

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 28 日現在

機関番号：12401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420319

研究課題名(和文) 60GHz帯次世代超高速無線通信用ミリ波広帯域フィルタに関する研究

研究課題名(英文) Studies on 60GHz Millimeter-Wave Wideband Bandpass Filters for Future Ultra-High Speed Wireless Communications

研究代表者

馬 哲旺 (MA, Zhewang)

埼玉大学・理工学研究科・教授

研究者番号：40282909

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：複数の共振モードと減衰極を併せ持つ有極型マイクロストリップ(MS)マルチモード共振器を提案し、小型で優れた特性を持つミリ波広帯域通過フィルタ(BPF)を設計する。25GHzと60GHzで3dB比帯域幅それぞれ約20%と10%のBPFを設計し、広い通過域、急峻な減衰特性及び広い阻止域を実現した。またMS短絡スタブを用いた広帯域BPFの汎用的な設計理論を提案し、この種のBPFの小型設計及び有極化設計を行い、比帯域幅40%のBPFを設計試作測定した結果、所望の周波数特性を実現した。さらに、広帯域BPFの阻止域特性を改善するためのMS小型低域通過フィルタの構造と設計手法を開発した。

研究成果の概要(英文)：Novel microstrip multi-mode resonators with multiple transmission zeros are proposed and used to develop compact high-performance millimeter-wave wideband bandpass filters (BPFs). A BPF with a fractional bandwidth (FBW) of 20% at 25GHz and a BPF with a FBW of 10% at 60GHz are designed respectively, and both BPFs realize the desired wide passband, sharp skirt property, and very wide stopband. A rigorous synthesis theory of wideband BPFs using microstrip short-circuited stubs is proposed and a design method of the filter using optimization method is developed. A novel wideband BPF using both short-circuited and an open-ended stubs is also proposed to produce multiple transmission zeros in its stopband. A BPF with a FBW of 40% is designed and fabricated, and the measured response shows the expected excellent performance. Finally, to improve the stopband characteristics of wideband BPFs, compact microstrip lowpass filters are proposed and their design methods are developed.

研究分野：工学

キーワード：無線通信 ミリ波 広帯域フィルタ マイクロストリップ線路 マルチモード共振器 周期構造 周波数選択特性

1. 研究開始当初の背景

近年、各種無線通信技術と応用の発展に伴い、モバイルネットワークを利用する情報通信量は急速に拡大し、既存の 2.4GHz と 5GHz 周波数帯も次第に対応できなくなり、周波数資源の不足がますます深刻な問題となっている。こうした中、準ミリ波、ミリ波、およびテラヘルツを含めた高い周波数の電波の開発利用が注目されている。特に、60GHz 帯のミリ波は次世代の無線 LAN に使用される電波として期待され、業界から熱い視線を集めている。その理由は、まず米国やヨーロッパでは 57G~64GHz、日本では 59G~66GHz、という 7GHz もの広い周波数帯域を免許不要の帯域として割り当てられ、免許を申請して取得するための膨大な手間や費用が不要になるメリットは大きいことがある。次に技術の面では、60GHz 帯の魅力は、数 G ビット/秒を越えるような高いデータ伝送速度が得られることにある。これは現在広く使われている 10GHz 以下の周波数帯域に比べて、はるかに高速な無線通信が実現できることを意味している。

このような背景の下、60GHz 帯を使った無線通信機器の重要な構成要素として、小型軽量低コストで高性能なミリ波広帯域フィルタが強く求められている。しかし、ミリ波帯では導体の表皮効果および誘電体基板による伝送損失の増加で低損失なフィルタの実現が困難である。これまでに報告された代表的なミリ波フィルタとして、金属導波管を利用したフィルタ、誘電体基板上に構成した平面フィルタ、SIW(Substrate-Integrated-Waveguide)フィルタなどが挙げられる。しかし、60GHz 帯の超高速無線通信モジュールに使用される場合、これら現有のフィルタは構造から設計方法及び性能面まで、多くの問題点を抱えている：(1) 金属導波管フィルタは重くて、体積が大きい、ミリ波回路の他の部分との集積化要求に対応できない等の欠点がある。(2) 平面フィルタは線路の導体損や誘電体損が特に顕著であるため、金属導波管フィルタと比べ、性能が著しく劣化する。損失増の制約で多段化の設計ができないため、急峻な周波数選択性の実現が困難である。(3) SIW フィルタの場合、ミリ波帯では貫通ビアの製作精度が設計と製作の制約となっている。(4) 60GHz 帯で通過域幅 7GHz または数 GHz といった広帯域ミリ波フィルタに関する報告が少なく、新しいフィルタの構造提案と設計手法の開発が必要である。(5) 60GHz 帯ではフィルタは微小な構造となるため、製作精度への要求が厳しく、ローコストで量産することが困難である。こうした状況の中、60GHz 帯のミリ波広帯域フィルタの研究開発が急務となっている。

2. 研究の目的

上述の背景と研究現状を踏まえ、本研究では 60GHz 帯を使った次世代超高速大容量無

線通信システムに必要な不可欠な小型高性能ミリ波広帯域フィルタの研究開発を研究目的とする。具体的に、

- (1) 斬新な構造と機能を持つ有極型マルチモード共振器を提案し、ミリ波広帯域フィルタを構成する。
- (2) 汎用的な共振器並列型フィルタの設計理論を構築し、高精度で効率的な設計手法を確立する。
- (3) 性能と量産性とにも優れたミリ波広帯域フィルタを設計、試作し、60GHz 帯の超高速大容量無線通信の要求仕様を満たすフィルタを実現する。

3. 研究の方法

- (1) 新しい平面有極型マルチモード共振器を提案する。

背景で述べたように、現有のミリ波フィルタの構造と設計手法では、小型低損失、高度な周波数選択性と広帯域特性を同時に実現させるのが極めて困難である。本研究では、1つの平面共振器構造に複数の共振モードと減衰極を併せ持つ有極型マルチモード共振器を提案し、それを用いて、小型ミリ波フィルタを構成し、所望の特性を実現する。

- (2) 有極型マルチモード共振器を用いたミリ波広帯域フィルタの効率的な設計手法を確立する。

上述のマルチモード共振器フィルタは回路的に見れば、共振器を並列に接続した構造となっているため、従来の共振器直結型構造を対象にしたフィルタの設計理論は適用できない。本研究では、我々が提案したマルチモード UWB フィルタの設計理論を利用し、共振器並列型フィルタの設計理論を発展させ、有極型マルチモード共振器を用いたフィルタの設計手法を確立し、ミリ波広帯域フィルタ設計の高効率化を図る。

- (3) 優れた特性を持つミリ波広帯域フィルタを実現する。

提案した平面有極型マルチモード共振器を利用し、回路及び電磁界シミュレータを併用し、共振器及び励振構造を含めたフィルタ各部分の寸法を決定し、小型軽量、低損失、高度な周波数選択性及び広い通過域と言った優れた特性を持つ 60GHz 帯の広帯域帯域通過フィルタ(BPF)を実現する。

4. 研究成果

- (1) まず、マイクロストリップデュアルモードリング共振器と半波長共振器を併用した小型広帯域 BPF を提案し、その設計を行った。リング共振器は高 Q 低損失等の特徴を持ち、低損失が厳しく要求される高い周波数帯で

は特に利点がある。また、低い周波数帯では1/4波長共振器や半波長共振器等と比べ、サイズが大きくなってしまいが、ミリ波帯では逆に製作しやすい利点になる。しかし、従来、パラレル結合方形デュアルモードリング共振器は広い通過域と急峻な減衰特性を持つものの、阻止域と減衰量が不十分という欠点がある。一方、半波長共振器は減衰特性が緩やかであるものの、広い阻止域を持つ。そこで、本研究では、デュアルモードリング共振器とパラレル結合給電線の間に折り曲げた半波長共振器を組み込んだ構造を提案し、回路の小型化を図り、同時に広い阻止域を達成させる。提案したフィルタの伝送線路等価回路に基づき、偶-奇モード解析を行い、フィルタ設計のための重要な公式、すなわち、通過域内にある反射ゼロ点周波数、阻止域内に発生する減衰極周波数および3dB通過域幅に関する計算公式を導出した。導出した計算公式を用いて、回路のパラメータに対するフィルタの特性変化および設計図を得た。25GHzの準ミリ波で3dB比帯域幅約20%のBPF、および60GHzのミリ波で3dB比帯域幅約10%のBPFをそれぞれ設計し、広い通過域、急峻な減衰特性および広い阻止域を実現した。また、25GHz帯のBPFを試作測定し、設計値と良好に一致した周波数特性測定結果を得た。

(2) 微細な結合構造がなく製作しやすい特徴のあるマイクロストリップ終端短絡スタブを用いた広帯域BPFの汎用的な設計理論を提案した。短絡スタブを用いたBPFは、短絡スタブの数および配置方法が変化した場合でも、同様な等リプルチェビシェフ特性を実現できることを回路解析から明らかにした。また、最適化計算による設計方法を開発し、最適化設計の条件を変えることにより、フィルタ回路のパターンや設計値を柔軟に選択できることを示した。さらに、マイクロストリップ線路を用いた広帯域BPFを設計、試作、測定し、提案した設計理論と手法の有効性を実証した。

(3) マイクロストリップ短絡スタブを用いた広帯域BPFの小型設計と阻止域特性の改善を行った。さらに、短絡スタブとStepped Impedance開放スタブを併用した有極形広帯域BPFの構造と設計手法を提案し、設計例として、比帯域幅40%のBPFを設計・試作・測定した結果、所望の広い通過域、低損失、複数の伝送零点による急峻な減衰特性および広い阻止域等の優れた特性を実現した。

(4) 共振器並列結合型帯域通過フィルタを設計するためのパラメータ抽出法を提案し、設計例と測定結果で実証した。

(5) マイクロストリップ低域通過フィルタ(LPF)と高域通過フィルタ(HPF)の組み合わせによる広帯域BPFの設計方法を提案し、設計例と測定結果で実証した。

(6) 広帯域BPFの阻止域特性を改善するための小型LPFの構造および設計手法を提案した。マイクロストリップ結合線路を用いた小型LPFおよびスタブ付結合線路を用いた小型LPFの伝送線路等価回路を解析し、設計公式を導出した。導出した設計公式を用いて、マイクロストリップ結合線路を用いたLPFおよびスタブ付結合線路LPFを設計・試作・測定し、導出式と設計手法の有効性を確認した。また、LPFの多段化設計により、阻止域を大幅に拡張できることを設計および測定結果で実証した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

- ① 濱野 竜飛, 馬 哲旺, 大平 昌敬, “短絡スタブを用いた超広帯域帯域通過フィルタの小型設計と阻止域特性の改善,” 電子情報通信学会論文誌C, vol.J99-C, no.12, Dec. 2016. (条件付き採録)
- ② Masataka Ohira and Zhewang Ma, “A Compact Three-Mode H-Shaped Resonator Bandpass Filter Having High Passband Selectivity with Four Transmission Zeros and Wide Stopband Characteristics,” IEICE Trans. Electron., Vol.E 97-C, No.10, pp. 957-964, Oct. 2014.

[学会発表] (計 17 件)

- ① 濱野 竜飛, 馬 哲旺, 大平 昌敬, 陳 春平, 穴田 哲夫, “開放および短絡スタブを併用した有極形広帯域帯域通過フィルタの設計,” 2016年電子情報通信学会総合大会講演論文集, エレクトロニクス, C-2-61, p.90, 2016年3月16日, 九州大学伊都キャンパス(福岡県福岡市)。
- ② 艾 敏杰, 馬 哲旺, 大平 昌敬, 陳 春平, 穴田 哲夫, “小型準ミリ波・ミリ波マイクロストリップ広帯域帯域通過フィルタの設計,” 信学技報, vol.115, no.391, MW2015-160, pp.7-12, 2016年1月14日, 機械振興会館(東京都港区)。
- ③ 濱野 竜飛, 馬 哲旺, 大平 昌敬, 陳 春平, 穴田 哲夫, “短絡スタブを用いた有極形広帯域帯域通過フィルタの設計,” 信学技報, vol.115, no.372, MW2015-141, pp.47-52, 2015年12月17日, 東京理科大学葛飾キャンパス(東京都葛飾区)。
- ④ 別府 耕平, 馬 哲旺, 大平 昌敬, “マイクロストリップ結合線路を用いた小型低域通過フィルタの設計,” 信学技報, vol.115, no.372, MW2015-140, pp.41-46, 2015年12月17日, 東京理科大学葛飾キャンパス(東京都葛飾区)。
- ⑤ 別府 耕平, 馬 哲旺, 大平 昌敬, “マイクロストリップ結合線路を用いた小型帯域阻止フィルタと低域通過フィルタの設

- 計," 2015年電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集, エレクトロニクス, C-2-38, p.58, 2015年9月10日, 東北大学川内北キャンパス(宮城県仙台市)。
- ⑥ 濱野 竜飛, 馬 哲旺, 大平 昌敬, 陳 春平, 穴田 哲夫, "短絡スタブを用いた小型 UWB 帯域通過フィルタの設計と周波数特性の改善," 2015年電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集, エレクトロニクス, C-2-37, p.57, 2015年9月10日, 東北大学川内北キャンパス(宮城県仙台市)。
- ⑦ 濱野 竜飛, 馬 哲旺, 大平 昌敬, 陳 春平, 穴田 哲夫, "短絡スタブを用いた超広帯域帯域通過フィルタの小型設計と阻止域特性の改善," 電子情報通信学会信学技報, Vol.115, No.115, MW2015-39, pp. 7-12, 2015年6月25日, 川崎市産業振興財団(神奈川県川崎市)。
- ⑧ 馬 哲旺, 鶴見純一, 大平 昌敬, "マイクロストリップ結合線路へアピン形共振器を用いた LPF の設計と実験検証," 2015年電子情報通信学会総合大会講演論文集, エレクトロニクス, C-2-58, p.78, 2015年3月11日, 立命館大学びわこ・くさつキャンパス(滋賀県草津市)。
- ⑨ 濱野 竜飛, 馬 哲旺, 大平 昌敬, 陳 春平, 穴田 哲夫, "終端短絡スタブを用いた広帯域通過フィルタの設計に関する研究," 電子情報通信学会信学技報, Vol.114, No.376, MW2014-171, pp. 125-131, 2014年12月19日, 青山学院大学青山キャンパス(東京都渋谷区)。
- ⑩ 兎原 直也, 馬 哲旺, 大平 昌敬, 陳 春平, 穴田 哲夫, "マイクロストリップステップインピーダンススタブ共振器を用いたデュアルバンド帯域通過フィルタの設計," 電子情報通信学会信学技報, Vol.114, No.376, MW2014-160, pp. 65-70, 2014年12月18日, 青山学院大学青山キャンパス(東京都渋谷区)。
- ⑪ Junichi Tsurumi, Zhewang Ma, and Masataka Ohira, "Microstrip Lowpass Filters with Improved Frequency Responses Using Coupled-Line Hairpin Resonators," Proc. of Asia-Pacific Microwave Conference 2014, FR3F-6, pp.1154-1156, Nov. 7, 2014, Sendai, Japan.
- ⑫ 馬 哲旺, 嶋原 佑貴, 大平 昌敬, "マイクロストリップスタブ付マルチモード共振器を用いた広帯域通過フィルタの設計," 2014年電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集, エレクトロニクス, C-2-60, p. 83, 2014年9月24日, 徳島大学常三島キャンパス(徳島県徳島市)。
- ⑬ Zhewang Ma, Yuanyuan Wang, Masataka Ohira, Chun-Ping Chen, and Tetsuo Anada, "Design of a Quasi-Millimeter-Wave UWB Bandpass Filter Using Microstrip Dual-Mode Ring Resonator and

Half-Wavelength Resonators," XXXIth URSI General Assembly and Scientific Symposium, CD01-2, Aug. 18, 2014, Beijing, China.

- ⑭ 鶴見 純一, 渡部 尚人, 馬 哲旺, 大平 昌敬, "マイクロストリップ結合線路構造を用いたハイパスフィルタの設計," 電子情報通信学会信学技報, Vol.114, No.111, MW2014-46, pp. 23-28, 2014年6月26日, 豊橋技術科学大学(愛知県豊橋市)。
- ⑮ 鶴見 純一, 馬 哲旺, 大平 昌敬, "マイクロストリップ結合線路構造を用いた低域通過フィルタの設計," 電子情報通信学会信学技報, Vol.113, No.365, MW2013-151, pp. 1-6, 2013年12月19日, 埼玉大学(埼玉県さいたま市)。
- ⑯ 秋元 亮祐, 馬 哲旺, 大平 昌敬, 陳 春平, 穴田 哲夫, "マイクロストリップ低域通過フィルタと高域通過フィルタの組み合わせによる広帯域 BPF の設計," 2013年電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集, エレクトロニクス, C-2-59, p. 84, 2013年9月19日, 福岡工業大学(福岡県福岡市)。
- ⑰ 鶴見 純一, 馬 哲旺, 大平 昌敬, 小林 禰夫, "マイクロストリップ結合線路へアピン形共振器を用いた低域通過フィルタの設計と測定評価," 2013年電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集, エレクトロニクス, C-15-11, p. 274, 2013年9月18日, 福岡工業大学(福岡県福岡市)。

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

○取得状況 (計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
取得年月日:
国内外の別:

[その他]

ホームページ等

<http://sirius.reso.ees.saitama-u.ac.jp>

6. 研究組織

(1)研究代表者

馬 哲旺 (MA, Zhewang)

埼玉大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号：4 0 2 8 2 9 0 9

(2)研究分担者

(3)連携研究者

小林 禧夫 (KOBAYASHI, Yoshio)

埼玉大学・大学院理工学研究科・名誉教授

研究者番号：0 0 0 0 8 8 3 0

大平 昌敬 (OHIRA, Masataka)

埼玉大学・大学院理工学研究科・准教授

研究者番号：6 0 4 6 3 7 0 9