

広帯域フィルタとその分波器への応用 Wideband Filters and Their Application to Multiplexers

和田光司
Koji WADA

電気通信大学
The University of Electro-Communications

概要

無線通信システムに欠かせない部品の一つにマイクロ波・ミリ波受動フィルタがあり、古くから様々な設計方法や実現方法が提案されてきた。本基礎講座では、初心者の学生や社会人を対象として、次世代無線通信システム向けの広帯域マイクロ波フィルタの設計手法の基礎から応用事例について紹介する。具体的には、比帯域幅にして数十パーセントを超えるような超広帯域(Ultra-Wide Band: UWB) 無線通信向けのフィルタや 5G/Beyond 5G 向け広帯域フィルタ、さらにシングルバンド形やデュアルバンド形、準ミリ波帯向けプリント回路基板形および積層形の広帯域フィルタおよび分波器への応用例について解説する。

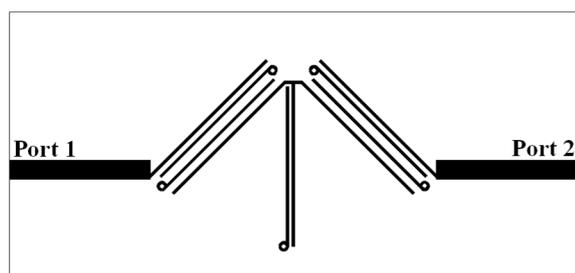


図 ローバンド形広帯域 BPF

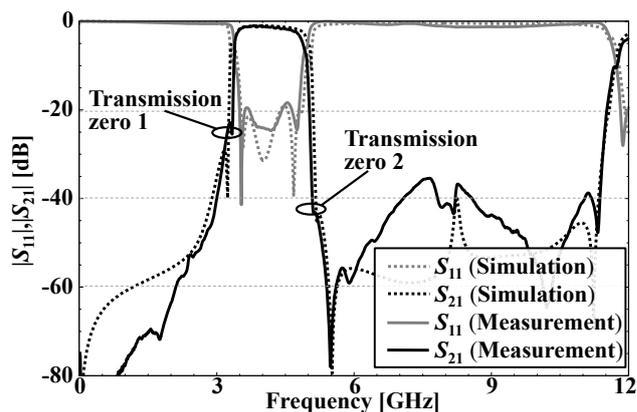


図 ローバンド形広帯域 BPF の特性

Abstract

Microwave and millimeter-wave passive filters are one of the indispensable components in wireless communication systems, and various design and realization methods have been proposed for a long time. In this basic course, for beginner students and working people, we will introduce the basics of design methods and application examples of wideband microwave filters for next-generation wireless communication systems. The lecture will cover the design of ultra-wide band (UWB) filters with specific bandwidths exceeding tens of percent, wideband filters for 5G/Beyond 5G, and single-band, dual-band, quasi-millimeter-waveband printed-circuit-board and multilayer wideband filters, as well as their applications in multiplexers.

1. はじめに

広帯域無線通信は、超広帯域(Ultra-Wide Band: UWB)無線通信を皮切りに幅広い分野での応用が期待されてきた。当初 UWB 無線通信は軍事研究として行われ、2002 年に米国連邦通信委員会(Federal Communication Commission: FCC)において UWB 無線通信方式が認可され、IEEE802.15.3a や Wireless USB で標準規格化が計られ 10m で 100Mbps 以上の性能を必須条件として規格化が進められてきたが、対象の周波数帯が広く各国の電波割り当てを考慮した互換性の確立が難しく、結果として製品への採用は進まず、UWB 無線通信の強力な推進役でもあった Intel Corp.の市場撤退等も重なり期待されていた普及とまでは至らなかった [1]。しかしながら現在、高精度な位置測位が可能なることから紛失防止等を目的としたスマートフォンへの搭載や、自動車向け無線通信機器への搭載等をはじめとする民生機器への浸透が見込まれ、今後、色々な分野において普及が期待できる [2]。周波数帯域幅の規制に着目すると、従来、FCC が割り当てた UWB 無線通信の周波数帯域幅は 3.1GHz-10.6GHz の 7.5GHz であった。現在、日本における UWB 無線通信の利用可能な周波数帯はマイクロ波帯においては 3.4~4.8GHz (ローバンド) および 7.25~10.25GHz (ハイバンド)、また、準ミリ波帯では、衝突防止用車載レーダー用途として 24.25~29GHz が設定されている。また日本ではハイバンドの低帯域 (7.25~9.0GHz) は屋外での利用が認められている (ローバンド及びハイバンドの高帯域 (9.0~10.25GHz) は屋外での利用は禁止)。一方で EU やユーラシア大陸、東アジア、オセアニア等の各国や地域によって割り当てられた帯域幅はこれとは少し異なり、6.0GHz~9.0GHz 辺りの帯域幅にて屋内外で使用可能な規制となっている [2], [3]。

無線通信システム用フィルタその中でも受動フィルタの歴史は古く、1950 年代から 1970 年代にかけて研究が盛んに行われており [4],[5]、それらの使用用途も携帯電話、スマートフォンをはじめとする小型端末を筆頭に多岐にわたる。また、それらの種類も数多く、導波管形フィルタ、平面形フィルタ、積層形フィルタ、弾性表面波(Surface Acoustic Wave:SAW)フィルタ / 圧電薄膜共振器 (Film Bulk Acoustic Resonator:FBAR)フィルタ等が挙げられる。

受動フィルタの周波数特性の実現に向けて帯域通過フィルタ(Bandpass Filter: BPF)特性が要求された場合、通過帯域内における挿入損失の軽減、通過帯域幅の確保および通過帯域近傍の阻止域における減衰特性の確保等について仕様に応じて努める必要がある。BPF の通過帯域特性には、大きく分けて狭い

通過帯域特性(狭帯域特性)、広い通過帯域特性 (広帯域特性) の 2 種類がある。現在では、フィルタ技術の進歩とともに狭帯域特性の実現には SAW フィルタや FBAR フィルタを用い、また広帯域特性の実現には平面形や積層形が用いられることが多い。また、通過帯域近傍の阻止域における高減衰特性の実現には、共振器の多段化や複数個の減衰極の配置が有効とされている。

BPF の広帯域特性については 1996 年に野口らによるコプレーナ線路結合線路を用いた BPF の発表を皮切りに [6]、牧本らがフィルタの小型化、スプリアス応答抑圧用に提案してきたステップインピーダンス共振器(Stepped Impedance Resonator: SIR)の広帯域な共振特性の制御を巧みに利用した回路 [7]をはじめ国内外で多数の提案がされてきた [8],[9]。

本基礎講座では、筆者の研究グループが開発してきた回路を中心にシングルバンド形、デュアルバンド形、準ミリ波帯の平面形および積層形の広帯域 BPF の設計例および分波器への応用例を示すとともに、最近の広帯域関連の研究内容について紹介する。

2. シングルバンド形 BPF

本章ではフルバンド相当の広帯域特性を実現するフルバンド形の平面形 BPF および、ローバンド/ハイバンド相当の広帯域特性を実現する平面形 BPF および積層形 BPF について紹介する。

2.1 フルバンド形

図 1 に谷井らが提案した両端開放形のタップ共振器を用いた広帯域 BPF(Type A)の基板の回路パターンを示す [10]。図 1 の回路はマイクロストリップ線路構造で構成されており、設計には回路シミュレータと電磁界シミュレータを用いた。基板に FR4(比誘電率 $\epsilon_r=4.8$ 、導体厚さ $18\mu\text{m}$ 、基板厚さ 0.8mm) を使用している。図 2 にベクトルネットワークアナライザ(VNA)による測定結果をそれぞれ示す。図 2 の結果より広帯域特性(約 7.5GHz)および通過帯域近傍の両側に複数の減衰極が実現されていることが確認できる。また、それらの減衰極により急峻な肩特性が実現されている。この BPF は、共振器と共振器間の構造上 周波数 0Hz における信号は通すことになる。スタブおよびタップ線路の長さ、タップ線路の線路幅の調整により、減衰極の実現位置を制御できるため BPF における入出力および共振器間結合を併せて調整することで通過帯域幅の制御が可能である。

タップ共振器は、基本特性として共振周波数と反共振周波数を実現可能であり、それらをフィルタ設計に積極的に利用することでフィルタ特性として通

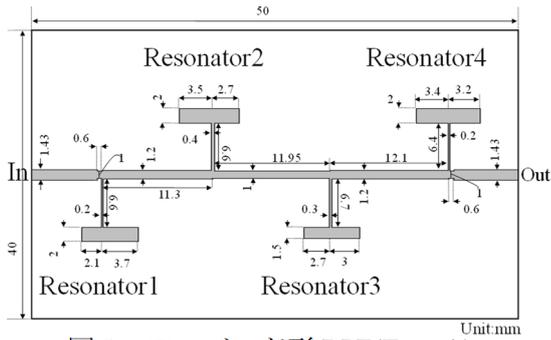


図 1: フルバンド形 BPF (Type A)

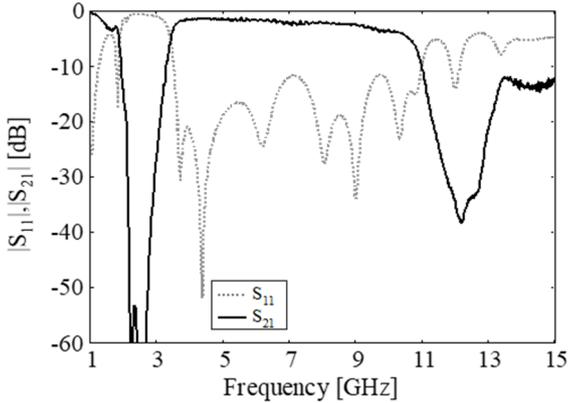


図 2: 図 1 の Type A の特性

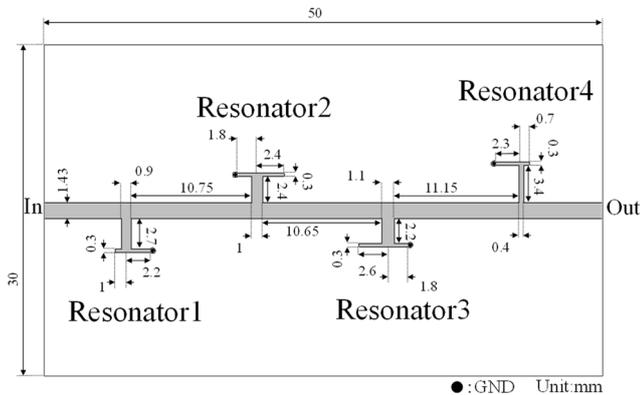


図 3: フルバンド形 BPF (Type B)

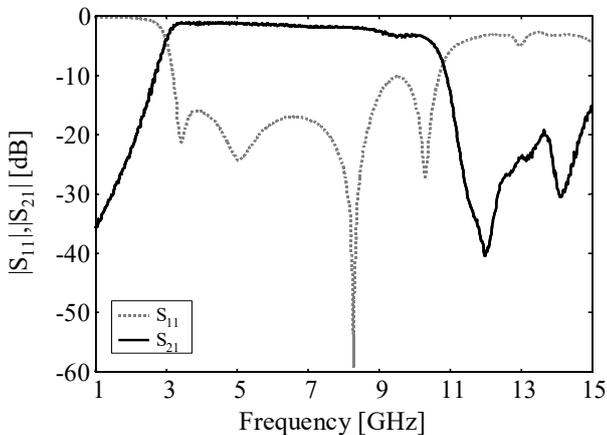


図 4: 図 3 の Type B の特性

過帯域および減衰極が実現できる[11],[12]。このフィルタにおいて BPF 特性の広帯域化を図るためには、最初にタップ共振器により減衰極の配置位置の調整を行い通過帯域近傍の帯域外減衰量の確保をし、その後共振器間の線路のパラメータを調整することで通過帯域内におけるマッチング調整を行っている。

図 3 に一端接地形共振器を用いた BPF (Type B) の基板の回路パターンを示す。図 4 に図 3 の測定結果をそれぞれ示す。図 4 の結果より広帯域特性を有していることが確認できる。また、一端接地形タップ共振器の働きにより通過帯域近傍の高域側へのみ複数の減衰極が実現され、さらに、周波数 0 Hz における信号は遮断されている。結果より、通過帯域近傍の低域側に減衰極が実現されていないため、低域側の肩特性は図 2 の両端開放形より良好ではない。

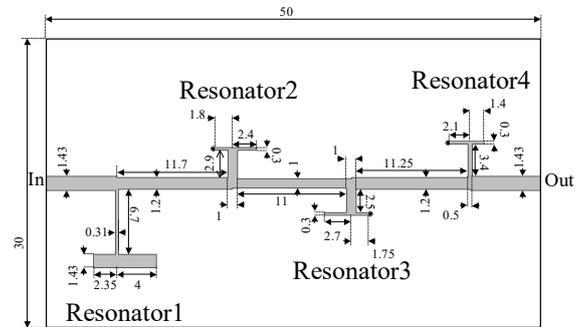


図 5: フルバンド形 BPF (Type C)

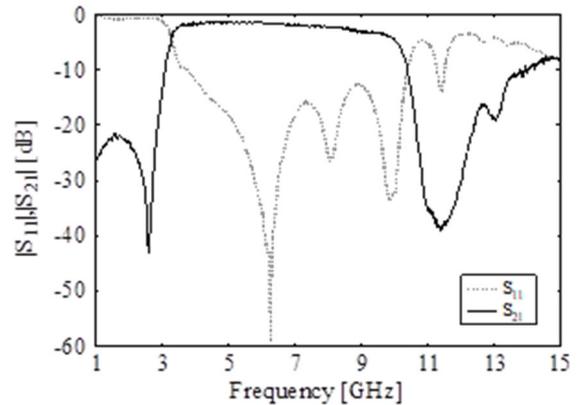


図 6: 図 5 の Type C の特性

さらに、図 5 に 1 段目 (Resonator 1) に両端開放形のタップ共振器、2 段目 (Resonator 2) ~ 4 段目 (Resonator 4) に一端接地形のタップ共振器を用いた BPF (Type C) の基板の回路パターンを、また、図 6 に測定結果をそれぞれ示す。図 6 の測定結果より通過帯域近傍の低域側に 1 個の減衰極の実現が確認できる。さらに、通過帯域近傍の高域側にも複数の減衰極の実現が確認できる。両端開放形のタップ共振器

により通過帯域近傍の両側に減衰極を実現できることから、低域側に1個の減衰極を実現し、一端接地形のタップ共振器の適用により周波数0Hzにおける信号の遮断も可能である。

図7に清水らが提案した両端開放形のタップ SIR を用いた広帯域 BPF(Type D)の基板の回路パターンを示す。図7の回路はマイクロストリップ線路構造で構成されており、設計には回路シミュレータと電磁界シミュレータを用いている。図7の回路はタップ線路を接続した両端開放形 SIR と減衰極を実現する結合線路を組み合わせた構成となっている。基板には BT レジン基板(三菱ガス化学株式会社製 CCL-HL950:比誘電率 $\epsilon_r=3.4$ 、誘電体厚み $h=0.6\text{mm}$ 、導体厚み $t=18\mu\text{m}$)を使用している。図8に図7の測定結果を示す。両端開放形のタップ SIR により、通過帯域の両側に減衰極を実現している。また、共振器間の結合線路の効果により周波数0Hzにおける信号の遮断も可能である。

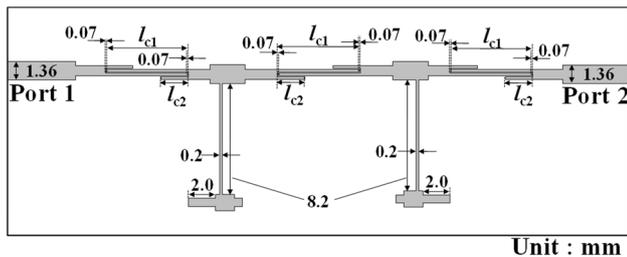


図7: フルバンド形 BPF (Type D)

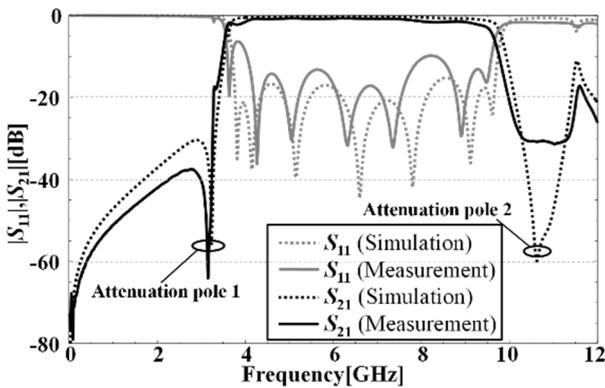


図8: 図7の Type D の特性

2.2 ローバンド形/ハイバンド形

UWB 無線通信では、フルバンド形の他にローバンドおよびハイバンドの通過帯域特性実現が要求される場合がある。本節ではローバンド形/ハイバンド形相当の特性を実現する平面形と積層形 BPF について紹介する。

清水らは、図9に示す $\lambda/4$ 共振器結合開放端スタブと多導体結合線路を用いた広帯域 BPF(Type A) の

回路パターンを提案している[13]。図9は、 $\lambda/4$ 共振器結合開放端スタブを1セクションと4導体結合線路を2セクション用いて構成されている。誘電体基板には BT レジン基板(三菱ガス化学株式会社製 CCL-HL950:比誘電率 $\epsilon_r=3.4$ 、誘電体厚み $h=0.6\text{mm}$ 、導体厚み $t=18\mu\text{m}$)を用いた。図10及び図11に提案回路においてローバンド及びハイバンド用に回路のパラメータを調整した場合について電磁界シミュレータによる計算結果と測定結果を併せて示す。図10および図11の結果より特性改善の余地はあるがそれぞれのバンドにおいて広帯域特性及び阻止域での高減衰量を実現していることが確認できる。

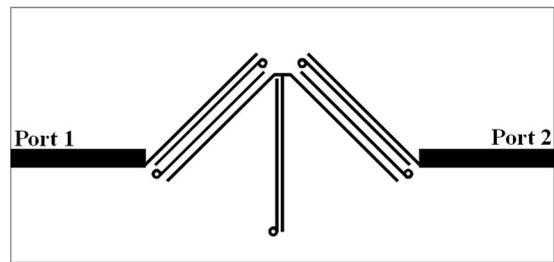


図9: ローバンド形/ハイバンド形 BPF (Type A)

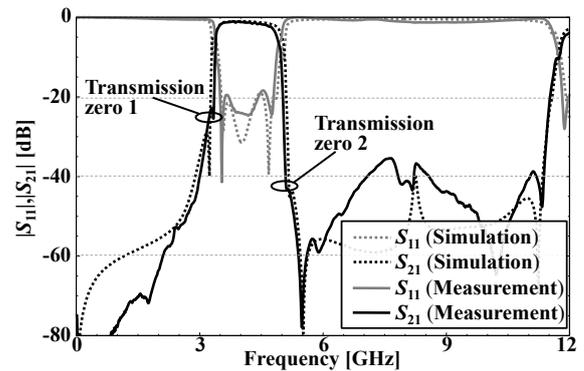


図10: 図9の TypeA の特性 (ローバンド形)

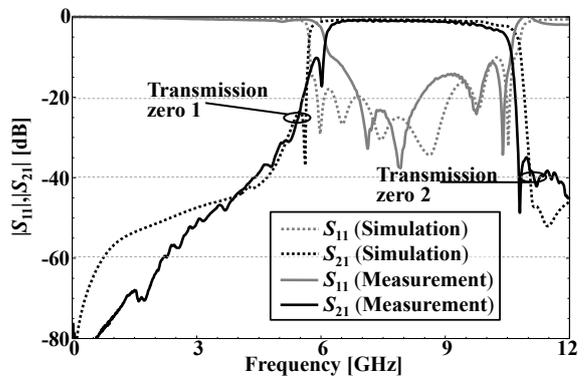


図11: 図9の TypeA の特性 (ハイバンド形)

次に大島らが提案した、低温同時焼成セラミック (Low Temperature Co-fired Ceramic:LTCC)基板を用いた積層形 BPF (TypeB)について示す[14]。LTCC 基板の諸元は、比誘電率 $\epsilon_r=8.0$ 、誘電正接 $\tan \delta=0.001$ 、導体厚み、 $t=8 \mu m$ である。図 12 に回路の基板の概観図を示す。本構造はコンデンサと先端開放スタブで構成した減衰極を実現する共振器と先端開放形スタブで構成されている。図 13 と図 14 にローバンド形の電磁界シミュレーション結果とハイバンド形の測定結果をそれぞれ示す。図 13 および図 14 の結果より、ローバンド、ハイバンドの通過帯域の実現とともに各通過帯域の両側に減衰極を実現していることが確認できる。本構造はプロトタイプのため小型化はされていないが、各共振器の長い線路部分の巻き線化を図ることで小型化された構造も現在は実現されている。

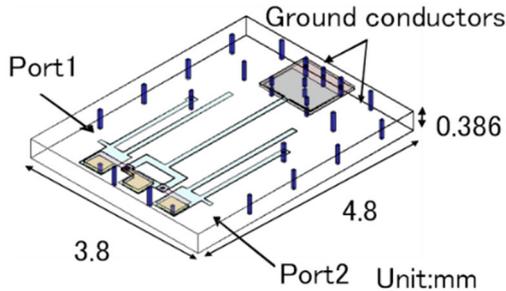


図 12: ローバンド形/ハイバンド形 BPF (TypeB)

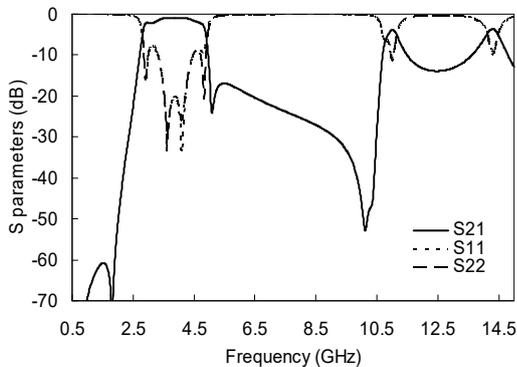


図 13: 図 12 の TypeB の特性 (ローバンド形)

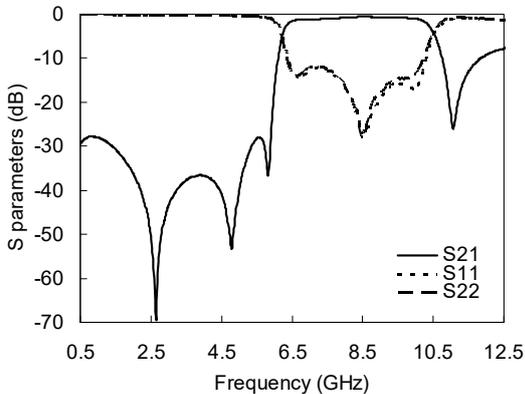


図 14: 図 12 の TypeB の特性 (ハイバンド形)

高岡らは、図 15 の LTCC 基板によりハイバンド形 (TypeC)を実現した。この構造は両端開放形 $\lambda/2$ 共振器の中央にスタブを装荷した共振器の折り曲げを行い小型化した構成を 1 セクションと、一端接地形共振器を折り曲げた構成を 2 セクション用いた 3 セクション構成となっている[15]。本構造には母材として LTCC 基板(比誘電率 $\epsilon_r=6.9$ 、誘電正接 $\tan \delta=0.007$ 、導体厚み $t=10 \mu m$)を用いている。図 16 に図 15 の減衰極を有する広帯域特性を示す。

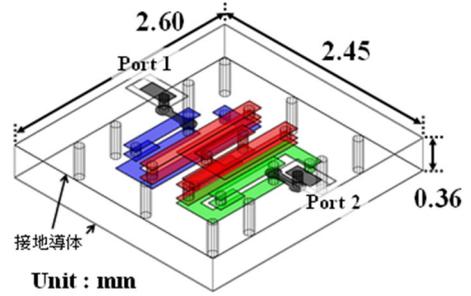


図 15: ハイバンド形 BPF (TypeC)

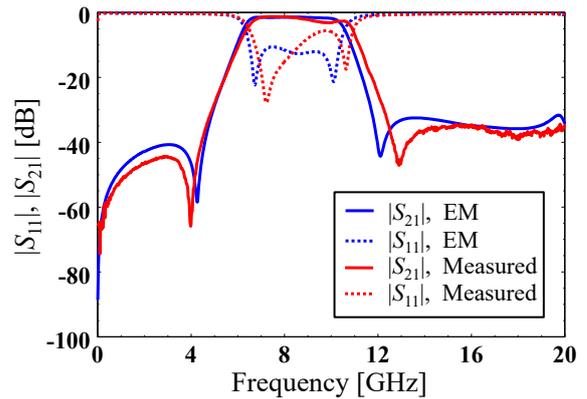


図 16: 図 15 の TypeC の特性

3. デュアルバンド形 BPF

デュアルバンド形 BPF については北村らが提案し、その後、無線 LAN 用をはじめ数多くの検討が国内外でされてきた[16]。さらに UWB 無線通信の研究進展とともに、デュアルバンド形についても通過帯域の広帯域化についても拍車がかかった。

奥崎らが提案した各種スタブを用いた平面形 BPF(TypeA)について図 17 に示す[17]。図 17 の構成は、マイクロストリップ線路構造で、T 型スタブと両端接地形共振器の組み合わせにより構成されている。図 18 にシミュレーション結果と実験結果を併せて示す。図 18 の結果より各通過帯域幅の確保、阻止域特性改善に課題が残るものの、デュアルバンドの広帯域特性の実現可能性を示唆している。

さらに積層構造による小型化に着目し、LTCC 基

板を用いた小型デュアルバンド BPF についても企業との共同研究で展開した。図 19 に高岡、大城らが提案した LTCC 基板で構成した小型 BPF(TypeB)を示す [18]。図 19 の構造は先端開放スタブを装荷した両端開放形共振器に一端接地形共振器を結合させた LTCC 基板の広帯域 BPF に、先端開放スタブを装荷することによる減衰極の効果により、不要帯域を阻止し、さらに複数の結合共振器により低域側および高域側の通過帯域特性を得ている。図 20 に図 19 にプロトタイプ構造と測定結果を示す。図 20 の特性より結合共振器を積層方向に結合することで、小型でかつ良好な広帯域特性を有する積層形デュアルバンド BPF が構成できていることが確認できる。

大島らが提案してきた LTCC 基板を用いた図 12 の広帯域 BPF を用いた別構造のデュアルバンド BPF(Type C)[19]とその特性を図 21 と図 22 にそれぞれ示す。図 22 の結果よりデュアルバンド通過特性が得られかつ、小型な実用に近い回路構造が実現できていることが確認できる。

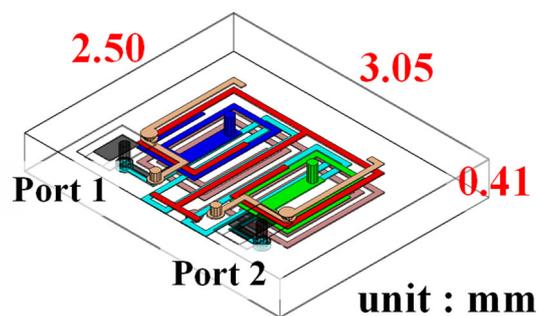


図 19: デュアルバンド BPF (Type B)

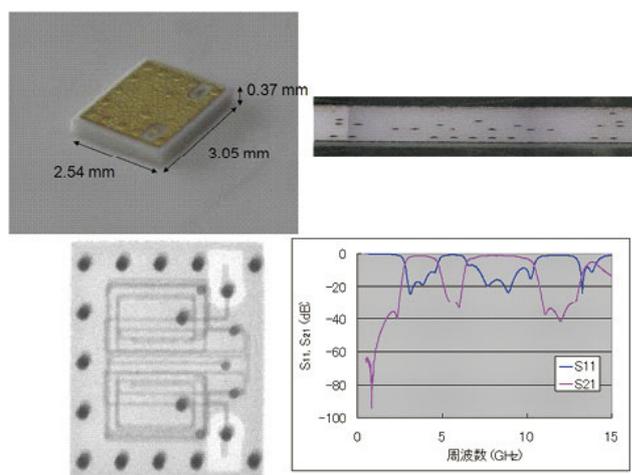


図 20: 図 19 の Type B のプロトタイプと特性

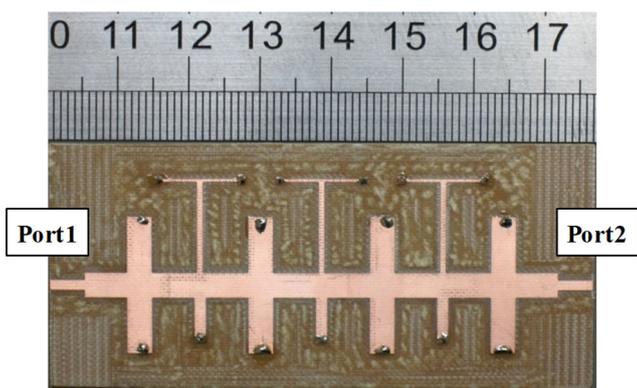


図 17: デュアルバンド BPF(Type A)

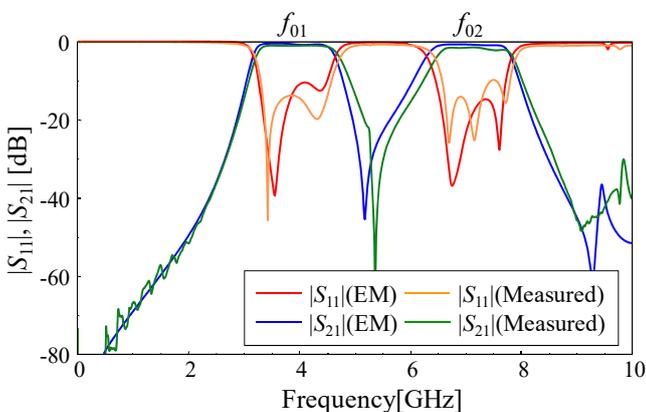


図 18: 図 17 の Type A の特性

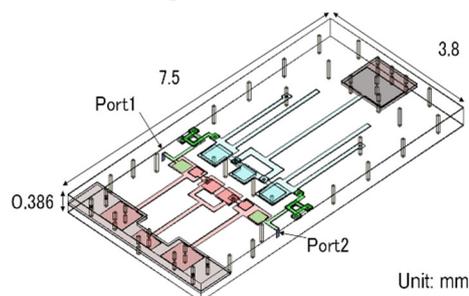


図 21: デュアルバンド BPF (Type C)

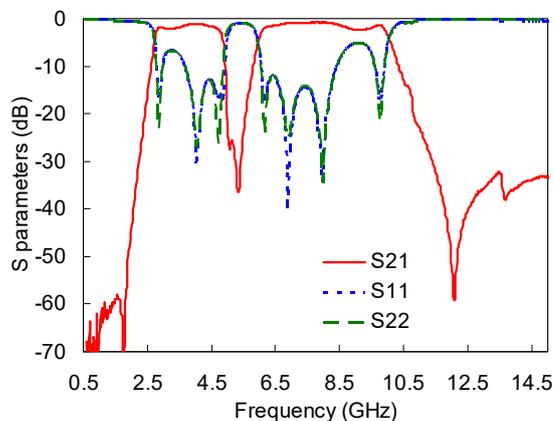


図 22: 図 21 の Type C の特性

4. 準ミリ波形 BPF

準ミリ波帯は衝突防止用車載レーダー用途等で期待されている周波数帯である。図 23 は高橋らが提案したヘアピン形 SIR を用いた 3 段 BPF (Type A) とその特性でマイクロストリップ線路構造を適用している [7], [20]。さらに、製品のプロトタイプとして図 24 に示す特性を有する構造 (Type B) についても協力・共同開発を行ってきた。さらに、石村らは図 25 のマイクロストリップ線路構造を用いた広帯域特性 (14GHz~28GHz) を有する 21GHz 帯 BPF (Type C) 構成で、天文学の研究機関の水蒸気ラジオメータシステムへの組み込みに向けて協力・共同研究を行ってきた [21]。

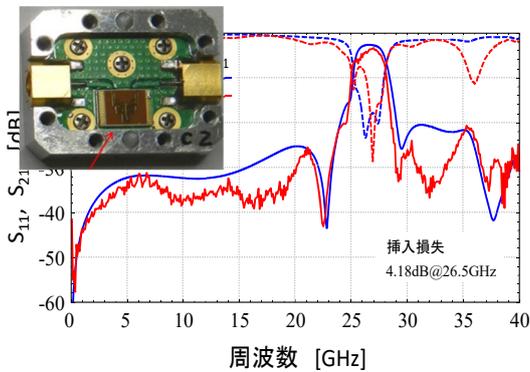


図 23: 準ミリ波形 BPF (TypeA)

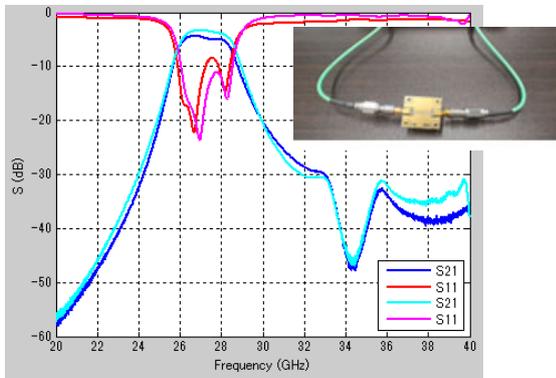


図 24: 準ミリ波形 BPF (TypeB)

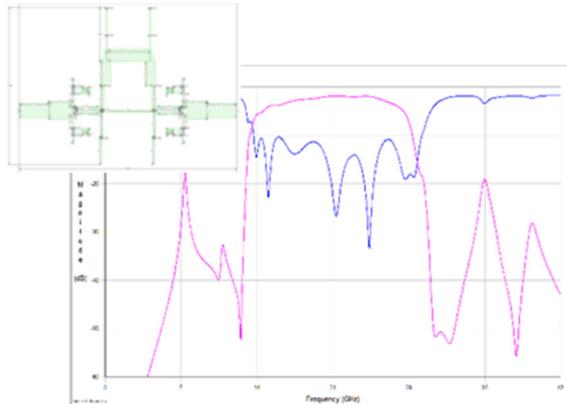


図 25: 準ミリ波形 BPF (TypeC)

5. 分波器

清水らが提案した図 7 に示した BPF とローパスフィルタ (Lowpass Filter: LPF) とで構成された分波器の一例としてマイクロストリップ線路ダイプレクサ (Type A) を図 26 にその特性を図 27 にそれぞれ示す。結果より LPF 特性と広帯域 BPF 特性が得られていることが確認できる。このダイプレクサについては、LPF と広帯域特性を有する BPF の設計を行い、接続には整合回路を介しており、その整合回路の設計では、スミスチャート等を用いてそれぞれの通過帯域においてできる限り反射特性が良好になるよう、また他方のフィルタの阻止域での減衰量が確保できるよう素子の選択、素子値の調整を行っている。減衰極制御機能付き結合線路スタブを用いた BPF を組み合わせた 2 つの BPF 特性を有するマイクロストリップ線路ダイプレクサ (Type B) (図 28) とその特性を図 29 にそれぞれ示す [22], [23]。ここで用いた BPF は、図 9 の原型となった構成である。さらに、大島らが提案した LTCC 基板を用いた LPF と広帯域 BPF による積層トリプレクサとその特性を示す (図 30、図 31)。また、勝本らは LTCC 基板を用いた積層広帯域フィルタと狭帯域フィルタ (SAW フィルタ) を組み合わせた広帯域・狭帯域通過特性実現形ダイプレクサ (Type C) [24] についても実現している (図 32、図 33)。

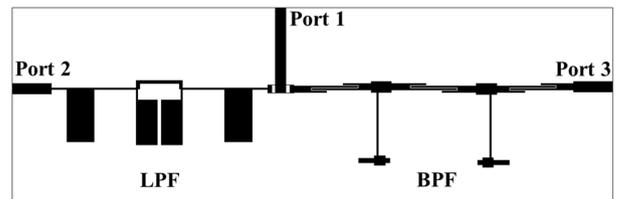


図 26: ダイプレクサ (TypeA)

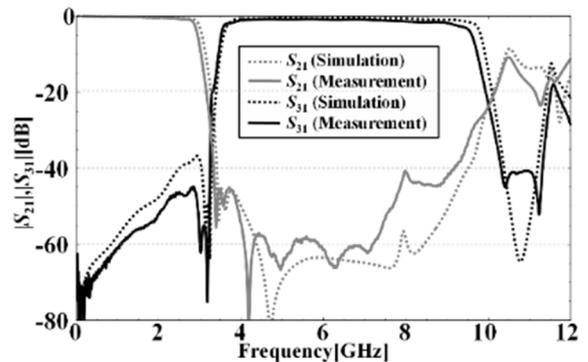


図 27: 図 26 の Type A の特性

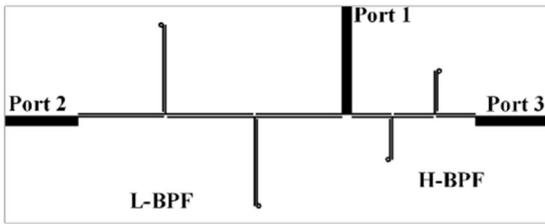


図 28: ダイプレクサ(TypeB)

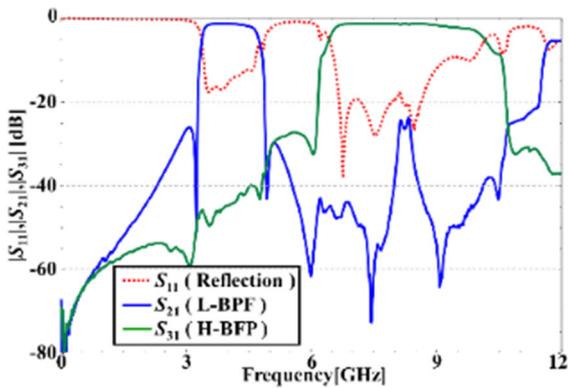


図 29: 図 28 の TypeB の特性

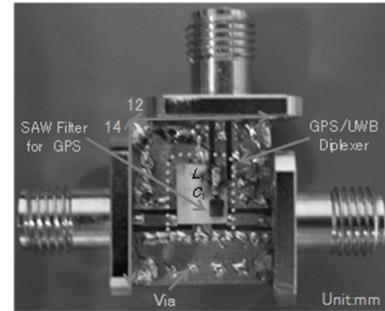


図 32: ダイプレクサ(TypeC)

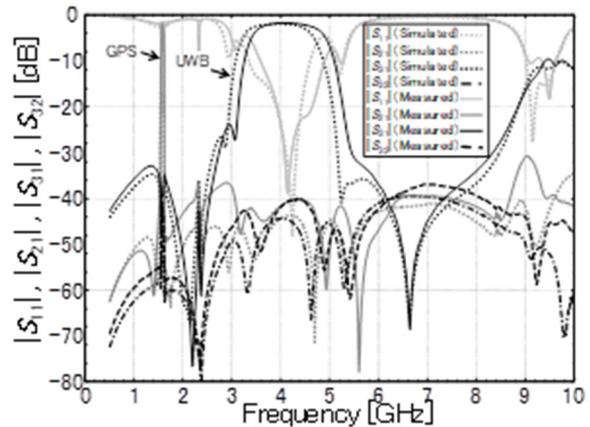


図 33: 図 32 の TypeC の特性

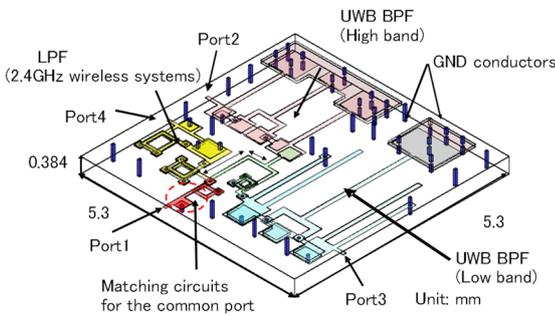


図 30: トリプレクサ

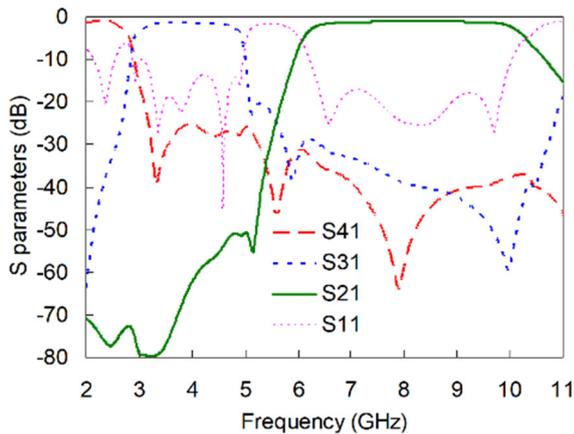


図 31: 図 30 のトリプレクサの特性

6.その他

5 章までで紹介してきた広帯域フィルタおよび分波器以外に以下について現在研究を行っている。佐藤らが提案した DSPSL(Double Sided Parallel-Strip Line: DSPSL)構造による 180° スワップ構造とリング共振器を用いた平衡形広帯域ダイプレクサとその特性を示す(図 34、図 35) [25]。図 35 の結果より広帯域通過特性を実現しつつ良好なデファレンシャルモード特性の結果を示していることが確認できる。

図 36 に成島らが提案した欠陥接地構造(Defected Ground Structure : DGS)とチップ抵抗で構成された平面形コモンモードフィルタを示す[26]。図 37 に図 36 のフィルタの測定結果を示す(パナソニックインダストリー株式会社 MEGTRON7 を使用)。結果よりコモンモードを広帯域に抑制しながら良好なデファレンシャルモード特性の結果を示している。また、酒井らが提案した SIR の広帯域共振特性[7]を用いたチップレス RFID (Radio Frequency Identification : RFID) タグと超広帯域インパルス無線 (Impulse Radio UWB : IR-UWB) を用いたチップレス RFID タグシステム(図 38、図 39) とその GUI 画面の一例(図 40)を示す[27]。

謝 辞

MWE2023 基礎講座において講演の機会を下さった MWE2023 実行委員会各位、事務局各位ならびに株式会社東芝研究開発センター河口民雄氏に感謝の意を表す。本稿の内容は、研究室の学部(学域)卒業生、大学院修了生(現:小山工業高等専門学校大島心平准教授、現:木更津工業高等専門学校・本学客員研究員谷井宏成准教授、サクラテック株式会社取締役酒井文則氏)、牧本三夫客員教授、ビフレストック株式会社取締役太田謙一客員研究員、佐川守一客員研究員らとの協力・共同研究の研究成果であり、この場を借りて心から感謝の意を表す。また、高周波プリント基板について日頃よりご指導頂くパナソニックインダストリー株式会社佐々木智江氏と神山智英氏に感謝の意を表す。

本稿の研究の一部は、東京大学大規模集積システム設計教育研究センターを通し、Keysight Technologies, Inc.の協力で行われた成果である。

文 献

- [1]<https://xtech.nikkei.com/dm/article/HONSHI/20081222/163202/> 2023年9月1日参照.
- [2]https://www.tele.soumu.go.jp/j/sys/others/uwb_outdoor/index.htm 2023年9月1日参照.
- [3]<https://article.murata.com/ja-jp/article/what-is-uwb-wireless-communication> 2023年9月1日参照.
- [4]G.Matthaei, L.Young,and E.M.T. Jones, "Microwave Filters, Impedance Matching Networks, and Coupling Structures," MCGRAW-HILL Book Co.,1964.
- [5]小林禧夫,鈴木康夫,古神義則, "マイクロ波誘電体フィルタ," (社)電子情報通信学会, 2007.
- [6]井上順治,野口泰正, "両端接地形結合コプレーナ線路共振器帯域フィルタの検討," 信学ソ大,C-86,p. 86, 1996.
- [7]牧本三夫,佐川守一,松尾道明,和田光司, "マイクロ波伝送線路共振器の構成と応用," 森北出版株式会社, 東京 2014.
- [8]李可人, "超広帯域(UWB)バンドパスフィルタ概論," 信学ソ大,CS2-1,2009.
- [9]Lei Zhu, Sheng Sun, and Rui Li, "Microwave Bandpass Filters for Wideband Communications," John Wiley & Sons. Inc., Publication, 2012.
- [10]谷井宏成, 清水康隆, 和田光司, 西村太, 笹部孝司, 植野嘉章, 岩崎俊, "各種分布定数タップ結合型マイクロストリップ線路共振器を用いた有極形広帯域フィルタに関する検討," 信学論 (C) vol. J91-C, no. 6, pp. 332-340, June 2008.
- [11]E.G.Cristal, "Tapped Line Coupled Transmission Lines with Application to Interdigital and Comblin Filters," IEEE Trans. Microw. Theory Tech., vol.MTT-23, pp.1007-1012, Dec.1975.
- [12]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, June 2006.
- [13]清水康隆,島方幸広,村田龍司,大島心平,和田光司,岩崎俊, " $\lambda/4$ 共振器結合開放端スタブと多導体結合線路を用いた広帯域マイクロストリップ線路 BPF に関する一検討," 信学総大, C-2-115. Mar. 2011.
- [14]大島心平, 和田光司, 村田龍司, 島方幸広, "キャパシタと $\lambda/2$ 先端開放型スタブで構成される有極形共振器を用いた LTCC 基板内蔵小型広帯域 BPF に関する一検討," 信学論(C),vol. J91-C, no. 8, pp. 409-417, Aug.2008.
- [15] 高岡宏知,牛江正彦,和田光司,岩崎俊, "4.4GHz 帯低背型広帯域 BPF に関する一検討," 信学技報, MW2007-171, pp. 17-21, Feb.2008.
- [16] Kouji Wada and Osamu Hashimoto, "Fundamentals of Open-Ended Resonators and Their Application to Microwave Filters," IEICE Trans. Electron., vol. E83-C, no.11, pp.1763-1775, Nov. 2000.
- [17] 奥崎伸彦,島方幸広,山内拓幸,和田光司,岩崎俊, "タップ結合型共振器を用いたマイクロストリップ線路デュアルバンド BPF," 電学論 (C) , vol.128, no.6, pp. 878-884, June 2008.
- [18]大城和宣, 高岡宏知, 牛江正彦, 清水祐一, 和田光司, "UWB 用小型積層デュアルバンド BPF," 信学総大, C-2-82, Mar. 2010.
- [19]Shinpei Oshima, Koji Wada, Ryuji Murata, and Yukihiko Shimakata, "Multilayer Dual-Band Bandpass Filter in Low Temperature Co-Fired Ceramic Substrate for Ultra-Wideband Applications," IEEE Trans. on Microw. Theory Tech., vol.58, no.3, pp.614-623, Mar. 2010.
- [20]高橋祐介, 岡野晋一郎, 小舟一司, 五十嵐康博, 牧本三夫, 酒井文則, 和田光司, "ヘアピン型 SIR を用いた 26GHz 帯マイクロストリップ線路 BPF に関する検討," 信学技報, vol. 111, no. 250, MW2011-99, pp. 75-78, Oct. 2011.
- [21]石村康大,和田光司,川口則幸, "リング共振器とインタジェイタル結合を用いた 21GHz 帯広帯域マイクロストリップ線路バンドパスフィルタに関する検討," 信学技報, vol. 122, no. 360, CAS2022-95, pp. 163-167, Jan. 2023.
- [22]清水康隆, 村田龍司, 大島心平, 島方幸広, 和田光司, " $\lambda/4$ 共振器結合型開放端スタブを用いた有極型広帯域マイクロストリップ線路 BPF," 信学ソ大,C-2-78 , Sep.2008.
- [23]清水康隆,村田龍司,大島心平,島方幸広,和田光司, " $\lambda/4$ 共振器結合型開放スタブを用いた有極型広帯域 BPF と有極型 LPF を用いた分波回路に関する検討," 輻射科学研究会 3 月例会, RS08-17, pp. 188-194, Mar. 2009.
- [24]和田光司,勝本達也,大島心平,村田龍司,海老原均, "SAW フィルタと低温同時焼成セラミック基板で構成した広帯域 BPF を用いた高周波分波回路の開発," エレクトロニクス実装学会誌, vol.18, no.1, pp.66-72, Jan. 2015.
- [25]佐藤 雄介, 和田 光司, "DSPSL 構造とリング 共振器による広帯域通過特性を有する平衡型フィルタを用いたダイプレクサに関する一検討," 第 37 回エレクトロニクス実装学会春季講演大会, Mar. 2023.
- [26]成島章太, 和田光司, 肖鳳超, "欠陥接地構造と抵抗装荷による広帯域な吸収型マイクロストリップ線路コモンモードフィルタに関する検討," 信学技報, vol. 122, no. 360, CAS2022-92, pp. 145-150, Jan. 2023.
- [27] Fuminori Sakai, Kazuo Ohta, Yoshimasa Amano, Mitsuo Makimoto, and Koji Wada, "IR-UWB Reader for Credit Card-Sized NFC Chipless RFID Tag using Asymmetrical Stepped Impedance Resonators," The 53rd European Microwave Conference 2023, C34-5, Sep. 2023.

著者紹介

和田 光司 電気通信大学 大学院 教授,

wada.koji@uec.ac.jp