

## 科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 5 日現在

機関番号：32702  
 研究種目：若手研究(B)  
 研究期間：2011～2012  
 課題番号：23760317  
 研究課題名（和文）次世代無線システム用マイクロ波・ミリ波超広帯域（UWB）フィルタの理論研究と開発  
 研究課題名（英文）Theoretical Study and Development of UWB Filters for Next Generation Wireless Communication System  
 研究代表者  
 陳 春平（CHUN-PING CHEN）  
 神奈川大学・工学部・助教  
 研究者番号：20440266

## 研究成果の概要（和文）：

UWB 無線システムのパフォーマンスに緊密に関わる重要なデバイスとして超広帯域(UWB)帯域通過フィルタの開発は、脚光を浴びている。本研究では、比帯域幅 110%以上の UWB フィルタの合成理論を構成し、優れた特性を持つ UWB フィルタを実現した。(1) 伝送線路理論に基づいて、UWB フィルタにおける新しい合成手法を提案し、設計用方程式を導出した。(2) 先端短絡/開放スタブと平行結合ステップインピーダンス共振器を組み合わせることにより、FCC の仕様を完全に満たす小型フィルタを設計し、実現した。

## 研究成果の概要（英文）：

Because of the important performance benefits associated with ultra-wideband UWB communication systems, UWB bandpass filters (BPFs) are on the cutting edge of UWB technologies and are of great interest to researchers and engineers in the areas of RF filters and systems. In this study, a novel synthesis technique is proposed for the design of UWB filters with fractional bandwidths (FBWs) over 110%. Furthermore, several UWB filters with high-performance are designed and developed. (1) In terms of transmission line theory, design/characteristic equations are established after the derivation of the theoretical real filtering functions for high-order equi-ripple UWB filters. (2) A new class of UWB filters composed of parallel-coupled stepped-impedance resonators (SIRs) and short/open-circuited stubs is proposed, hence, UWB filters satisfying FCC's specifications are experimental realized.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	1,700,000	510,000	2,210,000

## 研究分野：工学

科研費の分科・細目：電子デバイス・電子機器

キーワード：超広帯域 (UWB)、UWB フィルタ、フィルタの合成理論、バンドパスフィルタ、フィルタの理論設計、マイクロ波フィルタ、超広帯域無線通信

1. 研究開始当初の背景 2002 年、米国連邦通信委員会 (FCC) が UWB	無線用のスペクトム(マイクロ波帯域 (3.1-10.6GHz))の自由利用を認可して以来(日
--	--

本国内では 2006 年に総務省・情報通信審議会に出された)、様々な近未来の民生利用は熱く注目され、世界各国に於いて UWB 技術の実用化に向けて研究開発が活発化している。しかし、量産・商用化するには研究開発すべき課題が多いのが現状であり、その 1 つに、UWB システムに必要な不可欠なデバイスの一つとして超広帯域(UWB)帯域通過フィルタがあげられる。従来の集中定数 (L、C、Q 値)に基づいたフィルタの設計理論は、比帯域幅が 30%までに制限されていることが常識である。UWB 無線システム用 UWB フィルタの帯域幅は非常に広い (比帯域幅 FCC :  $(10.6-3.1)/6.85=110\%$ ) ので、従来の集中定数理論が適用困難である。UWB フィルタの開発にあたって主な困難 (課題) は、以下の 3 つのものに集約できる。1) 有効な設計手法・UWB フィルタ設計理論への探求、および超広帯域特性、伝統的なフィルタより厳しい帯域外特性の確保、2) 実用化・小型化。UWB フィルタの研究に関連する研究動向及び位置づけについて、2004 年 IEEE 国際マイクロ波大会で、荒木・石田氏は始めて FCC の UWB 無線通信システムに向け、UWB フィルタの設計にチャレンジした。しかし、このフィルタの帯域は 4GHz~10GHz (比帯域が 84%)であり、FCC の規制を完全に満たすことができなかった。その後、日本、アメリカなどの研究者は、電磁界シミュレータを用い、卓越した経験と試行錯誤により、様々な構造で、FCC の仕様を満たすようにフィルタを設計してきた。申請者は、2007 年のマイクロ波分野の最も重要な国際会議の一つである APMC で、初めて超広帯域フィルタに対する合成方法を提案した。この論文では、従来のフィルタ設計の集中定数理論を用いることなく、すべて分布定数パラメータに基づいた新伝達関数を構成した後、各回路パラメータを新提案した解析的な合成手法により求めた。その理論を用い、FCC の規格を完全に満たした UWB フィルタを実現した。更に、申請者が提案した合成理論の完成またフィルタの性能向上を実現のため、合成理論により様々な UWB フィルタを開発・試作した。しかし、新方法の有効性を確かめたが、合成・設計理論として、不完全な所がまだ多いので、発展・完成させる必要がある。

## 2. 研究の目的

(1)UWB フィルタの合成理論の確立。

①等リップル型 UWB フィルタの合成理論の確立。

②減衰極を有する UWB フィルタの合成理論

の確立。

(2)FCC、日本の規格を完全に満たした UWB 無線通信システム用小型フィルタの開発および実現。

## 3. 研究の方法

(1)超広帯域 (比帯域幅 110%以上) フィルタにおける合成理論についての研究: 合成理論を構成に必要な不可欠な三つの部分(i)フィルタの構造及び有効な等価回路(ii)適切なフィルタリング理論関数(iii)等価回路の各パラメータの確定方法 (合成方法) を中心として、比帯域幅 110%以上の超広帯域フィルタの一般的な設計理論を構成する。

①UWB フィルタの設計に関する文献・情報を調べた上、UWB フィルタの構成できる素子を選び、その分布定数伝送マトリクス・等価回路を導出する。更に、

②単位伝送素子、平行結合線路、スタブ等の回路基本素子を組み合わせ、更に、設計したフィルタを回路 (電磁界) シミュレータで最適化することにより、新しい等リップル UWB フィルタのレイアウトを完成する。等リップル型理論関数においては、申請者が発表した論文で提案した初めてのフィルタの新理論関数の誘導方法に基いて、フィルタリング関数と素子の数や配置位置等との関係を研究し、多段フィルタに対する高次等リップルフィルタリング関数を導出する。

③等価回路の各パラメータの確定方法 (合成方法) の研究においては、申請者が提案し確かめた等リップル型フィルタにおける新解析方法 (フィルタの分布定数等価回路から導出した伝達関数と理論フィルタリング関数における共通パラメータ—電気長を他のパラメータから分離し、比較する方法) により発展し、冗長な式でも計算できるように、多数の終端短絡スタブを装荷した多段ステップインピーダンス型フィルタに対する等リップル型フィルタに対して一般方法を構成する。

(2) 高性能小型 UWB フィルタの開発および実現についての研究方法

①フィルタ回路の小型化手法を調べると同時に、小型 UWB フィルタを実現するための基板材料を調査する。また、超広帯域フィルタの帯域幅が非常に広い為、基板の広帯域に渡った分散特性もフィルタ設計における肝心の要件である。そのため、同軸プローブに基づいた誘電率の広帯域の測定法を研究する。

②フィルタの設計理論により、マイクロ波で、FCC 及び日本総務省の仕様に満たすような

最小等リップル型・(準)楕円関数 UWB フィルタを合成し、シミュレータで感度分析する上、フィルタ回路各部分の製作精度における仕様を与え、フィルタ回路を実現する。更に、スロット構造や、曲げ線路構造、多層構造などの等価構造を用い、設計した UWB フィルタを加えて更なる小型化を計る。また、フィルタの低コスト化を進めるために、フィルタの構造には、出来る限りビア・ホールを避け、長さが 1/4 波長の開放スタブに取り替える。また、平行結合線路構造としては、平行線路間の隙間のサイズを出来る限り大きく設計する (例えば 0.1mm 以上)。

#### 4. 研究成果

この 2 年間の研究を踏まえて、研究成果を下記の通り纏める。

##### (1) 多段平行結合 SIR 構造に基いた UWB フィルタ

図 1 に多段平行結合 SIR に基いた UWB フィルタの構造を示す。各 SIR は等しい電気長 ( $\theta$ ) の 4 区間の伝送線路から構成され、各共振器は平行結合線路によって結合される。一方、多段 SIR 構造を用いて比帯域幅が広い UWB フィルタを設計する際に、従来の狭帯域フィルタ (比帯域幅が 20% 以下) のための設計手法は適用できないため、伝送線路理論に基いた新たな設計手法を紹介する。

① フィルタの実際伝送特性は式(1)で与えられる

$$|S_{21}|^2 = 1 / (1 + |T|^2), \quad (1)$$

$$|T| = (A_m + B_m/z_0 - C_m z_0 - D_m) / 2$$

ここに、 $A_m, S_m, B_m, C_m$  は  $n$  段フィルタ全体の ABCD 行列の要素である。

② フィルタにおける伝達関数  $S_{21}$  とチェビシェフ型の理論フィルタリング関数  $H_n$  を式(2)に与える。

$$|S_{21}(\theta)|^2 = \frac{1}{1 + \varepsilon^2 \cdot |H_n(\theta)|^2},$$

$$H_n(\theta) = \frac{(\sin \theta_c + 1) \cos \theta}{\cos \theta_c \sin \theta} \cdot T_{3n+1} \left( \frac{\cos \theta}{\cos \theta_c} \right) - \frac{1}{\sin \theta} T_{3n} \left( \frac{\cos \theta}{\cos \theta_c} \right) \quad (2)$$

ここに、 $n$  は SIR の段数である。 $\theta_c$  は伝送線路の単位素子の電気長、 $\theta$  は  $\theta = \theta_c \times f/f_c$  を満たす電気長である。 $\varepsilon$  は通過帯域内のリップルを表す定数である。 $T_N(x) = \cos(N \cos^{-1} x)$  は  $N$  次第 1 種チェビシェフ関数である。

③ 式(1)を式(2)に等しくすることにより、フィルタの各部分のパラメータと仕様との関係式 (設計方程式) が式(3)のように得られる。

$$n: \text{ odd } f_i(Z_{11o}, Z_{11e}, Z_{12}, Z_{13}, \dots) = \varepsilon \cdot g_i(\theta_c) \Big|_{i=1,3/2(n+1)} \quad (3)$$

$$n: \text{ even } f_i(Z_{11o}, Z_{11e}, Z_{12}, Z_{13}, \dots) = \varepsilon \cdot g_i(\theta_c) \Big|_{i=1,3/2(n+2)}$$

フィルタの段数  $n$  が奇数である場合、連立方程式における方程式の数と未知数の数が等しいため、最適フィルタであること、 $n$  が偶数である場合、未知数の数は方程式の数より多いため、解は一意的に決まらず、パラメータの選択において自由度が高くなる (設計しやすくなる) ことが分かる。実際例として、FCC の屋内仕様を満たした 2 段の UWB フィルタを設計した。フィルタの構造図と等価回路を図 2(a)(b) に示す。試作したフィルタの写真と周波数特性を図 3(a)(b) に示した。

##### (2) 減衰極を有する高性能 UWB BPF の実現

急峻なエッジ特性を持つフィルタを実現するため、先端開放スタブを SIR と組み合わせ、準楕円関数設計理論により、減衰極を有する高性能 UWB フィルタが実現できる。設計例として、5/4 波長の SIR と先端開放スタブを組み合わせた FCC の屋外規格を満たした高性能 UWB フィルタを示す。フィルタの構造、等価回路、写真と周波数特性を図 4 に示す。

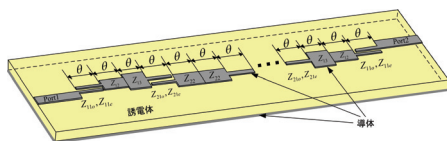
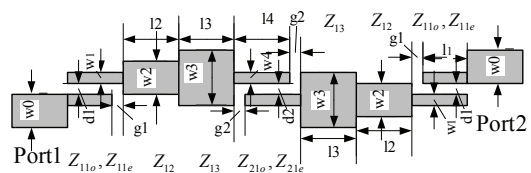
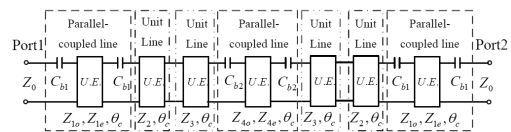


図 1 多段平行結合対称/非対称な一波長 SIR に基いたマイクロストリップ UWB フィルタ

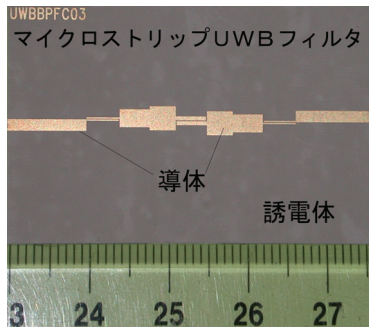


(a) 2 段のフィルタの構造

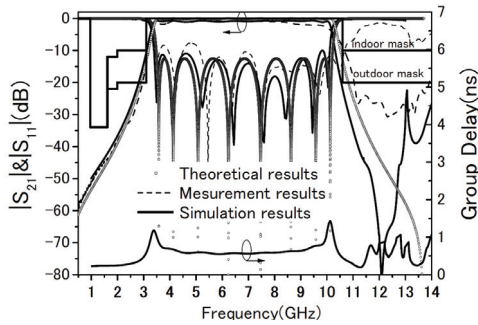


(b) 2 段のフィルタの等価回路

図 2 2 段の SIR に基いた UWB フィルタ



(a) 試作したフィルタの写真



(b) UWBフィルタの周波数特性

図3 FCC UWBフィルタの周波数特性

5. 主な発表論文等

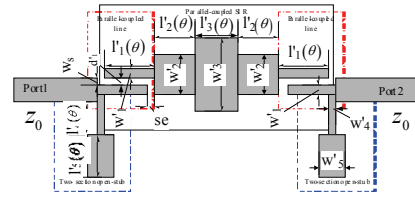
(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 3 件)

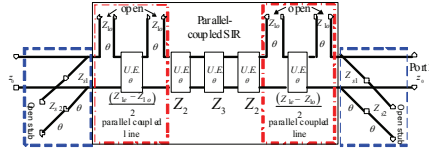
- (1) 陳 春平, 徐 得名, 穴田 哲夫, 開放端同軸プローブによるスカラー反射係数に基づいた複素誘電率及び複素透磁率の非破壊同時測定法、電子情報通信学会論文誌C、査読有、Vol.J96-C、No.6、2013、pp. 131-139
- (2) C.-P. Chen, T. Anada and Z. Ma, Realization of UWB Filter with SIRs and Parallel-Coupled Three Lines by Synthesis Method, Microwave and Optical Technology Letters, John Wiley, 査読有, (accepted)

[学会発表] (計 44 件)

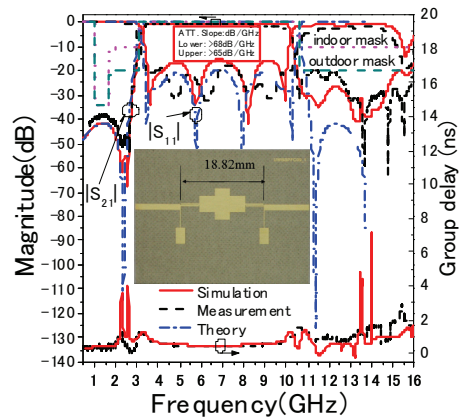
- (1) C.-P. Chen, et al, Theoretical/Synthesis Design of Compact UWB Bandpass Filters with Very Sharp Roll-off Characteristics, Proc. Asia Pacific Microwave Conference 2012, Dec.5, 2012, The Ambassador Hotel Kaohsiung, Kaohsiung, Taiwan.
- (2) C.-P. Chen, et al, A Novel Bandpass Filter Using Higher-Order Degenerate Modes of Planar Photonic Crystal Microcavity in Terahertz Regime, Proc. 42th European Micro. Conf., Oct.30, 2012, the RAI, Amsterdam, The Netherlands.



(a) 先端開放スタブと5/4波長のSIRを組み合わせたフィルタ



(b) (a)に示したフィルタの等価回路



(c) 試作したフィルタの写真、周波数と群遅延特性

図4 設計した高性能UWBフィルタの周波数特性

- (3) C.-P. Chen, Theoretical Design of High-performance Ultra-wideband Bandpass Filters Using Microstrip Line, TJMW2012 (Thailand-Japan MicroWave) Microwave Theory and Techniques Tutorial MW-3, August 7, 2012, Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand.
- (4) C.-P. Chen, et al, Theoretical design of wideband filters with attenuation poles using improved parallel-coupled three-line units, 2012 IEEE MTT-S, June 20, 2012, the Palais des congrès de Montréal (Montréal Convention Center), Canada.
- (5) C.-P. Chen, et al, Design of UWB Filter with SIRs and Parallel-Coupled Three Lines, Proc. of 2011 China-Japan Joint Microwave Conf., Apr. 21, 2011, Hangzhou, China.
- (6) C.-P. Chen, et al, Novel Synthesis Methodology for Ultra-Wideband Filters Based on Frequency Transformation Technique, Proc. 41th European Micro. Conf., 11 Oct. 2011, Manchester Central, Manchester, UK.
- (7) 陳 春平, et al, 減衰極を有するUWBバンドパスフィルタの理論設計, 電子情報通信学会研究会, 2012年7月27, 北海道大学
- (8) 陳 春平, et al, 同軸プローブに基づいた複素電磁パラメータの測定に関する一検討,

電子情報通信学会研究会, 2012年6月1日, 青山学院大学青山キャンパス総研ビル

(9) 陳 春平, et al, 減衰極を有する超広帯域バンドパスフィルタの理論設計, 2012年電子情報通信学会総合大会, 2012年3月, 岡山大学津島キャンパス

(10) 陳 春平, et al, 平行結合三線路ユニットを用いた減衰極を有する広帯域フィルタの理論設計, 電子情報通信学会研究会, 2011年10月7日, 長崎県美術館

(11) 陳 春平, et al, ステップインピーダンス共振器と平行結合三線路を用いたUWBバンドパスフィルタの設計, 電子情報通信学会研究会, 2011年7月22日, 北見工業大学

〔図書〕 (計 1 件)

(1) 陳 春平等, 現代 電子情報通信選書「知識の森」—マイクロ波伝送・回路デバイス— (執筆分: 4章 受動回路素子・4-3 フィルタ・4-3-4 UWBフィルタ, pp.99-105), オーム社, 2013 年02 月

6. 研究組織

(1)研究代表者

陳 春平 (CHUN-PING CHEN)

神奈川大学・工学部・助教

研究者番号: 20440266