

高機能受動フィルタを用いた分波回路およびその特性改善に関する研究

和田 光 司 電気通信大学電気通信学部助教授

1 はじめに

本研究課題では、タップ結合法を適用したバンドパスフィルタ (BPF) の基本特性と分波回路の整合回路に着目し、その方法を有効に利用したデュプレクサ・トリプレクサの設計について検討を行った。検討結果からタップ結合法の適用により BPF に整合回路機能を組み込んだ分波回路 (デュプレクサ・トリプレクサ) の提案及びその設計が可能であることを確認した。

2 まえがき

デュプレクサやトリプレクサをはじめとするフィルタを複数個用いた回路構成については従来より構造、特性、設計法、製作方法及び評価方法の観点から多数検討が行われている[1]-[7]。それらでは、小型化、低挿入損失、特性改善等仕様に応じた特性改善が求められている。これらの構成では、各種無線通信方式の仕様要求に応じて各通過帯域間の周波数間隔の確保、通過帯域近傍にける高減衰量の実現、スカート特性改善及び高アイソレーション特性実現等が求められている。

代表研究者は先に、タップ結合法[8]を適用したタップ結合型共振器(基本型[9]-[12]、集中定数素子装荷型[13]、分布定数素子装荷型[14])を用いたバンドパスフィルタ (BPF) に着目し部品数が比較的少ない回路構成でフィルタ特性において通過帯域近傍の特性改善、高調波共振応答改善が可能であることを報告してきた。さらに、その BPF を用いたデュプレクサ及びトリプレクサをはじめとする分波回路の基本設計及び試験実験についてを行ってきた[15]-[17]。

分波回路の設計において整合回路部の設計は重要であり、従来からいくつかの基本構成が考えられてきたが、部品数削減、伝送特性における帯域外特性改善及びその特性制御との関係を考慮に入れた設計に関する検討は筆者の知る限りほとんど見られない。そこで本研究課題では、帯域外特性改善に有効なタップ結合法を用いた BPF に着目しその基本特性を積極的に活かした分波回路 (デュプレクサ及びトリプレクサ) における整合回路設計について検討を行う。

3 分波回路における整合回路設計

3-1 デュプレクサ

図 1 に 2 種類の BPF を用いたデュプレクサの基本構成の一例を示す。図 1(a), (b) 及び(c)の構成は、実用上製品等で既に使用されているものである。図 1(a)に示した TypeA では、アンテナ部-フィルタ間接続に分岐線路として長さ(l_1, l_2)とし、特性インピーダンス(Z_1, Z_2)が一様の分布定数線路を用いている[1]。

図 1(b)に示した TypeB は、並列分岐素子を用いた回路構成であり、分岐素子(サセプタンス B_L)として集中定数素子を適用している[4]。図 1(c)に示した TypeC は、片方の BPF の前段に直列装荷素子(リアクタンス X_L)を接続した回路構成である。また、図 1(d)に本論文で新しく検討する TypeD として、図 1(a), (b) 及び(c)においてそれぞれの整合回路(分岐線路, 分岐素子)を取り外した回路構成を示す。

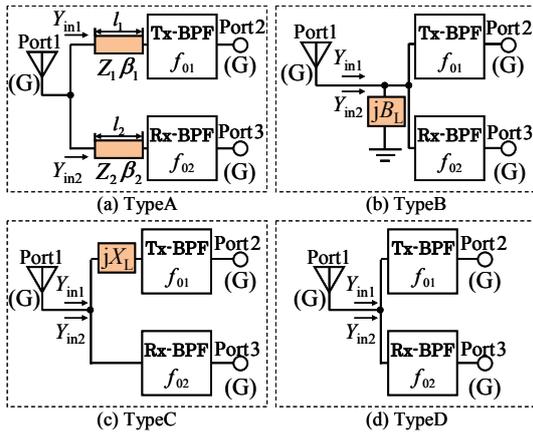


図1. デュプレクサにおける各種整合回路

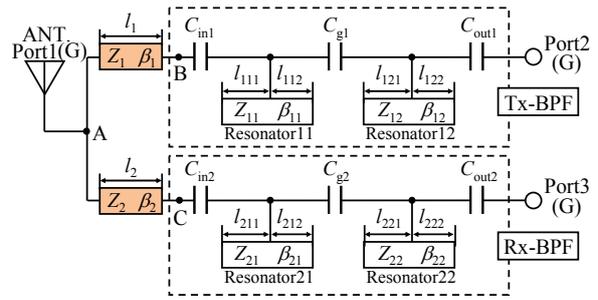


図2. 図1(a)を基本としたデュプレクサ (TypeA)

図1(a)に示した TypeA において、各 BPF にタップ結合型両端開放型 $\lambda/2$ 共振器と入出力及び段間コンデンサを縦続接続した 2 段構成によるデュプレクサを図2に示す。図2に示した回路構成では、BPF の構成要素として両端開放型 $\lambda/2$ 共振器を適用したが仕様によって各種共振器を選択することが可能である。

回路の設計手順としては各 BPF を狭帯近似法を用いたフィルタ設計理論に基づき設計している。ここで、各 BPF の中心角周波数 (ω_{01}, ω_{02}) は $\omega_{01}=2\pi f_{01}, \omega_{02}=2\pi f_{02}$ とする。また、 G は外部回路のコンダクタンスとする。図3に計算した伝送特性をそれぞれ示す。ただし、スタブ長は自由空間波長を基にした長さ(実効比誘電率 $\epsilon_{eff}=1$)として計算した。図3に示した結果より所望の 2 帯域通過特性及び指定した減衰極の実現が確認できる。また、得られた特性において、BPF の構成要素である共振器の働き以外の効果による減衰極が実現されているが、これは整合回路に分布定数線路を用いた効果によるものである。0.75GHz 及び 1.0GHz に BPF のみでは出現しない減衰極が確認できるが、これは整合回路に分布定数線路を用いているためである。さらに、図4に図2に示した構成の反射特性及びアイソレーション特性を示す。図4に示した結果より各中心周波数において設計で指定した減衰極の効果によって高アイソレーション特性が得られていることが確認できる。

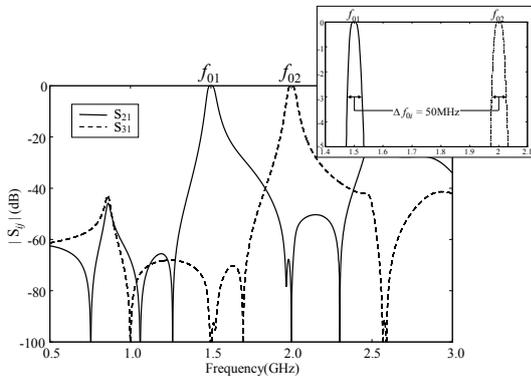


図3 図2に示したデュプレクサの伝送特性

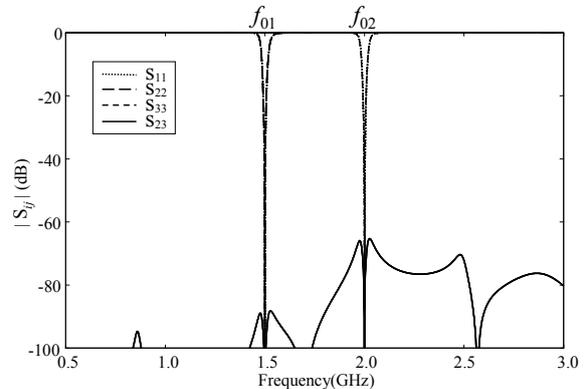


図4 図2に示したデュプレクサの反射特性及びアイソレーション特性

図2に示したデュプレクサの構成において、設計後各パラメータの値は不変で、各分岐線路を外し、各 BPF の入力結合素子(節点 B, C)を節点 A に接続した回路を考え、その伝送特性を図5に示す。

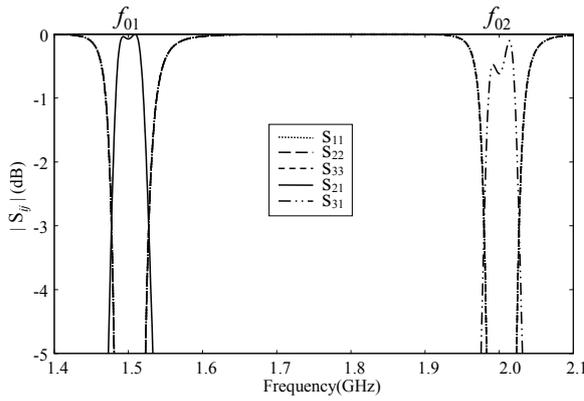


図5 図2に示したデュプレクサにおいて分岐線路を外した構成の伝送特性及び反射特性

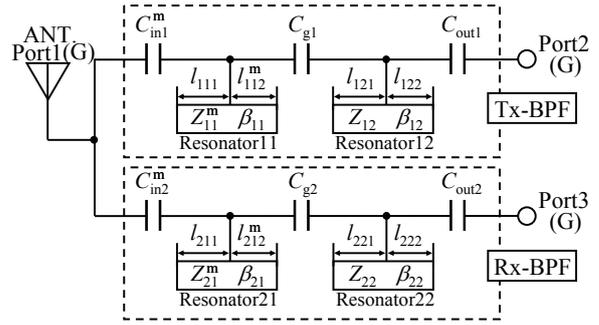


図6 図1(d)を基本としたデュプレクサ (TypeD)

結果として、回路は図1(d)に示した構成となるが、整合状態が得られている状態で分岐線路を取り外したため図5に示した結果のように各中心周波数において当然ながら整合状態が得られない。そこで、整合状態を得るため各BPFの入力結合コンデンサ、初段の共振器(Resonator11, Resonator21)の特性インピーダンス及びスタブ長に着目し、それらパラメータ変化により従来の整合回路機能をBPFに組み込むことを考える。すなわち、入力コンデンサの値及び Resonator11, Resonator21 のスタブ長と特性インピーダンスの各値の変化はフィルタ設計においては外部Qの調整に相当することから、デュプレクサ設計では整合回路機能をBPFに組み込むことが可能であると考えた。結果として図7に示した各等価回路より、整合条件を導出した。

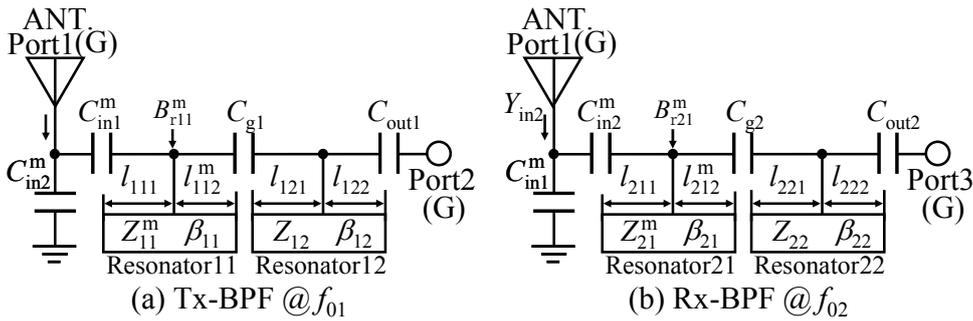


図7 デュプレクサ TypeD の各中心周波数における等価回路表現

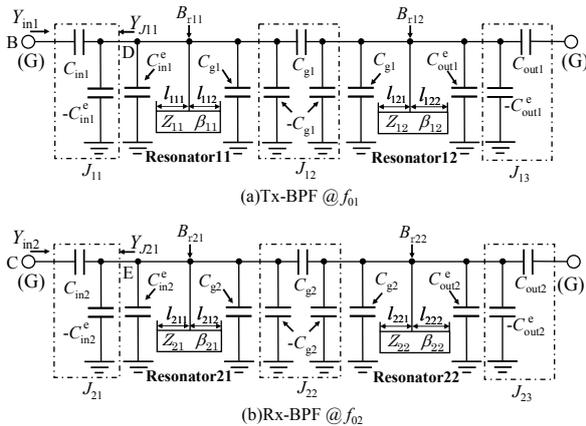


図8 デュプレクサ TypeA に用いたBPF単体のJインバータを適用した等価回路表現

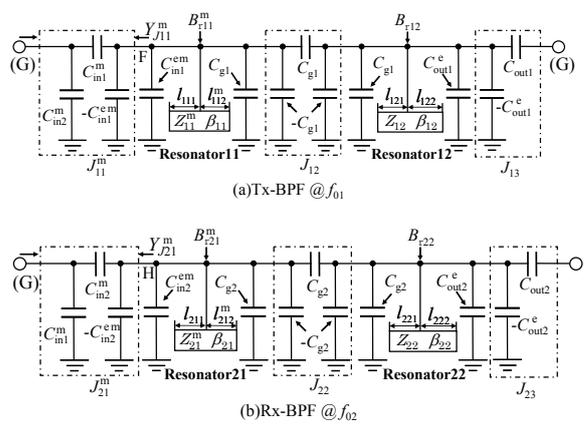


図9 デュプレクサ TypeD に用いたBPF単体のJインバータを適用した等価回路表現

図8に図2に示したデュプレクサ TypeA における各 BPF 単体の J インバータを用いた等価回路を示す。図9に示した回路構成は図7に示した各回路を J インバータを用いた等価回路表現に置き換えたものである。ここで、図8及び図9に示した回路が各中心周波数において等しいとき整合条件が得られることになる。すなわち、図8に示した各回路は、各中心周波数において他方の BPF の影響を受けることなく、その BPF は切り離された状態となる。そのとき、図8及び図9に示した各回路において初段の共振器より後段の構成及びパラメータ各値の変更はなく、パラメータとして変化するの初段の J インバータ及び初段の共振器であり、パラメータとしては図9に示した回路において $C_{in1}^m, C_{in2}^m, C_{in1}^{em}, C_{in2}^{em}, Z_{01}^m, Z_{02}^m, I_{112}^m$ 及び I_{212}^m を変更することになる。

$F_{01} = \Delta f_{01}/f_{01}, F_{02} = \Delta f_{02}/f_{02}$ とする。また、 C_{r1} 及び C_{r2} は狭帯近似法を適用したフィルタ設計法に用いる集中定数素子型 LC 並列共振器のコンデンサを、 ω_{c0} は原形 LPF の遮断各周波数を、 g_i は原形 LPF の基本素子値を表している。[1]。

図8に示した構成において点 D 及び E から左側を見た入力アドミタンス Y_{J11} 及び Y_{J21} を、同様に図9において点 F 及び H から左側を見た入力アドミタンスを Y_{J11}^m 及び Y_{J21}^m とする。

次に各共振器における共振条件及びサセプタンススロープパラメータの関係式についても再度検討を行う。ただし、検討が必要な共振器は Resonator11 及び Resonator21 である。すなわち、ここでは整合回路の機能を J インバータ (J_{11}^m, J_{21}^m) 及び共振器 Resonator11 及び Resonator21 に持たせることを考えている。

図10に図6に示したデュプレクサの伝送特性を示す。結果より所望の2帯域通過特性が実現できていることが確認できる。さらに、図11に図6に示した構成の反射特性及びアイソレーション特性を示す。図11に示した結果より各中心周波数において設計で指定した減衰極の効果によって高アイソレーション特性が得られていることが確認できる。また、図3に示した TypeA の結果と図10に示した結果を比較すると、図3の結果において BPF の構成要素である共振器の働き以外の効果により出現していた減衰極が消失していることが確認できる。

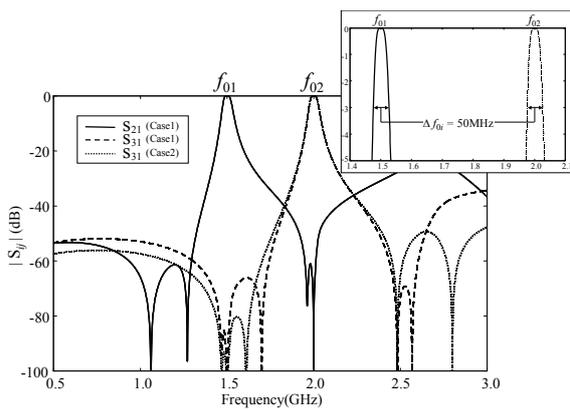


図10 図6に示したデュプレクサの伝送特性

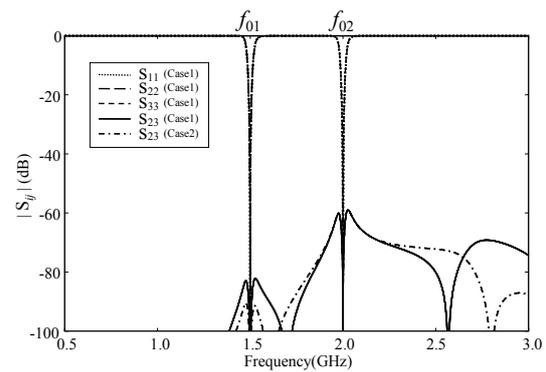


図11 図6に示したデュプレクサの反射特性及びアイソレーション特性

次に、各 BPF に 3 段 BPF を用いた場合について検討する。図12に BPF 構成に各種タップ結合型共振器により 3 段縦続接続としたデュプレクサを示す。Tx-BPF では Resonator11 及び Resonator13 に一端接地型 $\lambda/4$ 共振器を、Resonator12 に両端接地型 $\lambda/2$ 共振器を適用している。また、Rx-BPF では Resonator21 及び Resonator23 に両端開放型 $\lambda/2$ 共振器を、Resonator22 に一端接地型 $\lambda/4$ 共振器を適用している。ここでは、Resonator11 及び Resonator21 にて配置する減衰極を f_{02} 及び f_{01} と一致させるため、先に検討した 2 段構成の場合と同様の設計手順により各値を導出することが可能となる。

図10及び図11に示した 2 段 BPF を用いた構成の結果と図13及び図14に示した結果を比較すると、通過帯域間における減衰特性が大幅に改善されていることが確認できる。

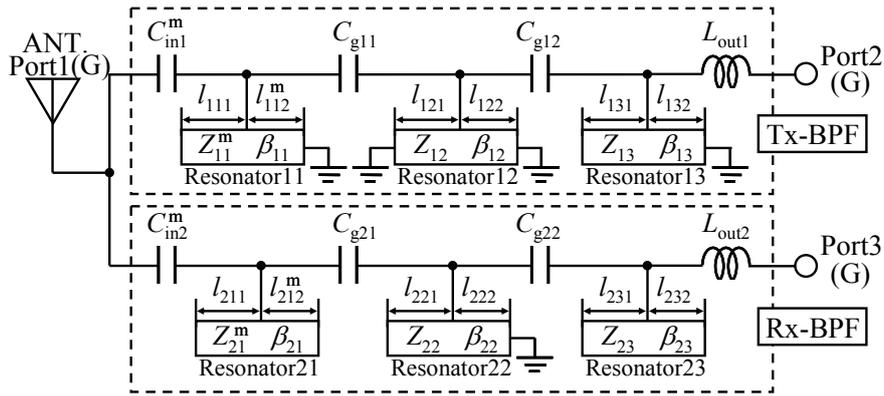


図 12 3 段共振器 BPF を用いたデュプレクサ

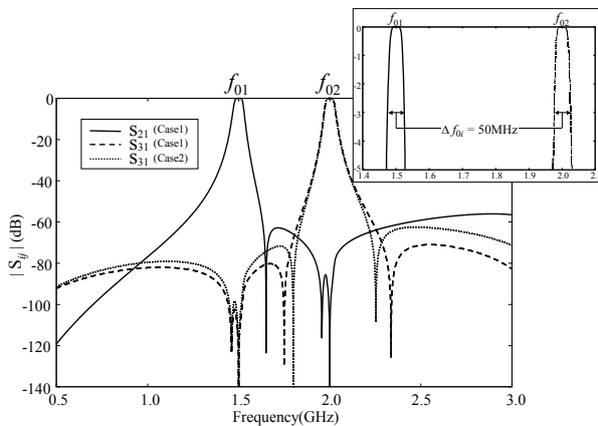


図 13 図 12 に示したデュプレクサの伝送特性

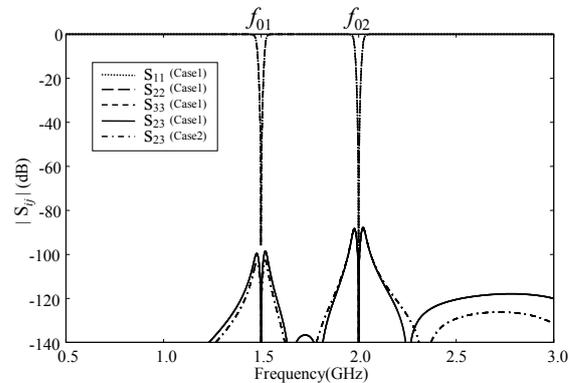


図 14 図 12 に示したデュプレクサの反射特性及びアイソレーション特性

図 13 にこれら設計諸元に基づき図 12 に示した回路の伝送特性を、また図 14 にその反射特性及びアイソレーション特性をそれぞれ示す。両結果より所望の 2 帯域通過特性、反射特性及びアイソレーション特性が実現できていることが確認できる。図 12 に示したデュプレクサにおける共振器の選択について、その特性インピーダンス及びスタブ長は、筆者らが製作可能な値[15]をとることを前提に決定した。また、各 BPF において両端開放型、両端接地型 $\lambda/2$ 共振器及び一端接地型 $\lambda/4$ 共振器を混在させることで、不要共振応答の改善を図った。

Case1 における減衰極の配置位置の選択理由として、Resonator12 及び Resonator22 において 3.25GHz 及び 3.66GHz に配置することで各 BPF の伝送特性において、その付近の周波数帯に出現する不要共振応答を改善している。また、Resonator13 及び Resonator23 に 1.65GHz 及び 1.8GHz に減衰極を配置することで各通過帯域近傍におけるスカート特性を改善した。さらに、Resonator23 は両端開放型 $\lambda/2$ 共振器を適用しているため、2.25GHz 付近の周波数帯に減衰極を実現することで f_{02} 高域側のスカート特性を改善した。また、本構成では各通過帯域の高域側における帯域外特性改善のため、各 BPF の出力結合に誘導性素子 (L_{out1} , L_{out2}) を用いている。

以上の検討より本提案のデュプレクサの設計法が複数段の共振器を用いた場合や、異なる種類の共振器を用いた場合でも成立することが確認できた。

3-2 トリプレクサ

本節では図 1(d)に示したデュプレクサ TypeD を 3 周波数帯を分波可能なトリプレクサに応用することで、その構成が分波回路の一般系として成り立つことを設計の観点から検討する。図 15 に BPF を 3 セクション構成とし、各 BPF 部分に各種タップ結合共振器を 3 段連続接続で構成したトリプレクサを示す。ただし、整合回路の考え方は、図 1(d)に示したデュプレクサ TypeD の場合と同じとする。各 BPF に用いる共振器については、BPF1 では Resonator11 に一端接地型 $\lambda/4$ 共振器を、Resonator12 に両端接地型 $\lambda/2$ 共振器を、Resonator13 に両端開放型 $\lambda/2$ 共振器を選択した。次に、BPF2 では Resonator21 に両端開放型 $\lambda/2$ 共振器を、Resonator22 に両端接地型 $\lambda/2$ 共振器を、Resonator23 に一端接地型 $\lambda/2$ 共振器を選択した。また、BPF3 では Resonator31 及び Resonator32 に両端開放型 $\lambda/2$ 共振器を、Resonator33 に一端接地型 $\lambda/4$ 共振器を選択した。

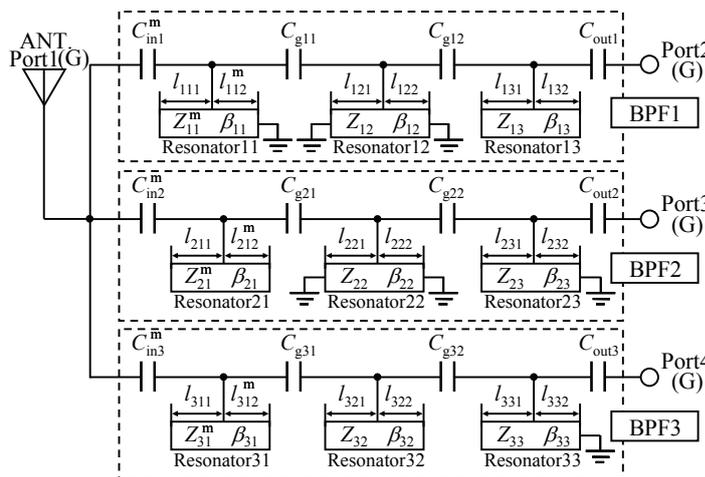


図 15 トリプレクサ

特性における各中心周波数をそれぞれ f_{01} , f_{02} 及び f_{03} ($f_{01} < f_{02} < f_{03}$) とすると、Resonator11, Resonator21 及び Resonator31 によって実現される減衰極は各 BPF の中心周波数 f_{03} , f_{01} 及び f_{02} とした。また、Resonator12, Resonator22 及び Resonator32 にて実現される減衰極は f_{02} , f_{03} 及び f_{01} と一致させるため、3.1 項で検討したデュプレクサ TypeD の構成と同様の設計手順により各値を導出することが可能となる。図 16 に図 15 に示した回路の伝送特性を、また図 17 にその反射特性及びアイソレーション特性をそれぞれ示す。結果より所望の 3 帯域通過特性、反射特性及びアイソレーション特性が実現できていることが確認できる。Case1 では Resonator13, Resonator23 及び Resonator33 によって減衰極をそれぞれ 3.0GHz, 3.0GHz 及び 3.2GHz に配置しているが、これはこの付近の周波数帯に出現する不要共振応答抑圧のためである。

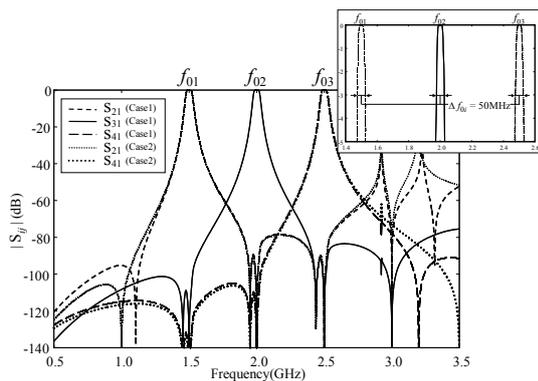


図 16 図 15 に示したトリプレクサの伝送特性

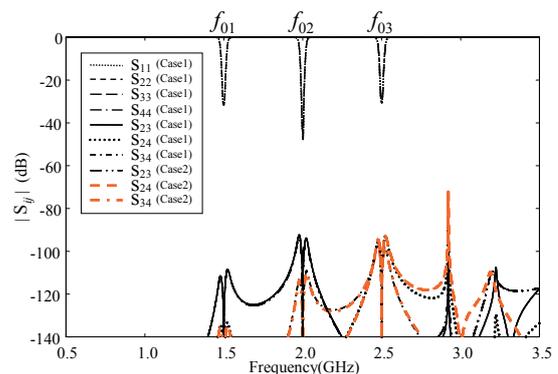


図 17 図 15 に示したトリプレクサの反射特性及びアイソレーション特性

以上の結果より、3.1 項で検討したデュプレクサを応用することで BPF を複数個用いるトリプレクサのような分波回路においても本提案の整合回路に関する設計法が適用可能であることが確認できた。

4 むすび

本研究課題では、タップ結合法を適用した有極形 BPF の基本特性と分波回路の整合回路に着目し、一例としてデュプレクサ・トリプレクサを取り上げ設計の観点から検討を行った。結果よりタップ結合法の適用により BPF に整合回路の機能を組み込んだデュプレクサ・トリプレクサの提案及びその設計が可能となった。ここでは、一例として基本タップ結合型共振器を BPF の構成に用いたが、仕様に応じて各種共振器を組み合わせることに対応可能であると考えており、これについては今後検討余地がある。さらに検討課題として、平面型伝送線路及び積層構造を用いた実際の回路構造を想定した電磁界シミュレータ及び回路シミュレータをもとにした統合シミュレータによる解析及び実験的検討が挙げられる。

【参考文献】

- [1]G.L.Matthaei, L.Young, and E.M.T. Jones, *Microwave Filters Impedance-Matching Networks, and Coupling Structures*. NewYork: McGraw-Hill, 1964.
- [2]J-Soo Lim and D.Chul Park, "A Modified Chebyshev Bandpass Filter with Attenuation Poles in the Stopband," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol.45,no.6,pp.898-904,June 1997.
- [3]C.C.Roda, A.J.M.Soaes and H.Abdalla Jr., "Microwave Multiplexers Using Complementary Filters," *Practical Filters and Couplers: A Collection from Applied microwaves and wireless magazine*.(2001).
- [4]M.Makimoto and S.Yamashita, "Microwave Resonators and Filters for Wireless Communication: Theory, Design, and Application," *Springer Series in Advanced Microelectronics*, 4 (2000).
- [5]江口和弘,村島定行, "ファジー推論による誘電体アンテナ共用器の自動調整," *信学論(C-II)*, Vol.J80-C-II, No.9, pp.297-304, (1997-9).
- [6]江口和弘,栗園貢,村島定行, "多段誘電体アンテナ共用器の特性自動調整," *信学論(C-I)*, Vol.J82-C-I, No.6, pp.382-391, (1999-6).
- [7]福永達也, "トリプレクサの整合条件及び整合回路について," *信学技報,MW 2005-35*, pp.15-19(2005-6).
- [8]和田光司,橋本修, "タップ結合法を用いたマイクロ波共振器フィルタによる帯域外特性改善," *信学論(C)*, vol. J89-C, No. 6, pp. 372-384, (2006-6).
- [9]M.Dishal, "A simple design procedure for small percentage bandwidth round-rod interdigital filters," *IEEE Trans. on Microw. Theory and Tech.*, Vol.MTT-13, pp.696-698, Sep.1965.
- [10]E.G.Cristal, "Tapped-line coupled transmission lines with application to interdigital and combline filters," *IEEE Trans. on Microw. Theory Tech.*, Vol.MTT-23, pp.1007-1012,Dec.1975.
- [11]J.S.Wong, "Microstrip tapped-line filter design," *IEEE Trans. on Microw. Theory and Tech.*, Vol.MTT-27, pp.44-50,Jan.1979.
- [12]K.Wada and O.Hashimoto, "Fundamentals of Open-ended Resonators and Their Application to Microwave Filters," *IEICE Transactions on Electronics*, Vol.E83-C, No.11, pp.1763-1775 (2000-11).
- [13]和田光司,相原良行, 中川浩一, 橋本修, "減衰極の位置制御が可能な新しいタップ形式を適用した分布定数形帯域通過フィルタ," *信学論(A)*, Vol.J86-A, No.4, pp.447-455, (2003-4).
- [14]谷井宏成,西村太,笹部孝司,植野嘉章,和田光司,岩崎俊, "有極特性を有する広帯域マイクロストリップ線路 BPF の実験的検討-分布定数タップ結合共振器を用いた構成に着目して-, " *信学技報,MW 2005-164*, pp.7-12(2006-1).
- [15]T.Ohno, K.Wada, and O.Hashimoto, "Design Methodologies of Planar Duplexers and Triplexers by Manipulating Attenuation Poles," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol.53,no.6,pp.2088-2095,June 2005.
- [16]和田光司,西堀満洋,岩崎俊, "有極型タップ結合共振器 BPF を用いたデュプレクサの分岐部に関する検討," *信学技報, MW2005-79*, pp.7-12, (2005-9).
- [17]和田光司,松田直紀,西堀満洋,岩崎俊,橋本修, "各種タップ結合共振器 BPF を用いた多極形トリプレクサの一設計法," *信学論(C)*, vol. J89-C, No. 5, pp. 282-291, (2006-5)

〈発 表 資 料〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
タップ結合法を適用した BPF により構成された分波回路の整合回路設計に関する一検討	電子情報通信学会技術研究報告, 29-34	2006.6
有極型デュアルバンド BPF の設計に対応したインバータ回路に関する理論検討	電子情報通信学会技術研究報告, 35-40	2006.6
両端接地型 $\lambda/2$ ストリップ線路共振器と $\lambda/4$ コプレーナ共振器を用いたデュアルバンドフィルタに関する一検討	電子情報通信学会マイクロ波研究会, 85-90	2006.7
インターディジタル状に共振器を配置した積層バランスフィルタに関する一検討	電子情報通信学会マイクロ波研究会, 127-131	2006.9
SIR を用いた 2 段コムライン結合線路フィルタの減衰極の配置位置に関する検討	電子情報通信学会マイクロ波研究会, 133-138	2006.9
容量装荷 $\lambda/2$ MSL 共振器を用いた直接結合型 BPF に関する実験的検討	電子情報通信学会マイクロ波研究会, 29-34	2007.1
タップ結合法を適用したマイクロストリップ線路共振器を用いた有極形デュアルバンドフィルタに関する実験的検討	電子情報通信学会マイクロ波研究会, 51-56	2007.1
結合線路を用いた広帯域マイクロストリップ線路フィルタに関する一検討	電子情報通信学会マイクロ波研究会, 27-32	2007.3
タップ結合型共振器を用いた有極形バランスフィルタの一検討	電子情報通信学会ソサイエティ大会	2006.9
両端接地型 $\lambda/2$ ストリップ線路共振器と $\lambda/4$ コプレーナ共振器を用いたデュアルバンドフィルタの基礎検討	電子情報通信学会ソサイエティ大会	2006.9
ブランチスタブ型共振器 BPF における通過帯域近傍の特性改善に関する検討	電子情報通信学会総合大会	2007.3