C_{tm}] を算出する自動計算シート [Excel] を作成する。

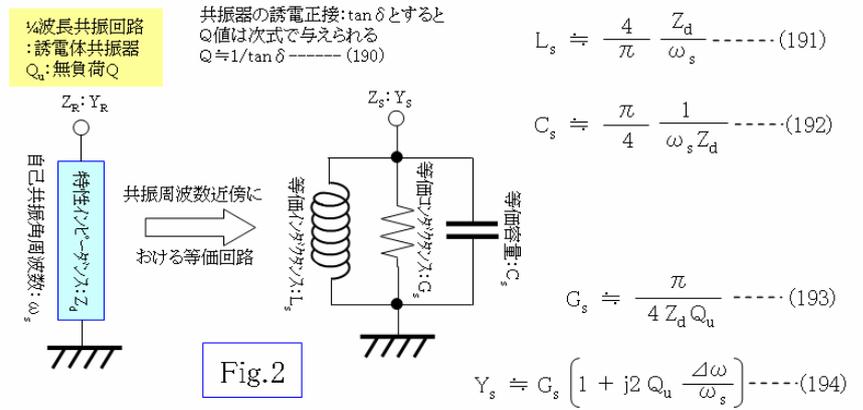
(4) 上記自動設計シートの結果を反映した 2 次 BPF を SNAP で設計し、S パラメータ解析のシミュレーションを行って、BPF の目標仕様とシミュレーション結果が一致することを検証する。

(5) 設計回路の同調トリマ容量 C_{tm} を変数 C_t に設定し、S パラメータのリポート計算機能を利用して容量 C_t を 0.3pF から 2.7pF に 5 ステップ で変化させることにより、BPF の形状が殆ど変わらずに、その中心周波数 f_0 が移動することを確認する。

3. BPFの基本回路

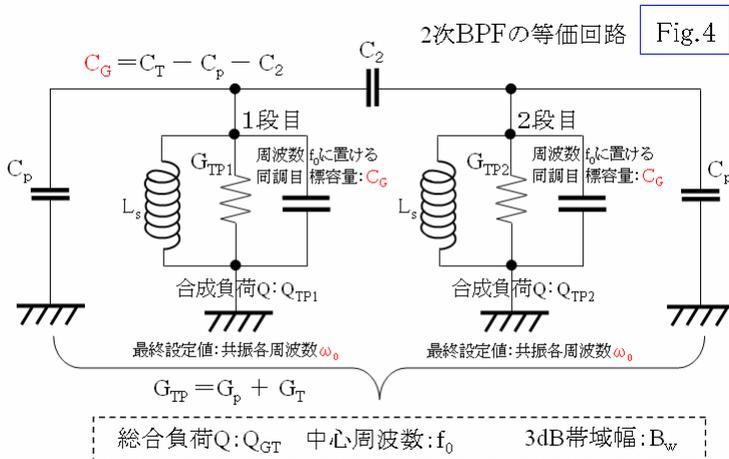
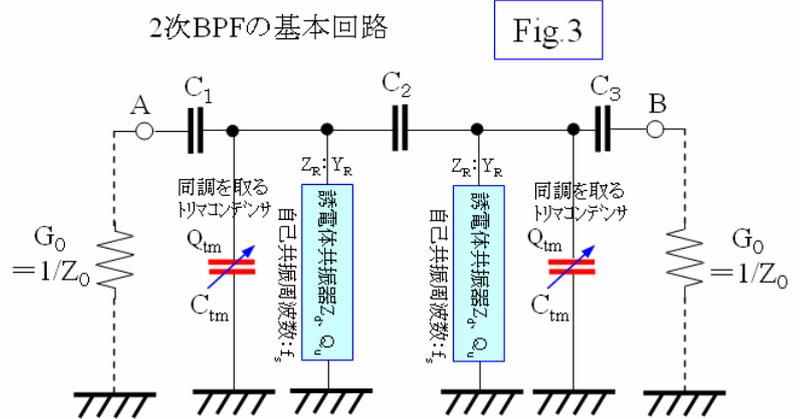
3.1 誘電体共振回路の等価回路定数の導出

- (1) 誘電体共振回路の等価回路を図2で表す。誘電体共振器の外形形状が図1の如く、誘電体の断面形状が正方形になる場合には、(002)式に於いて $D_1=D_2$ において、共振器の特性インピーダンス Z_d が定まる。
- (2) この特性インピーダンス Z_d と無負荷 $Q: Q_u$ を(192)~(194)



3.2 BPFの回路構成と等価回路

- (1) この誘電体共振器に BPF の中心周波数 f_0 に同調するための可変容量 C_{tm} のトリムコンデンサを並列接続して並列共振回路を形成する。この構成の2組の共振回路を容量 C_2 のコンデンサで結合すると共に、入出力インピーダンス Z_0 の夫々に容量 C_1, C_2 のコンデンサを介して各共振回路を結合する。
- (2) この回路構成で2次のBPFの基本回路(図3)が定まり、前記のトリムコンデンサの容量 C_{tm} を変化させることで各共振回路の共振周波数、即ちBPFの中心周波数 f_0 が選定される。



- 各結合容量 C_1, C_2, C_3 を適切に選ぶことによって、BPF の通過帯域幅 B_w [-3dB 帯域] と通過周波数特性 [形状: 今回は最大平坦特性を目差す] を目標値に合わせることが出来る。
- (3) BPF の基本回路を所定の設計手法に沿って解析すると最終的に、図4の等価回路を導くことが出来る。各結合容量 C_1, C_2, C_3 やトリムコンデンサ

2. 誘電体共振器の新規作成マクロ

SYMBOL で設定した各パラメータを用いて等価回路の各定数を計算式で算出できるように [定義] する。

- (3) 新規作成した部品の MACRO と SYMBOL を夫々のフォルダに保存することによって、この誘電体共振器を適用した BPF の設計と解析が可能になる。

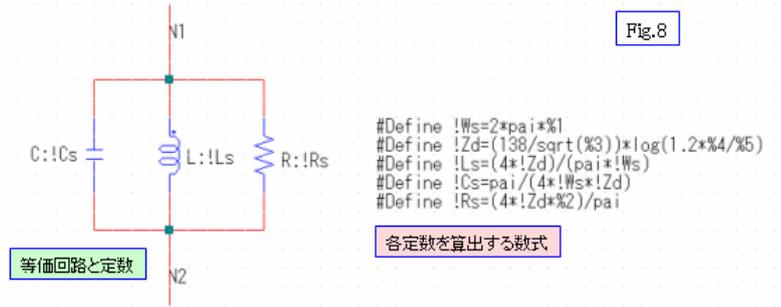


Fig.8

6. BPF の回路設計と特性の解析

- (1) 回路設計データにおいて、部品の選択機能を使用して集中定数素子群 [グループ] の最後尾に格納されている、誘電体共振器を選択し、5つのパラメータ [電気特性: 自己共振周波数 f_s 、無負荷 Q 値: Q_u 、誘電体共振器の比誘電率: ϵ_r 、共振器の方形断面形状の辺長: D 、共振器の内導体の直径 (断面形状の穴径): a] を設定することによって、適用する誘電体共振器の高周波特性を規定する。

最大平坦型2次BPFの設計回路

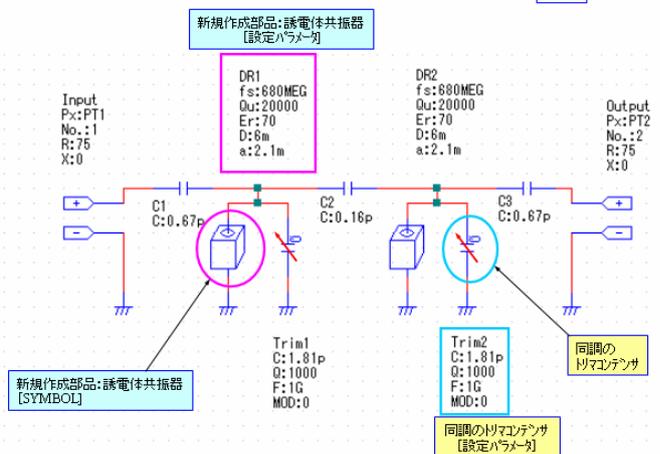
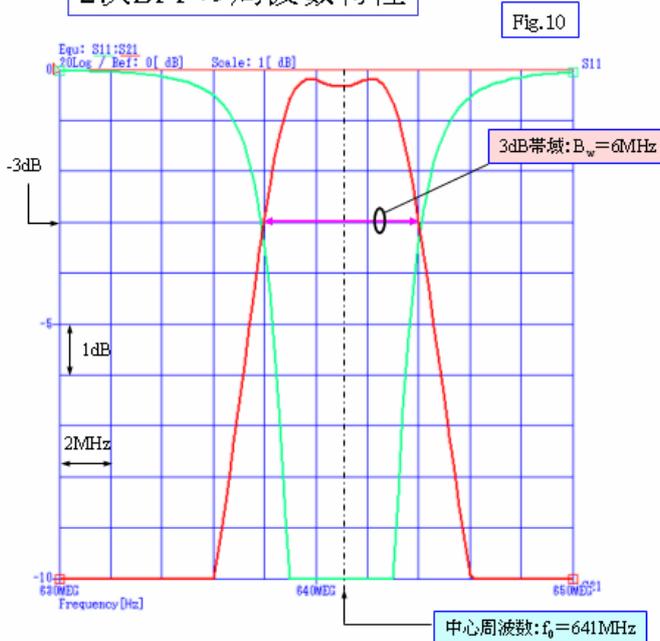


Fig.9

2次BPFの周波数特性



- (2) この誘電体共振器と自動設計シートで求めた結合容量 C_1 、 C_2 、 C_3 とトリマ容量 C_{tm} を適用して BPF の回路設計 (図 9) を行う。

- (3) この回路について、回路シミュレータ上で 630MHz - 650MHz の S パラメータ解析を行うと、目標仕様 [中心周波数 $f_0 = 641\text{MHz}$ 、3dB 帯域 $B_w = 6\text{MHz}$] に精度良く一致する BPF の高選択特性 (図 10) [通過損失約 0.3dB / 通過帯域偏差約 0.1dB] が得られる。

7. BPF のトリマ容量可変特性の分析

- (1) トリマコンデンサの可変特性を検証するた

最大平坦型2次BPFのトリマコンデンサ可変特性

めに、その容量を変数 C_t と置き、可変容量 C_t を、レポート変数 $REP=0, 1, 2, 3, 4$ [5 ステップ] を使用して、 $C_t = 0.3p + REP * 0.6p$ [F] と定義 (図 11) する。

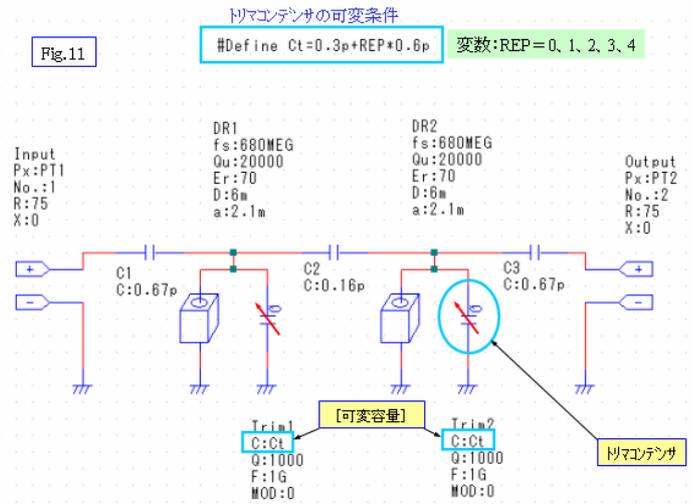
- (2) 回路シミュレータにおいて、レポート回数 $REP=5$ (回)、変数 C_t と設定して $620MHz-670MHz$ の範囲で S パラメータ解析すると BPF のトリマ可変特性が得られる。

このグラフを分析すると、トリマ容量 C_t

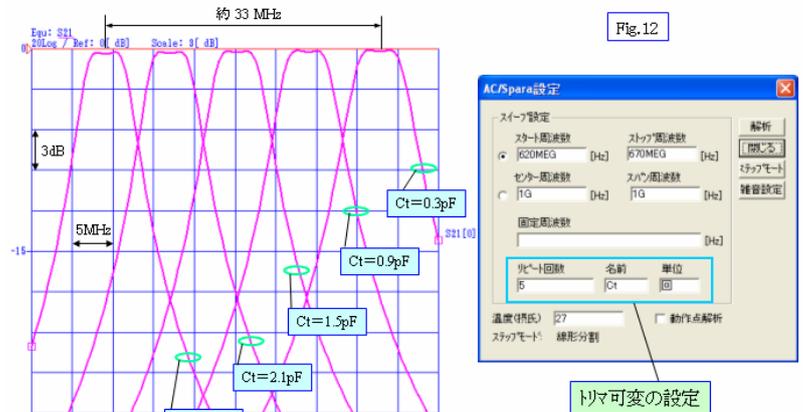
$= 0.3pF - 2.7pF$ の範囲において、BPF の中心周波数 f_0 は 5 段階に円滑に変化するが、BPF の形状 [通過帯域特性] は殆ど変動していないことが分かる。

- (4) 即ち、各結合容量 C_1, C_2, C_3 を一定値にしたままで、2つの共振回路の各トリマコンデンサの容量 C_{tm} を $0.3-3pF$ の範囲で同様に变化させることで、目標仕様の中心周波数 f_{0G} の 5% 程度の範囲において、BPF の高選択特性 [通過特性の形状] を略一定に保ったまま、BPF の中心周波数 f_0 を滑らかに移動 [平行シフト] (図 12) 出来ることが確認された。

- (5) 実際に基板上に、誘電体共振器とトリマコンデンサを実装して BPF 製作してみると、トリマコンデンサの容量を調整することにより、このシミュレーションに近い BPF の周波数可変特性が得られることが判っている。



2次BPFのトリマ可変周波数特性



8. 考 察

- ① 誘電体共振器の自己共振周波数 f_s 付近に於ける等価回路とその定数を導出し、その結果を通常の BPF 設計方法に反映することによって、誘電体共振器を使用した高選択特性の、最大平坦型2次 BPF の設計手法を達成することが出来た。
- ② SNAP [高周波シミュレータ] を適用して BPF の設計・チューニング・最適化を精確且つ迅速にできるようにするため、誘電体共振器の仕様 [電気パラメータ] を設定できる、新規部品 [Symbol/Macro] を新たに作成した。

③その結果、この新規部品を適用した2次 BPF の回路設計を行い、その特性をシミュレーション解析した結果、自動設計シートの目標特性と精確に一致させることが出来た。

④本設計手法は、共振器の自己共振周波数 f_s の 0%～-20%の周波数範囲で最良の BPF 周波数特性を達成できると考えている。

⑤結合容量 $C_1/C_2/C_3$ を一定にして、トリマコンデンサの容量 C_t を 0～3pF に亘って可変することで、BPF の形状を略同一にしたまま、中心周波数 f_0 を約 5%変化[平行移動]させることが可能であることを、SNAP 回路 Simulation で明らかにすることが出来た。

⑥SNAP の実践的・包括的な回路設計機能[所要の回路部品を自由に創作し、回路解析に反映する]を活用することによって、高性能な BPF[High Q および周波数可変]を、UHF から X Band に及ぶ広範囲なマイクロ波帯で、自在に設計し、そのフィルタ特性を精確に解析できる。

—以上—