

平成 26 年 5 月 21 日現在

機関番号：12501

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560386

研究課題名(和文) 可変周波数 SAW 共振子の開発とその応用に関する研究

研究課題名(英文) Study on variable frequency SAW filter and its applications

研究代表者

大森 達也 (Omori, Tatsuya)

千葉大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：60302527

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000 円、(間接経費) 1,230,000 円

研究成果の概要(和文)：本研究では、主として無線通信機で用いられる高周波フィルタや発振回路について、これらを構成する弾性表面波共振子の高性能化、ならびにこれを用いた可変周波数フィルタや可変周波数発振回路に関する検討を行った。まず、広帯域弾性表面波共振子の不要を応答抑圧について、系統的な設計方法を提示した。次に、これらを用いる可変周波数フィルタと低位相雑音な可変周波数発振回路を設計・試作し、高性能高周波回路への応用の可能性を明らかにした。最後に、UHF帯で動作する再帰型アクティブフィルタの実用化に向けた開発を行い、自己調整手法の開発などに成功した。

研究成果の概要(英文)：It is described that the development of wideband SAW resonators and their applications to variable frequency filters and oscillators aiming at adopting highly sophisticated radio communication systems. At first, a systematic design technique was proposed for suppressing spurious responses of wideband surface acoustic wave (SAW) resonators. Then, the variable frequency band elimination filters including the SAW resonators were developed. It was shown that the filter enables us to realize an UHF variable frequency oscillators with low phase noise property. Finally, active filter in UHF range based on recursive architecture was investigated. It is also shown that the developed self-tuning techniques implemented the controller of the filter works fine.

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：波動利用工学 弾性波デバイス 可変周波数回路 高周波回路

1. 研究開始当初の背景

今日の無線通信システムは、多様な通信方式・周波数が用いられており、一台の通信機がこれら複数の方式による通信機能を実装することは珍しくない。このような通信機では、異なる周波数帯に対応するため、多くのフィルタや発振器を内蔵し、これらを切替ながら使用している。しかし、このように複数の素子や回路を使うことは機器内部を複雑にするばかりでなく、機器の小型化にとっても大きな問題となっている。また、コグニティブ無線通信に代表されるように、連続した極めて広い周波数帯域を場所・時間に応じてダイナミックに割り当てをしなから使用する通信方式も提案されており、こうした用途に対応する回路要素には、広い範囲で中心周波数や帯域を連続可変できることが望まれる。

このような問題や要求に対して、本申請者らの属するグループでは、Cu電極/LiNbO<sub>3</sub>構造の超広帯域弾性表面波(SAW)共振器に、可変容量を付加した構造からなる可変周波数フィルタを提案してきた。これは、Cu電極/15°YX-LiNbO<sub>3</sub>構造中を伝搬するSAWが極めて大きな電気機械結合係数を持つことを利用し、この構造による共振器を用いたラダー型フィルタが約20%もの超広帯域な特性を実現できることから、この帯域内で、任意の中心周波数・帯域幅を合成しようとするものであった。理論的検討、および試作により、この提案構造が可変周波数フィルタとして、有望であることを明らかにしたが、周波数可変範囲など、用途によっては依然十分であるとは言えなかった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、広帯域にわたる可変幅をもち、かつ、従来にはない特徴を有する、マイクロ波帯周波数可変フィルタや、これを用いた発振器を実現することである。このために、SAW共振器の高性能化に向けた検討、回路構成等について幅広く検討を行う。

3. 研究の方法

本研究は大きく、材料も含めた共振器の高性能化に関する検討、これら高性能共振器を用いた広帯域可変フィルタの構成に関する検討、および、この可変フィルタを利用する低位相雑音可変周波数発振回路の設計・試作、これらに加えて、更なる広帯域特性を実現するマイクロ波帯アクティブフィルタに関する検討を行った。具体的研究方法を以下に示す。

(1) 広帯域SAW共振器の高性能化

広帯域SAW共振器において、これらを利用する際に横モードスプリアス共振の抑圧が必須である。これら横モードスプリアスを抑圧する方法として、従来より重み付きダミー電極を提案してきたが、この電極パターンは多分に経験則によるものであった。そこで、

本研究では経験に頼らない客観的な設計方法を確立すべく、まず、スカラーポテンシャル法を用いて、多層導波路内のSAW伝搬特性を解析し、この結果を用いて長手方向に構造が変化する重み付導波路の設計指針を明らかにする。この際、横方向への伝搬も考慮したモード結合(COM)方程式を利用し、その、パラメータ抽出法についても提案を行う。

また、このような共振器を発振回路に適用した場合、低位相雑音実現のために必要となる高Q化についても実験的な検討を行う。筆者らの有する弾性振動可視化装置によって、パッケージ前のSAW共振器を用い、エネルギー漏えいの様子を観察可能とすることで、高性能SAW共振器の開発を容易とすることを試みる。

(2) マイクロ波帯におけるDual-T回路とその応用

図1に示すDual-T回路は、比較的広い周波数可変幅を有する帯域素子フィルタ(BEF)として動作することが知られている。従来、比較的低い周波数帯での利用を提案されてきたDual-T回路を、本研究では、広帯域SAW共振器を用いて、UHF帯における広可変フィルタとして使用することを試みる。この時、UHF帯で使用することから、可変減衰器の代わりに高周波トランジスタを用いたコンバイナを用いることで高性能化を図る。

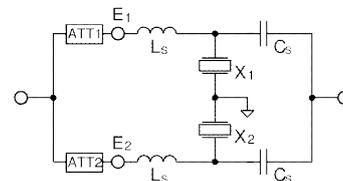


図1. Dual-T回路の基本形

一方、Dual-T回路は本質的に可変周波数BEFとして動作するので、これを利用した低位相雑音で、周波数可変幅の広い発振回路についても設計・試作する。

(3) UHF帯再帰型アクティブフィルタ

コグニティブ無線などの応用を考えた場合、さらなる超広帯域な周波数可変フィルタが必要となる。これに対し、再帰型アクティブフィルタの実用化に向けた検討を行う。図2に示すような、可変利得増幅器の出力を位相器を通して正帰還する構造の再帰型アク

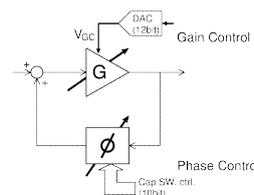


図2. デジタル制御再帰型BPFコア

ティブフィルタを用いれば、位相器の位相量を調整することでUHF帯において500MHzを超えるような超広帯域幅での周波数可変が可能となる。しかし、鋭いフィルタ特性を

実現するためには、発振に近い状態を維持する必要があるため、本質的に不安定な動作となる。そこで、実用のためにはセルフチューニング機能が必須である。本研究では再帰型フィルタコアに加え RSSI や周波数カウンタなどを集積化したワンチップ RFIC を用意し、これを用いて、高精度のセルフチューニング方法の提案と実装を行う。

また、単独の再帰型フィルタコアは本質的に二次特性を持つため、チューニング可能なのは、中心周波数と比帯域幅のみであり、通過帯域での平坦性や肩特性などを独立制御することができないが、複数のフィルタコアを用いることにより、高次特性の実現が可能であることに着目して、高次フィルタの合成についても提案し、その実現性を実証する。

#### 4. 研究成果

##### (1) 広帯域 SAW 共振子の高性能化

スカラポテンシャル法を用いて多層領域からなる導波路中を伝搬する SAW の分散特性の解析結果より、長手方向に構造の変化する導波路に対する COM モデル構築に成功した。これを利用して各種ダミー電極重み付パターンを持つ SAW 共振子を試作したところ、これらの特性は理論値と良く一致することが確認された。これにより広帯域 SAW 共振子のスプリアス対策として有効な重み付ダミー電極の系統的な設計方法に対する指針を明らかにすることができた。この成果は 2011 年の IEEE Ultrasonics Symposium で発表された。

また、SAW 共振子の試作段階での伝搬姿態を可視化するため、オンウェハで測定可能な弾性振動可視化装置を開発し、SHF 帯でも明瞭な SAW 伝搬姿態の観察が可能となった。この成果は、今後の SAW デバイス開発において、Q 劣化原因の同定などに極めて有用であると考えられる。

##### (2) マイクロ波帯における Dual-T 回路とその応用

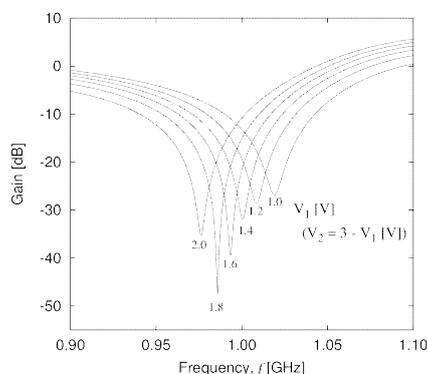


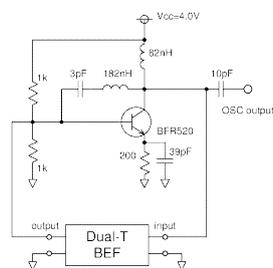
図 3. 広帯域 SAW 共振子を使用した Dual-T 回路の周波数特性

広帯域 SAW 共振子を用いた UHF 帯 Dual-T 回路構築について検討した結果、図 3 に示すように 1GHz 帯において、およそ 8% の可変

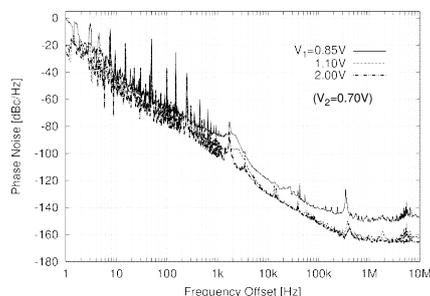
幅をもつ SAW BEF の合成が可能であることを、回路シミュレーションにより明らかにした。

このシミュレーション結果をもとに、図 4(a) に示した可変周波数発振回路を構築した。材料調達の都合で共振子として 430MHz 帯の狭帯域共振子対を用いたが、試作した SAW 発振器は 430MHz 帯で 0.1MHz 範囲の周波数可変となり、その位相雑音特性は、図 5(b) のように 10kHz オフセットにおいて -120dBc/Hz と十分に小さいものであった。

これらにより、高い Q 値を持ち、十分にスプリアスが抑圧された広帯域 SAW 共振子を用いて Dual-T 回路を構成することで、広可変幅な高周波ノッチフィルタが構成可能であり、更に、これを発振回路に適用することで、低位相雑音な可変周波数発振回路を実現できることが明らかになった。これらの成果は 2012 年の IEEE Ultrasonics symposium などでも公開している。



(a) Dual-T ノッチフィルタを用いた VCSO



(b) 試作 VCSO の位相雑音特性

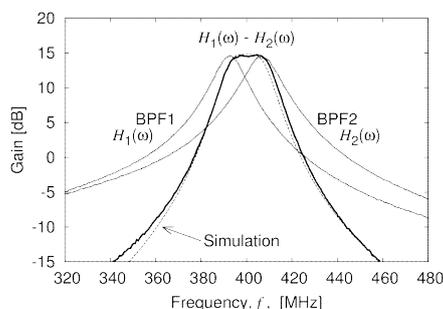
図 4. Dual-T 回路を使用した VCSO の試作結果

##### (3) UHF 帯再帰型アクティブフィルタ

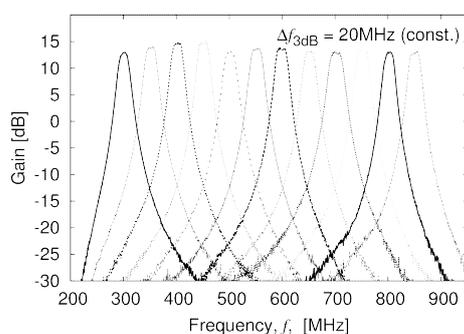
再帰型構造の UHF 帯アクティブフィルタ実用化に向けて、まず、閉ループ利得を減少したときの、発振状態から非発振状態に至る周波数特性に着目した、高精度な自己チューニング手法を提案した。この手法を試作した評価装置内のマイクロプロセッサに実装して評価をしたところ、270MHz~850MHz の範囲において、0.7% 以内の誤差で中心周波数を制御できることを確認した。また、この時、3dB 帯域幅も 2~10% の範囲で制御できることを確認した。

次に、これらの再帰型フィルタコアを 2 個用いて 4 次のパワースペクトル合成を試みた。この結果、図 5(a) に示すように、通過帯域内

で平坦で、かつ、良好な対域外抑圧特性をもつフィルタ構造の合成に成功した。さらに、このフィルタ特性を維持したまま、図 5(b)に示す通り、中心周波数を 300MHz~850MHz の範囲で連続可変とすることに成功した。これらの成果の一部は 2013 年 European Microwave conference で公表された他、このフィルタ構造に付随する内容を含めた検討結果を電子情報通信学会研究会および、今後の国際学会で発表・発表予定である。



(a) 再帰型フィルタコアを使用した 4 次 BPF の合成



(b) 4 次 BPF の中心周波数制御

図5. 再帰型フィルタコアによる高次 BPF 特性の合成

以上の研究により、たとえば将来のコグニティブ無線に代表されるような適応型無線システム実現の上で必須となる、高性能な周波数可変フィルタや周波数可変発振器の開発に一定の貢献をしたものと考えている。

## 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] 坂本慎也, 板倉岳志, 柏景介, 吳楠, 大森達也, 橋本研也, 山口正恆: 「超高速弾性振動可視化システムにおける信号遅延補正」, 電子情報通信学会論文誌 A (査読有), J96-A(6), pp. 357-362 (2013)

[2] Masahiro Inaba, Tatsuya Omori and Ken-ya Hashimoto: "A configuration of widely tunable surface acoustic wave filter", Japanese Journal of Applied

Physics (査読有), 52(7), 07HD05 - 07HD05-4 (2013)

[学会発表] (計 13 件)

[1] 瀬尾研, 藤川貴宏, 大森達也, 橋本研也, 鎌田幹雄: 「高周波再帰型フィルタに関する検討」, 電子情報通信学会ソフトウェア無線研究会, (2014.03.04), (東京)

[2] 河内俊太郎, 高橋明, 坂本慎也, 大森達也, 橋本研也: 「SHF 帯で測定可能な弾性振動可視化システムの実現」, 圧電材料・デバイスシンポジウム 2014, (2014.1.29), (仙台)

[3] Tatsuya Omori, Shinichiro Nishiuma, Ken Seo, Chang-Jun Ahn, Ken-ya Hashimoto and Mikio Kamada: "Integrated RF tunable filter based on recursive architecture and its application", 43<sup>rd</sup> European Microwave Conference, (2013.10.8), (ニュルンベルク, 独)

[4] 瀬尾研, 西馬伸一郎, 大森達也, 安昌俊, 橋本研也, 鎌田幹雄: 「高周波再帰型高次フィルタに関する検討」, 電子情報通信学会総合大会, (2013.3.21), (岐阜)

[5] 西馬伸一郎, 瀬尾研, 大森達也, 橋本研也, 鎌田幹雄: 「高周波再帰型フィルタにおける周波数特性の自動制御および高次フィルタへの応用」, 弾性波素子技術第 150 委員会研究会, (2012.10.25), (東京)

[6] Tatsuya Omori, Naoto Matsuoka, Chang-Jun Ahn and Ken-ya Hashimoto: "Dual-T SAW tunable band elimination filter and its application to wideband UHF VCSO", 2012 IEEE Ultrasonics Symposium, (2012.10.09), (ドレスデン, 独)

[7] 松岡直人, 大森達也, 安昌俊, 橋本研也: 「SAW 共振子を用いた RF 帯周波数可変 Twin-T 発振器の検討」, 弾性波素子技術第 150 委員会研究会, (2012.1.17), (東京)

[8] Tatsuya Omori, Takahiro Suyama, Kenta Shimada, Chang-Jun Ahn, Masatsune Yamaguchi and Ken-ya Hashimoto: "Theoretical consideration on suppression mechanism of spurious transverse mode resonances in wideband SAW resonator on LiNbO<sub>3</sub>", 2011 IEEE Ultrasonics Symposium, (2011.10.19), (フロリダ, 米)

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

大森 達也 (OMORI TATSUYA)

千葉大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号: 60302527