

令和元年6月12日現在

機関番号：12401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K18101

研究課題名(和文) ミリ波帯超高速ワイヤレス通信用オンチップ型広帯域フィルタリングアンテナの研究開発

研究課題名(英文) Research and Development on On-chip Wideband Filtering Antennas for Millimeter-wave-band High-speed Wireless Communication

研究代表者

大平 昌敬 (Masataka, Ohira)

埼玉大学・理工学研究科・准教授

研究者番号：60463709

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、広帯域アンテナの設計に広帯域バンドパスフィルタの回路合成理論を導入することによって、アンテナとバンドパスフィルタを一体設計する広帯域フィルタリングアンテナ(フィルテナ)の効率的な設計法を初めて確立した。さらに、設計例として比帯域幅20%を有するマイクロストリップフィルテナを設計開発し、その試作及び測定によって設計通りの広帯域特性が達成できたことから提案法の有効性を実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

高速ワイヤレス通信では広帯域なアンテナが必要である。平面アンテナは製造性に優れるが、その比帯域幅は数%以下で狭帯域特性が最大の課題である。また、広帯域設計は技術者の経験と勘によるところが大きく、膨大な設計時間を要していた。本研究成果はその問題を解決する手段を提供しており、今後の利用が見込まれる準ミリ波帯・ミリ波帯の広帯域アンテナ設計技術の進展に大きく寄与するものである。

研究成果の概要(英文)：In this research, an effective design method of wideband filtering antenna (filtenna) has been established for the first time by the introduction of wideband filter synthesis theory to a wideband antenna design, enabling a co-design of wideband filter and antenna. Furthermore, a microstrip filtenna having a fractional bandwidth 20% has been designed and tested. It can be confirmed that a specified wideband characteristic is achieved by the fabricated filtenna, which proves the effectiveness of the proposed design method.

研究分野：マイクロ波工学

キーワード：アンテナ フィルタ フィルタリングアンテナ ミリ波 マイクロ波

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

最近のモバイルブロードバンドへの急激なシフトによってトラフィックが急増し、低マイクロ波帯での周波数資源の枯渇が叫ばれている。そのため、広帯域なミリ波帯や準ミリ波帯は近い将来の無線周波数として有望視され、各種回路の研究開発が世界的に益々活発化している。その中核をなすデバイスの一つが広帯域アンテナである。

ミリ波帯以上でのアンテナの代表格は、誘電体基板内に設けた導波管（誘電体基板集積導波路）を用いたスロットアレーアンテナである。本アンテナは低損失で高い利得が得られるが、一般にスロットアンテナは狭帯域である上、ミリ波集積回路との接続には変換器が必要である。一方、マイクロストリップアンテナは平面構造で形状も簡単であり、ミリ波集積回路との接続性も良い。ところが、その比帯域幅も数%以下で、狭帯域特性が最大の課題である。アンテナ形状の工夫などで改善が試みられてきたが、波長が数 mm 以下となるミリ波帯以上では形状の複雑化は製作上、歩留まりの劣化を招く。さらに、広帯域設計は技術者の経験と勘によるところが未だ大きく、膨大な解析時間を要している。

それに対して、近年、アンテナとは別のコンポーネントである帯域通過フィルタ（BPF：Bandpass Filter）とアンテナを一体化したフィルタリングアンテナ（フィルテナ）と呼ばれる新しいデバイスが注目されている。フィルテナはアンテナと BPF を単に線路で接続したのではなく、BPF の最終段の共振器をアンテナに置き換えて BPF 設計に完全に繰り込むことによって、設計理論に基づき所定の帯域幅を有するアンテナ設計を可能にしている。しかし、狭帯域 BPF 設計理論を基にしているため、ミリ波帯に必要な広帯域特性の理論設計は全く検討されていない。

以上の研究動向を鑑みると、ミリ波帯で製作が容易なマイクロストリップ構造で、比帯域幅 15% 以上の広帯域特性を有するアンテナを設計するための理論ならびに汎用的設計手法は構築されていない。そのため、広帯域フィルテナの設計法の確立とその実現が望まれていた。

2. 研究の目的

研究代表者らはこれまでアンテナで用いられる共振器とフィルタで用いられる共振器の振舞いの類似点・相違点に着目し、狭帯域フィルテナへの研究に取り組んできた。従来技術では評価が困難であった、アンテナ-共振器間の結合係数を直接評価する手法を初めて提案し、それを応用した狭帯域フィルテナ設計法を確立してきた。本研究では、フィルタの研究開発で培った技術を発展させて広帯域フィルテナの設計法を開発し、ミリ波帯広帯域平面フィルテナを設計する。

そこで本研究の目的は、(a) 広帯域アンテナ設計に広帯域フィルタ回路合成理論を導入し、広帯域設計が可能なフィルテナ設計法を確立することで、(b) マイクロストリップアンテナの簡単形状を維持したまま、(c) ミリ波帯をカバーするのに必要な比帯域幅 15% 以上を有する平面フィルテナを設計開発することである。

3. 研究の方法

前述の研究の現状を踏まえ、本研究では以下の方法で研究を遂行した。

(1) 広帯域回路合成法の開発

従来の狭帯域フィルタの回路合成法がフィルテナに適用できるのは、放射 Q 値が 20 以上のアンテナに限られていた。その理由は、その回路合成理論には狭帯域近似が用いられているためである。本研究では、比帯域幅 15% 以上を達成するのに必要な放射 Q 値 10 以下のアンテナに対して適用できる広帯域回路合成法（所望の伝達関数を実現する最適化アルゴリズム）を構築し、効率的にフィルテナの回路パラメータ（線路の特性インピーダンス等）を求める手法を示す。これによって、様々な回路や周波数帯にも適用可能な汎用性のある回路合成法を確立し、設計仕様から寸法設計までの一連の設計法を提供する。

(2) 広帯域フィルテナの構造の提案

回路合成法から要求される放射 Q 値を得るためには、パッチアンテナの場合、その背面のグラウンドに開口を設けたりするなどしてアンテナの放射 Q 値を下げる方法がある。しかし、その方法では背面放射が生じ、放射パターンの FB (Front-to-Back) 比が劣化する問題があった。本研究では、共振器部の回路とアンテナ部で二つの基板に分けた積層構造を用いることで、回路合成法から要求される放射 Q 値を満たしつつ、パッチアンテナの正面方向にのみ放射する単方向性の広帯域フィルテナの構造を提案する。

(3) 広帯域フィルテナの設計、試作、測定

以上の提案構造及び提案設計法の有効性を検証するために、設計例として、中心周波数 4 GHz、比帯域幅 20% の広帯域 5 段フィルテナの設計を行うとともに、設計したフィルテナの試作・測定を行う。実験では、リターンロスの周波数特性、利得最大値の周波数特性、ならびに放射パターンの測定を行う。これによって本研究の目標とする比帯域幅 15% 以上が達成できることを実証する。また、準ミリ波帯においても比帯域幅 20% の広帯域 5 段フィルテナを設計し、波長が短いミリ波帯における設計精度の確認を行い、電磁界シミュレーションによって設計上の問題を洗い出す。

4. 研究成果

(1) 広帯域フィルテナの提案構造

提案するフィルテナの構造について説明する。提案する広帯域 N 段フィルテナは、広帯域回路合成法で設計可能な広帯域 BPF の構造を基にしている。図 1 にその提案構造を示す。本フィルテナは二枚の誘電体基板により構成される積層構造である。基板 1 にはアンテナ部が装荷され、基板 2 には共振器部が装荷されている。そしてアンテナ部と共振器部は導体ピンで接続している。また、共振器部の基板のグラウンド側にアンテナ部の基板を配置することで背面放射を抑制できる。さらに、両基板間の間隔 h を調整することでアンテナからの放射を制御することができるため、所望の放射 Q 値を得ることが可能である。そして、基板 1 の共振器部には 4 分の 1 波長の短絡スタブと 4 分の 1 波長の接続線路が交互に接続された構造となっている。その構造パラメータは短絡スタブのスタブ長 l_{si} 、スタブ幅 w_{si} ($i=1, 2, \dots, N$) 及び接続線路の線路長 l_i 、線路幅 w_i ($i=1, 2, \dots, N$) である。また、基板 2 のアンテナ部にはパッチアンテナを設けており、その基板の背面に導体はなく基板 1 とグラウンドを共有している。次に、提案する広帯域フィルテナの設計法について述べる。

(2) 広帯域フィルテナの設計法

① 広帯域フィルテナの等価回路と回路合成

まず、図 2(a) に示す広帯域 N 段 BPF の等価回路について述べる。図中の回路パラメータ $Z_{s1}, Z_{s2}, \dots, Z_{sN}$ 及び Z_1, Z_2, \dots, Z_{N-1} はそれぞれ短絡スタブ及び接続線路の特性インピーダンスを表している。また、 θ は電気長であり、中心周波数 f_0 において $\theta = \pi/2$ である。次に、広帯域フィルテナの設計仕様を与え、広帯域 BPF の回路合成法に則り、図 2(a) に示す広帯域 BPF の等価回路の回路パラメータ (Z_{si}, Z_i) を算出する。その際、通過域の周波数範囲において、フィルタの特性関数から得られる透過係数と、理想特性関数から得られる透過係数との差が最小となるように最適化手法を用いて回路パラメータを決定する。

そして、図 2(b) に示す広帯域 N 段フィルテナの等価回路は、図 2(a) に示す最終段の短絡スタブをインダクタンス L_N 、キャパシタンス C_N の LC 並列共振回路に変換することで得られる。従って、アンテナ部の放射 Q 値 Q_r はこの LCR 並列共振回路の無負荷 Q 値と一致するように設計すればよい。この放射 Q 値 Q_r の値は、 C_N と負荷抵抗 R を用いて $Q_r = \omega_0 C_N R$ で算出することができる。ただし、 ω_0 は通過域の中心角周波数である。以上により、本フィルテナの全ての回路パラメータが算出される。

② 構造パラメータの設計手順

先に算出した回路パラメータを基に、本フィルテナの構造パラメータを電磁界シミュレーションにより決定する。まず、最終段のアンテナのみの構造でパッチアンテナの一辺の長さ a と基板間隔 h を設計する。具体的には中心周波数 f_0 で共振し、かつ所望の放射 Q 値 Q_r が得られ

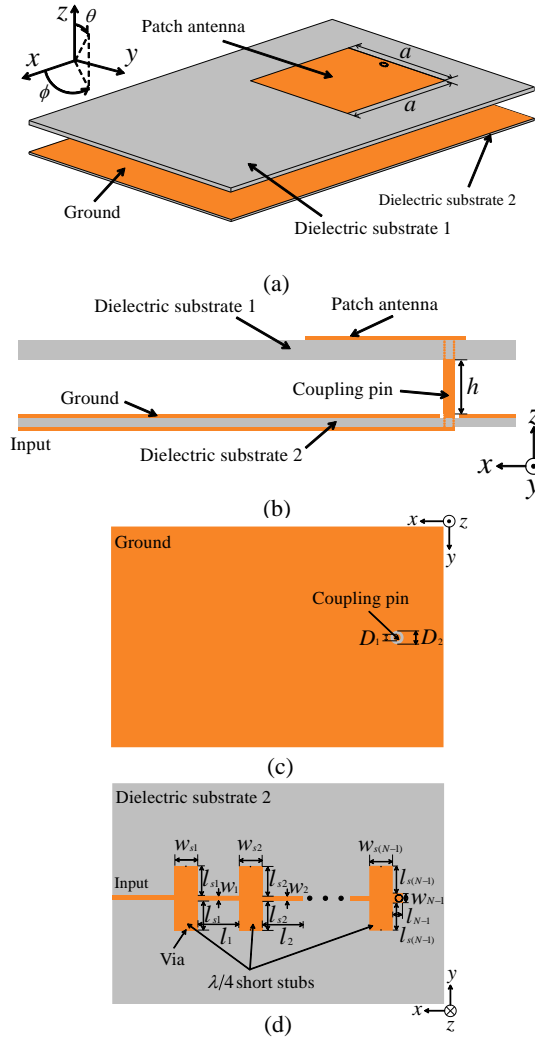


図 1 提案する広帯域フィルタリングアンテナの構造 (a) 全体構造, (b) 横断面, (c) グラウンド面, (d) 共振器面

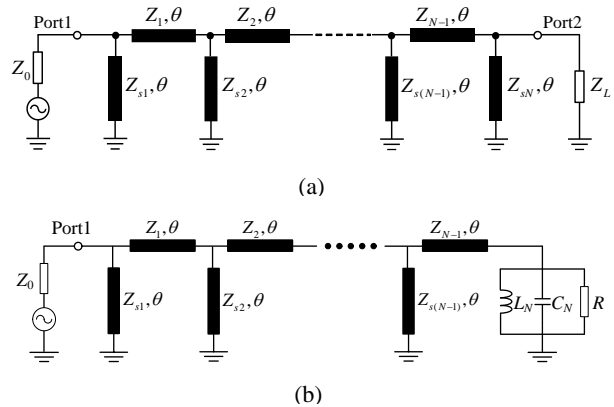


図 2 提案する構造の等価回路 (a) 広帯域 N 段 BPF フィルタの等価回路, (b) 広帯域 N 段フィルタリングアンテナの等価回路

るように a と h を決定する。

続いて、短絡スタブのみの構造を先に設計する。回路シミュレーションによる理想特性と電磁界シミュレーションの反射特性が一致するように短絡スタブ長 l_{st} と幅 w_{st} を設計する。同様の方法で接続線路の線路長 l_i と幅 w_i を設計する。

最後に、アンテナとその前段の短絡スタブの間の接続線路を設計する。このとき、アンテナと短絡スタブは上述した方法によりあらかじめ設計しておく。回路シミュレーションによる理想特性と電磁界シミュレーションによる反射特性が一致するように、アンテナと短絡スタブ間の接続線路の長さ l_{N-1} と幅 w_{N-1} 及び導体ピンの直径 D_1 を決定する。そして、全体構造において所望の特性が得られるように構造の微調整を行えば設計完了である。

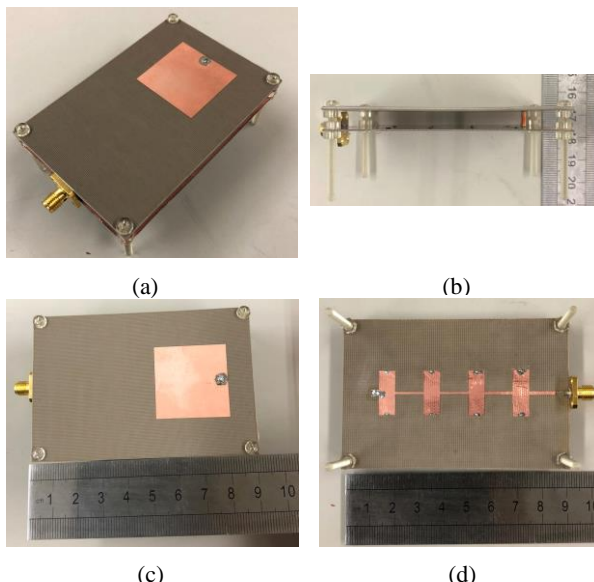


図 3 設計したフィルタリングアンテナの構造 (a) 全体構造, (b) 横断面, (c) アンテナ面, (d) 共振器面

(3) 広帯域フィルタの設計例

① マイクロ波帯での設計・試作・測定

以上の設計方法を用いて広帯域フィルタの設計を行った。設計例として以下の設計仕様を与えた。

- ・中心周波数： $f_0=4.0$ GHz
- ・比帯域：FBW=20 %
- ・共振器段数： $N=5$
- ・帯域内最小反射損失：RL=15 dB
- ・伝達関数：チェビシェフ特性

これらの設計仕様から図 2(b)の等価回路の特性インピーダンスの値を求め、次に比誘電率 $\epsilon_{r1}=2.58$, 厚さ $t=1.00$ mm の誘電体基板(基板 1)、比誘電率 $\epsilon_{r2}=2.90$, 厚さ $t=0.50$ mm の誘電体基板(基板 2)にそれぞれアンテナと共振器を設計した。

設計したフィルタリングアンテナの構造パラメータを基に試作した広帯域フィルタの写真を図 3 に示す。その測定結果と電磁界シミュレーション結果の周波数特性の比較を図 4 に示す。電磁界シミュレーションでは誘電体基板の誘電体損(基板 1 の誘電正接 $\tan\delta=1.4\times 10^{-3}$, 基板 2 の誘電正接 $\tan\delta=2.0\times 10^{-3}$)、導体損(導電率 $\sigma=5.8\times 10^7$ (S/m)) を考慮している。測定結果と電磁界シミュレーション結果を比較すると、中心周波数が低域側にややシフトしているものの比帯域幅は 19.8 %、帯域内利得は 6.51 ± 1.13 dBi が得られた。また、阻止域も中心周波数 4 GHz の利得 7.42 dBi に対して 30 dB 以上の高減衰量が得られ、優れた周波数選択性を実現した。図 5 に中心周波数 4 GHz における放射パターンを示す。同図より、単向性の放射パターンが得られ、測定結果は電磁界シミュレーション結果と良好に一致していることがわかる。以上により、提案構造の有効性を実験的に示せた。

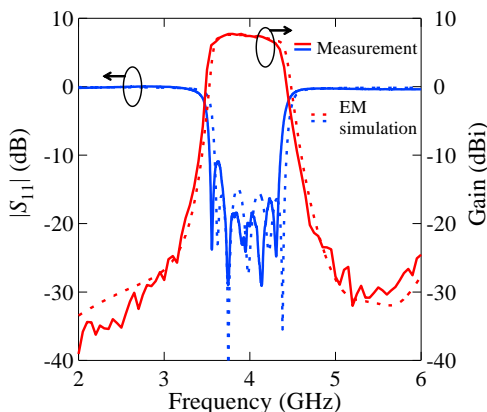


図 4 試作したアンテナの周波数特性

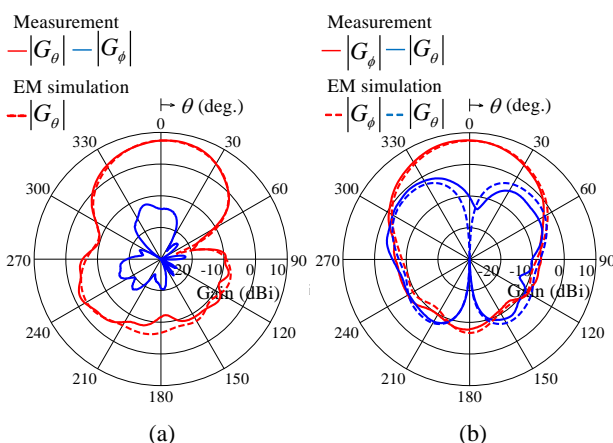


図 5 4.0 GHz における放射パターン (a) E 面, (b) H 面

② 準ミリ波帯での設計及びチューナブルフィルタへの応用

同一の設計法を用いて、準ミリ波帯(28 GHz 帯)において広帯域フィルタの設計を行った。ただし、構造の簡単化のため、同一平面内でアンテナと共振器を配置する構成とした。上記の設計例と同様に、中心周波数 26.3 GHz、比帯域幅 20 %、帯域内最小反射損失 15 dB、共振器段数 $N=5$ 、伝達関数をチェビシェフ関数として設計仕様を与えて広帯域フィルタの回路合成ならびに構造パラメータの設計を行った。紙面の都合上、設計したフィルタの電磁界シミュレーション結

果は割愛するが、比帯域幅 20 % で良好なインピーダンス整合を実現できることを確認した。これによって、本フィルテナの設計法がマイクロ波帯・ミリ波帯において適用可能な汎用的手法であるとともに、アンテナの広帯域設計において有効な手法であることを証明することができた。さらには、可変容量ダイオードを装荷して、通過域の帯域幅を一定に保ったまま、動作周波数を変えることのできるチューナブルフィルテナも開発した。以上の成果は、今後の利用が見込まれる準ミリ波帯・ミリ波帯の広帯域アンテナの進展に大きく寄与すると考える。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 10 件)

- ① M. Ohira, S. Hashimoto, Z. Ma, and X. Wang, “Coupling-matrix-based systematic design of single-DC-bias-controlled microstrip higher order tunable bandpass filters with constant absolute bandwidth and transmission zeros,” *IEEE Trans. on Microwave Theory and Tech.*, vol.67, no.1, pp.118-128, Jan. 2019. (査読有り)
DOI: 10.1109/TMTT.2018.2873366
- ② M. Ohira, K. Yamanaka, and Z. Ma, “A new design formula of coupling coefficient between antenna and resonator for efficient design of filtering antenna,” *IEICE Trans. Electron.*, vol.E99-C, no.7, pp.744-750, Jul. 2016. (査読有り)
DOI: 10.1587/transele.E99.C.744

〔学会発表〕 (計 37 件)

- ① 鈴木悠介, 馬 哲旺, 大平昌敬, “スタック構造による広帯域マイクロストリップフィルタリングアンテナの特性改善,” 平成 30 年度電子情報通信学会東京支部学生会研究発表会, p.98, Mar. 2019.
- ② 相馬朝康, 大平昌敬, 馬 哲旺, “絶対帯域幅一定のマイクロストリップチューナブルフィルタリングアンテナの設計,” 電子情報通信学会技術報告, vol.118, no.403, MW2018-154, pp.97-102, Jan. 2019.
- ③ 相馬朝康, 大平昌敬, 馬 哲旺, “絶対帯域幅一定のマイクロストリップチューナブルフィルタリングアンテナ,” 電子情報通信学会総合大会, C-2-60, p.79, Mar. 2019.
- ④ M. Ohira, K. Sato, and Z. Ma, “Design of microstrip wideband filtering antenna using network synthesis theory of wideband Chebyshev filter,” *Proceedings of 2018 Thailand-Japan MicroWave (TJMW2018)*, Bangkok, Thailand, June 2018.
- ⑤ 佐藤和洋, 大平昌敬, 馬 哲旺, 王 小龍, “短絡スタブを利用した広帯域 5 段マイクロストリップフィルタリングアンテナ,” 電子情報通信学会総合大会, C-2-80, p.94, Mar. 2018.
- ⑥ 佐藤和洋, 大平昌敬, 馬 哲旺, 王 小龍, “短絡スタブ構造を用いた広帯域マイクロストリップフィルタリングアンテナの設計,” 電子情報通信学会技術報告, vol.117, no.366, MW2017-150, pp.47-52, Dec. 2017.
- ⑦ 大平昌敬, “[チュートリアル講演] フィルタリングアンテナの設計法,” 電子情報通信学会技術報告, vol.117, no.215, AP2017-93, pp.31-36, Sep. 2017.
- ⑧ M. Ohira, T. Miyazaki, Z. Ma, and X. Wang, “Coupling-matrix based design of microstrip filtering antenna with cross coupling between antenna and resonator,” *Proceedings of 2017 Thailand-Japan MicroWave (TJMW2017)*, Bangkok, Thailand, June 2017.
- ⑨ 宮崎寿基, 大平昌敬, 馬 哲旺, 王 小龍, “アンテナ-共振器間の飛越結合による有極形 4 段平面フィルタリングアンテナ,” 電子情報通信学会総合大会, C-2-36, p.49, Mar. 2017.
- ⑩ 宮崎寿基, 大平昌敬, 馬 哲旺, 王 小龍, “アンテナ-共振器間の飛越結合を用いた有極形フィルタリングアンテナの設計,” 電子情報通信学会技術報告, vol.116, no.432, MW2016-180, pp.41-46, Jan. 2017.
- ⑪ K. Sato, M. Ohira, and Z. Ma, “Design of multistage microstrip filtering antenna by using parameter extraction method,” *Proceedings of 2016 Thailand-Japan MicroWave (TJMW2016)*, Bangkok, Thailand, June 2016.

〔その他〕

研究室ホームページ : <http://sirius.reso.ees.saitama-u.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究協力者

研究協力者氏名 : 馬 哲旺

ローマ字氏名 : MA, Zhewang

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。