

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年6月12日現在

機関番号：12401

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010～2012

課題番号：22560320

研究課題名（和文）高速大容量無線通信システム用超広帯域（UWB）マイクロ波フィルタの研究開発

研究課題名（英文）Development of Ultra-Wideband (UWB) Bandpass Filters for High Speed Wireless Communication Systems

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：40282909

研究成果の概要（和文）：

マイクロストリップマルチモード共振器、スタブを装荷したマイクロストリップ共振器、リング共振器、およびパラレル結合伝送線路共振器を用いた超広帯域（UWB）帯域通過フィルタの設計理論と方法を提案、開発した。複数の小形低損失な UWB 帯域通過フィルタを設計、試作、測定評価し、広い通過域、急峻なスカート特性、広い阻止域および大きな減衰量を併せ持つフィルタ特性を得たことにより、米国連邦通信委員会または日本の UWB スペクトルマスクを達成できたフィルタを実現した。

研究成果の概要（英文）：

In this study, the synthesis theory and design method of ultra-wideband (UWB) bandpass filters (BPFs) using microstrip multi-mode resonators, stub-loaded resonators, ring resonators, and parallel-coupled transmission line resonators are developed. A number of compact and low-loss UWB BPFs are designed, fabricated, and measured. These filters show wide passband, sharp skirt property, wide stopband with large attenuations, and meet well the UWB spectrum mask issued by the Federal Communications Commission of USA or by the Japanese government.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2011年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2012年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学、電子デバイス・電子機器

キーワード：無線通信、マイクロ波、超広帯域フィルタ、マイクロストリップ共振器

1. 研究開始当初の背景

超広帯域（UWB）無線通信は、米国連邦通信委員会（FCC）の定義によれば、比帯域幅が中心周波数の20%以上、または500MHz以上という極めて広い帯域幅を利用して送受信を行う高速大容量無線通信方式である。

高精度位置測定やレーダーの機能も併せ持つ。使用する周波数帯域はマイクロ波帯では3.1GHz～10.6GHzである。送信されるデータはノイズ程度の強さしかないので、消費電力も少ない。元々アメリカで軍事技術として開発されたが、2002年2月にFCCが民生への

利用を認可したことをきっかけに、世界的な注目を集め、各国の企業や大学といった研究機関でいろいろと研究されている。

UWB 通信は数 GHz におよぶ非常に広い帯域を利用するため、従来の無線システムや第 4 世代携帯電話及び WiMAX 等との帯域競合が予想され、他の通信方式との干渉回避技術の搭載が義務付けられている。UWB フィルタはこういった干渉回避を実現するための中核的なデバイスとして盛んに研究され、世界各国から多くの報告がなされている。代表的なものとして、アメリカの学者とシンガポールの研究グループはそれぞれマイクロストリップ方形リング共振器とマルチモード共振器を用い、約 60% と 100% の帯域幅を持つ広帯域フィルタを実現した。イギリスの研究者は UWB フィルタ帯域外の特性改善に関する報告をした。一方、国内では、多くの大学や企業および研究機関は、様々な構造を使用した UWB フィルタを提案・開発し、100% も超える帯域幅の実現に成功を収めた。

しかし、これまでに報告された UWB フィルタの設計や特性には、多くの問題点が残されている。(1) 報告された UWB フィルタは主に研究者の経験や電磁界シミュレータによる試行錯誤で設計したもので、設計の指針や体系的な理論と方法ができていない；(2) ほとんどのフィルタは通過域および阻止域の特性が共に FCC の規定を達成することができていない；(3) 多くのフィルタには微細な構造を有するため、製作精度への要求が厳しく、安価で量産することが困難である；(4) 日本では従来の携帯電話や無線 LAN および第 4 世代携帯電話、WiMAX 等との帯域競合を避けるために、Low-Band (3.4GHz ~ 4.8GHz) と High-Band (7.25GHz ~ 10.25GHz) での UWB 運用が決定され、極めて急峻で大きな減衰特性を持つ UWB フィルタの開発が要求されている。しかし、関連する研究は不十分で、規定を達成した報告例もまだ非常に少ない。こうした状況の中、UWB フィルタに対する更なる研究開発が強く求められている。

2. 研究の目的

以上の背景と UWB フィルタに関する研究状況を踏まえ、本研究では以下のことを研究目的とする。

- (1) 汎用性のある UWB フィルタ合成理論を構築し、高精度で効率的な設計手法を確立する。
- (2) FCC の規定を満たし、小形で量産性に優れている UWB フィルタを開発する。

- (3) 日本の UWB 規定を満たす UWB フィルタを実現する。

3. 研究の方法

- (1) UWB フィルタの合成理論と設計手法の確立

様々なマイクロストリップ共振器、例えば、マルチモード Stepped-Impedance Resonator (SIR)、短絡または開放スタブを装荷した共振器、パラレル結合伝送線路共振器を用いた UWB フィルタに対し、適切な回路モデル(分布定数等価回路および集中定数等価回路)を構築し、回路解析を行い、実現可能な広帯域フィルタの理想特性関数を導出する。この理想特性関数から、最適化アルゴリズムを利用し、フィルタを構成する各伝送線路や共振器および結合構造の特性パラメータ(電気長、特性インピーダンス等)を決定し、フィルタ各部分の寸法を算出し、UWB フィルタの効率的な設計を完成する。また、リング共振器を用いた UWB フィルタに対し、伝送線路等価回路から偶-奇モード理論を用いて、共振器通過域内の反射ゼロ点周波数、阻止域内における減衰極周波数、および 3dB 通過域幅に関する設計公式を導き、フィルタの設計方法を確立する。

- (2) FCC の規定を満たす UWB フィルタの設計、試作、および測定評価

提案、開発した設計理論と方法を用いて、FCC の UWB スペクトルマスクに基づき、様々な小形の UWB 帯域通過フィルタ (BPF) の設計、試作と測定評価を行う。これまでの文献で多く使われてきたマルチモード SIR を含め、我々が提案した短絡/開放スタブを装荷したマルチモード共振器、およびリング共振器をそれぞれ使用した場合の UWB BPF の構造と特性を比較する。また、適切な励振および結合構造を設計し、フィルタ回路にある最小線幅と空隙を 0.1mm 以上にすることにより、安価で量産の容易な小形 UWB フィルタを開発する。

- (3) 日本の UWB 規定を満たす BPF の設計、試作、および測定評価

日本では Low-Band と High-Band での UWB 運用が決定されている。FCC が規定した UWB スペクトルマスクと比べ、日本の UWB スペクトルマスクでは、より急峻なスカート特性と大きな阻止域減衰量が要求されている。本研究では、複数の減衰極を持つマイクロストリップリング共振器および短絡/開放スタブを装荷したマルチモード共振器に半波長共振器を

組み合わせた多段構造のBPFを設計し、所望の広い通過域、急峻な減衰特性及び大きな阻止域減衰量を持つフィルタ特性を実現し、日本のUWBスペクトルマスクを達成する。

4. 研究成果

これまでに、主に4種類のマイクロストリップ構造を用いたUWB BPFの合成理論と設計手法を開発した。また、複数の小形で低損失なUWB BPFを設計、試作、測定し、FCCまたは日本のUWBスペクトルマスクを満たした特性を実現した。

(1)パラレル結合伝送線路共振器フィルタに対し、回路解析を行った上で、この種のフィルタが実現可能な等リップルチェビシェフ特性をこれまでの設計理論と異なる関数で適切に表現した。その結果、共振器の数 N 個に対して、フィルタの通過域内では $N+2$ 個の反射ゼロ点が得られ、所望の帯域幅と等リップル特性を実現可能にした。5個の共振器を持つUWB BPFを設計例とし、等価回路上とマイクロストリップ線路上で設計したフィルタの特性より、提案した設計理論と手法の有効性を実証した。また、従来の設計法と比較することで、本研究の設計法によるフィルタの特性の改善が非常に顕著であることも明らかにした。設計したフィルタの試作および測定評価を行い、所望の特性を得た。

(2)マイクロストリップパラレル結合線路で給電したデュアルモード方形リング共振器、およびタブ結合マイクロストリップスタブ付きリング共振器に対して、伝送線路等価回路から偶-奇モード理論に基づき、その周波数特性を解析した。共振器通過域内の反射ゼロ点周波数、阻止域内における減衰極周波数、および3dB通過域幅に関する設計公式を導き、この2種類のリング共振器を利用したBPFの設計方法を確立した。回路シミュレータおよび電磁界シミュレータを用いて、導出した設計公式を実証した。設計公式を用いて各種のUWB BPFを設計し、広い通過域と急峻な減衰特性および広い阻止域を持つ小形UWB BPFを実現した。

また、タブ結合マイクロストリップスタブ付きリング共振器の新しい構造を提案し、フィルタの設計のための公式を導出、検証した。提案したリング共振器とマルチモードSIRと組み合わせることにより、中心周波数4.1GHz、3dB比帯域幅約30%のUWB BPFを設計、試作し、日本のLow-band UWBスペクトルマスクを

満たす特性を実現した。

(3)新しい小形マルチモード共振器として、2つの開放スタブを装荷した3モード共振器を提案し、その共振特性を調べた。このスタブ付3モード共振器を用いたBPFを設計し、広帯域通過域および急峻な通過域スカート特性を実現できた。さらに半波長形共振器およびヘアピン形低域通過フィルタと併用することにより、阻止域における大きな減衰量を実現し、日本のLow-Band UWBスペクトルマスクを達成したフィルタ特性を実現した。低損失サファイア基板と高温超伝導YBCO薄膜を用いて、中心周波数4.1GHz、比帯域幅34.1%のUWB BPFを設計、試作、測定評価し、所望の優れたフィルタ特性を得た。

(4)広帯域BPFの新しい設計法として、低域通過フィルタ(LPF)及び高域通過フィルタ(HPF)を組み合わせることにより、通過域を形成するBPFの設計手法を開発した。小形で複数の減衰極を持つマイクロストリップヘアピン形共振器LPF、及びマイクロストリップ伝送線路と結合線路を用いた有極形HPFの解析と設計を行った上で、それらを組み合わせ、中心周波数2GHz、3dB比帯域幅30%、50%および80%の有極形UWB BPFを設計し、所望の通過域、急峻な減衰特性及び中心周波数の3倍以上の広い阻止域が得られ、設計手法の有効性を実証した。

(5)UWB BPFの阻止域特性を改善するために、マイクロストリップ結合線路ヘアピン形共振器の設計公式を導き、小形で急峻な減衰特性を持つLPFの設計手法を確立し、理論予測通りの特性を実現できた。このマイクロストリップ結合線路ヘアピン形共振器を用いたLPFをUWB BPFと組み合わせることにより、広い周波数帯域に渡り、FCCまたは日本のUWBスペクトルマスクを満たした特性を実現させることができた。

(6)マイクロストリップパラレル結合デュアルモードリング共振器及び半波長共振器を組み合わせたフィルタ構造を提案し、偶-奇モード理論でフィルタの設計手法を確立した上で、中心周波数25.5GHz、3dB比帯域幅22%の小形UWB BPFを設計し、FCCが定めた準ミリ波帯のUWBスペクトルマスクを達成した。また、小形多層SIW(Substrate Integrated Waveguide)デュアルモード共振器を利用した準ミリ波帯の広帯域BPFの設計も行った。

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)

[学会発表] (計 28 件)

- ①鶴見 純一, 大平 昌敬, 馬 哲旺, “マイクロストリップ結合線路ヘアピン形共振器を用いた低域通過フィルタの特性改善,” 電子情報通信学会信学技報, Vol.113, No.70, MW2013-22, pp. 71-76, 2013年5月31日, 龍谷大学, 京都.
- ②王 媛媛, 馬 哲旺, 大平 昌敬, 陳 春平, 穴田 哲夫, “デュアルモードリング共振器及び半波長共振器を組み合わせた準ミリ波帯超広帯域通過フィルタの設計,” 電子情報通信学会信学技報, Vol.112, No.459, MW2012-163, pp. 27-32, 2013年3月6日, 広島工業大学, 広島.
- ③秋元 亮祐, 馬 哲旺, 大平 昌敬, 陳 春平, 穴田 哲夫, “小型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を組み合わせた有極形帯域通過フィルタの設計,” 電子情報通信学会信学技報, Vol.112, No.401, EST2012-77, pp. 65-72, 2013年1月24日, 大阪大学, 大阪.
- ④保高 拓哉, 馬 哲旺, 大平 昌敬, 陳 春平, 穴田 哲夫, “タブ結合マイクロストリップスタブ付きリング共振器の解析およびその特性に関する再検討,” 電子情報通信学会信学技報, Vol.112, No.256, EST2012-64, pp. 99-104, 2012年10月26日, 東北学院大学, 仙台.
- ⑤秋元 亮祐, 馬 哲旺, 大平 昌敬, “マイクロストリップ伝送線路および結合線路を組み合わせた高域通過フィルタの設計,” 電子情報通信学会信学技報, Vol.112, No.251, MW2012-88, pp. 41-46, 2012年10月18日, 宇都宮大学, 宇都宮.
- ⑥Zhewang Ma, Masataka Ohira, Chun-Ping Chen, and Tetsuo Anada, ”A Novel Compact High-Performance Microstrip 26GHz Ultra-Wideband (UWB) Bandpass Filter for Vehicle Radar Systems,” Proceedings of IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Millimeter Wave Wireless Technology and Applications, pp. 69-72, Sept. 18-20, 2012, Nanjing, China.
- ⑦杉本 卓也, 馬 哲旺, 大平 昌敬, 小林 禮夫, 陳 春平, 穴田 哲夫, “パラレル結合半波長共振器 BPF の新しい設計法に関する検討,” 2012 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-2-41, p. 82, 2012年3月21日, 岡山大学, 岡山.
- ⑧飛田 和哉, 馬 哲旺, 大平 昌敬, “多層型 SIWデュアルモード共振器を利用した準ミリ波帯域通過フィルタの設計,” 電子情報通信学会信学技報, Vol.111, No.373, MW2011-145, pp. 19-24, 2012年1月11日, 機械振興会館, 東京.
- ⑨Zhewang Ma, Toru Kimura, Masataka Ohira, Chun-Ping Chen, and Tetsuo Anada, “Design of a Broadband Bandpass Filter Using Microstrip Stubs-Loaded Three-Mode Resonators,” 2011 Asia-Pacific Microwave Conference Proceedings, TU4C-01, pp.139-142, Dec. 6, 2011, Melbourne, Australia.
- ⑩齊藤 諒, 馬 哲旺, 大平 昌敬, “マイクロストリップヘアピン形共振器を用いた小型高性能低域通過フィルタの設計,” 電子情報通信学会信学技報, Vol.111, No.250, MW2011-104, pp. 101-106, 2011年10月21日, 電気通信大学, 東京.
- ⑪保高 拓哉, 馬 哲旺, 大平 昌敬, “タブ結合マイクロストリップスタブ付きリング共振器の特性に関する検討,” 電子情報通信学会信学技報, Vol.111, No.250, MW2011-103, pp. 95-100, 2011年10月21日, 電気通信大学, 東京.
- ⑫Masataka Ohira and Zhewang Ma, “Eigen-Mode Analysis of a Novel Three-Mode Microstrip/Slot-Line Resonator and the Development of a Compact Bandpass Filter with Multiple Transmission Zeros and Wide Stopband Property,” 2011 IEEE MTT-S Int. Microwave Sym. Dig., TH3A-3, June 5-10, 2011, Baltimore, USA.
- ⑬齊藤 諒, 候 駿丹, 馬 哲旺, “マイクロストリップヘアピン形共振器の特性解析および小型低域通過フィルタの設計,” 電子情報通信学会信学技報, Vol.111, No. 66, MW2011-29, EST2011-25, pp. 127-132, 2011年5月27日小金井市, 東京.
- ⑭大平 昌敬, 馬 哲旺, “スロット装荷パラレル結合マイクロストリップ線路で構成される新しい3モード共振器の特性解析とフィルタ応用,” 電子情報通信学会信学技報, Vol.111, No. 66, MW2011-30, EST2011-26, pp. 133-138, 2011年5月27日, 小金井市, 東京.
- ⑮飛田 和哉, 馬 哲旺, “準ミリ波帯多層デュアルモードSIWフィルタの設計,” 電子情報通信学会信学技報, Vol.111, No. 66, MW2011-26, EST2011-22, pp. 111-116, 2011年5月27日, 小金井市, 東京.
- ⑯杉本 卓也, 馬 哲旺, 大平 昌敬, 陳 春平, 穴田 哲夫, “パラレル結合伝送線路共振器フィルタの新しい設計方法,” 電子情報通信学会信学技報, Vol.111, No. 66, MW2011-13, EST2011-9, pp. 39-44, 2011年5

月 26 日, 小金井市, 東京.

- ⑰ Zhewang Ma, Masataka Ohira, Takuya Hotaka, Chun-Ping Chen, Tetsuo Anada, and Yoshio Kobayashi, “Characteristics and Design Formulas of a Microstrip Stub-Loaded Multi-Mode Ring Resonator,” Proceedings of 2011 China-Japan Joint Microwave Conference, vol.1, pp. 354-357, April 20-22, 2011, Hangzhou, China.
- ⑱ Masataka Ohira, Zhewang Ma, Masayuki Kato, “Resonant-Mode Behavior of a New Slotline-Embedded Three-Mode Microstrip-Line Resonator and Its Filter Application,” Proceedings of 2011 China-Japan Joint Microwave Conference, vol.1, pp. 326-329, April 20-22, 2011, Hangzhou, China.
- ⑲ 大平 昌敬, 馬 哲旺, “結合マイクロストリップ・スロット線路一体型3モード共振器とそれを用いた複数減衰極帯域通過フィルタ,” 2011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-2-109, p. 147, 2011年3月17日, 東京都市大学, 東京.
- ⑳ 木村 徹, 馬 哲旺, 陳 春平, 穴田 哲夫, 小林 禰夫, “共振器並列結合形等価回路を用いたマイクロストリップスタブ付3モード共振器 UWB 帯域通過フィルタの設計,” 2011 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-2-116, p. 154, 2011 年 3 月 17 日, 東京都市大学, 東京.
- ㉑ 保高 拓哉, 馬 哲旺, 陳 春平, 穴田 哲夫, 小林 禰夫, “マイクロストリップスタブ付きリング共振器の特性および設計公式,” 2011 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-2-103, p. 141, 2011 年 3 月 17 日, 東京都市大学, 東京.
- ㉒ 杉本 卓也, 馬 哲旺, 陳 春平, 穴田 哲夫, 小林 禰夫, “チェビシェフ特性を持つパラレル結合共振器フィルタの新しい設計方法,” 2011 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-2-111, p. 149, 2011 年 3 月 17 日, 東京都市大学, 東京.
- ㉓ 齊藤 諒, 候 駿丹, 馬 哲旺, “マイクロストリップヘアピン形共振器を用いた低域通過フィルタの解析と設計,” 2011 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-2-89, p. 127, 2011 年 3 月 16 日, 東京都市大学, 東京.
- ㉔ 飛田 和哉, 馬 哲旺旺, “準ミリ波帯デュアルモード SIW フィルタの設計,” 2011 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-2-90, p. 128, 2011 年 3 月 16 日, 東京都市大学, 東京.
- ㉕ Zhewang Ma, Hideyuki Sasaki, Chun-Ping Chen, Tetsuo Anada, and Yoshio Kobayashi, “Design of a Wideband Bandpass Filter Using

Microstrip Parallel-Coupled Dual-Mode Ring Resonator,” 2010 Asia-Pacific Microwave Conference Proceedings, WE1B-01, pp. 21-24, Dec. 8, 2010, Yokohama, Japan.

- ㉖ 木村 徹, 馬 哲旺, 陳 春平, 穴田 哲夫, 小林 禰夫, “スタブ付 3 モード共振器および半波長共振器を併用した UWB 帯域通過フィルタの設計,” 2010 年電子情報通信学会エレクトロニクスソサエティ大会講演論文集, CS-4-11, p. S-63, 2010 年 9 月 17 日, 大阪府立大学, 大阪.
- ㉗ Zhewang Ma, Chun-Ping Chen, and Tetsuo Anada, “Microwave and Millimeter-Wave UWB Bandpass Filters Using Microstrip Ring Resonators,” (Invited paper) Proceedings of 2010 International Symposium on Signals, Systems and Electronics (ISSSE2010), Vol.2, pp. 469-472, Sept. 17-20, 2010, Nanjing, China.
- ㉘ 木村 徹, 馬 哲旺, 陳 春平, 穴田 哲夫, 小林 禰夫, “マイクロストリップスタブ付 3 モード共振器を用いた UWB 帯域通過フィルタの設計,” 電子情報通信学会 信学技報, vol.110, MW2010-76, pp. 55-60, 2010 年 9 月 10 日, 東京工業大学, 東京.

[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：40282909

(2) 連携研究者

小林 禰夫 (KOBAYASHI YOSHIO)

埼玉大学・大学院理工学研究科・名誉教授
研究者番号：00008830