

## 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 5 月 9 日現在

機関番号：32619

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22560345

研究課題名（和文）メタマテリアル超小型・周波数可変回路の開発

研究課題名（英文）Development of Ultra Small Scale, Tunable RF Circuit using Metamaterial Technology

## 研究代表者

田中 慎一（SHINICHI TANAKA）

芝浦工業大学・工学部・教授

研究者番号：00556243

## 研究成果の概要（和文）：

従来の分布定数線路型スタブ共振器よりも小型で周波数可変化が可能な新たな共振器回路として、メタマテリアル線路で構成され負次数の共振モードを用いるスタブ共振器を新たに提案した。本提案の共振器は、従来の $\lambda/2$ 共振型のスタブ共振器と比較して $1/3$ 以下に小型化できる。また本共振器では、メタマテリアル線路を導入することで、左手系の電磁波伝送モードの群速度が低下し、無負荷 $Q$ が2倍以上に向上するという特徴を見出した。その結果、通常の右手系の共振器では負荷 $Q$ の上昇と共に顕著となる挿入損失の劣化を有効に抑制することができる。さらに、本共振器の共振周波数と負荷 $Q$ はメタマテリアル線路部のリアクタンス成分（ $L$ 、 $C$ ）で決まることから、これらのパラメータの可変化により共振器特性の制御も可能になる。本研究では、マイクロ波回路シミュレーションと電磁界解析および試作実験を通して提案回路の有効性を実証し、さらに本共振器の特異な性質についてその物理的なメカニズムを明らかにしている。

## 研究成果の概要（英文）：

In this project, we proposed a meta-material based stub resonator utilizing negative-order resonance mode, with compact size and frequency tunability. The compact resonator sizes less than  $1/3$  of conventional half-wavelength stub resonators. We demonstrate that the slow group velocity of the left-handed waves enhances the unloaded- $Q$  of the resonator by a factor of 2 or more. As a result, the loaded- $Q$ , controlled by the left-handed reactive elements, can be arbitrarily increased without incurring significant insertion loss as in the case of conventional right-handed stub resonators. The physical mechanism of the distinct features is discussed based on measured and simulated results.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2011年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2012年度	500,000	150,000	650,000
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：メタマテリアル、左手系、共振器、 $Q$ 値

### 1. 研究開始当初の背景

マイクロ波ミリ波帯での通信・センシングに不可欠なマイクロ波集積回路 (MMIC) は主として分布定数線路で構成されている。分布定数線路は高周波特性に優れる反面、その寸法が波長で決まるため、低コスト化のために必要なチップの小型化に限界が生じる。また、動作周波数帯が固定されるため、無線のマルチバンド化の潮流に対応するための柔軟な活用も困難である。例えば、本研究課題の研究代表者らが以前に提案した「 $(\lambda/4 \pm \delta)$  ダブルスタブ共振器」もその例で、優れた特性をもつ一方で、 $\lambda/2$  長の長い線路寸法と固定周波数という制限のため、波長の短いミリ波帯に適用範囲が限られていた。

一方、近年、マイクロ波回路の分野ではメタマテリアル (以下、MM) 理論を活かした新しい回路設計手法に注目が集まっており、従来は数多くの制約に縛られた回路設計がMMの概念の導入より柔軟に行うことが可能となり、優れた性能の回路が実証されてきている。

### 2. 研究の目的

以上の背景に鑑みて、本研究はMM線路を導入することによりマイクロ波回路の小型化および周波数可変性を同時に図ることを目的として実施した。回路としては、MMICにおいて占有面積が大きくなる傾向のあるスタブ共振器を取り上げ、「 $(\lambda/4 \pm \delta)$  ダブルスタブ共振器」と同等以上の性能を維持しつつ上記目標を達成することを狙いとした。

### 3. 研究の方法

スタブ線路にMM線路を導入した先行例としては、スタブの周波数応答をデュアルバンド化する目的で実施した例がある。しかし、この報告例ではスタブを右手系の周波数領域で動作させることに主眼を置いており、左手系線路はスタブ全体の位相を調整するために用いられるに過ぎない。また、MMを共振器に応用した先行例としては、零次共振器がよく知られている。零次共振器では電圧が均一に分布するため、共振器内に直列寄生抵抗成分があっても損失が発生せず、極めて大きな無負荷Qが得られるという特徴がある。一方、位相速度が高い領域を使用するので放射性が強く、主としてアンテナへの利用が検討されている。

本研究では、MMICの回路設計との親和性が高いスタブ型の共振器を目指し、スタブにMM線路を導入する手法を採用する。また、前述のデュアルバンドのスタブ回路と異なり、左手系の周波数領域における共振モードを積極的に利用する点が既報告のMMを応用した回路と異なる点である。

研究を以下の方法により2段階で進めた。

#### (1) 共振器の原理提案

負次数の共振モードを利用する共振器の基本的な動作原理を提案し、従来のダブルスタブ共振器との共通点および相違点を明らかにする。

#### (2) 基本特性のシミュレーション検討

右手系と左手系の線路から成るMM線路の分散特性と共振器の特性との対応関係を調べる。また、左手系および右手系のパラメータが共振器のサイズや性能に及ぼす影響を調べ、そこから周波数可変性の可能性を検討する。

#### (3) 実験検討

(1)で予測された結果を確認するため、実際に回路を試作し、共振器のサイズ短縮効果、性能、可変性について評価する。

### 4. 研究成果

#### (1) 共振器の原理提案

提案したMMスタブ共振器と比較参照用のダブルスタブ共振器の構成を図1に示す。MMスタブ共振器は、右手系のマイクロストリップ線路の部分と直列Cおよび並列Cからなる単位セルを複数配列した左手系線路部分から成る。

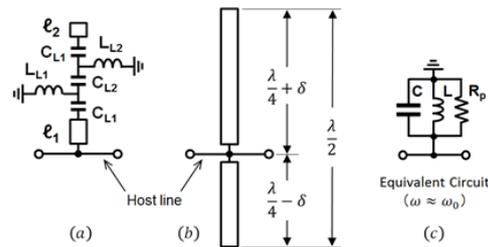


図1 共振器の構成

図2を用いて、提案するMMスタブ共振器と従来のダブルスタブ共振器の動作の違いを説明する。まず後者では、2本の開放スタブを用いて共振周波数の近傍に減衰極を配置し高い負荷Qを実現している。スタブが2本必要となる理由は、右手系の伝送線路では1本のスタブで近い周波数の共振を生じさせることができないためである。一方、MM線路では特に左手系領域では分散曲線の勾配が緩やかになる結果、狭い周波数範囲において負次数の共振モードを複数生じさせることが可能になる。このとき、共振モードと反共振モードが交互に出現し、2つの共振モード (減衰極) が反共振モードを挟み込む形となり、1本のスタブでダブルスタブ共振器と同様の共振器動作を模倣することができる。また、MM線路の分散曲線はL、Cなどのパラメータが強く関与することから、これ

らのパラメータを利用すれば周波数特性の可変化を実現し得ることがわかる。

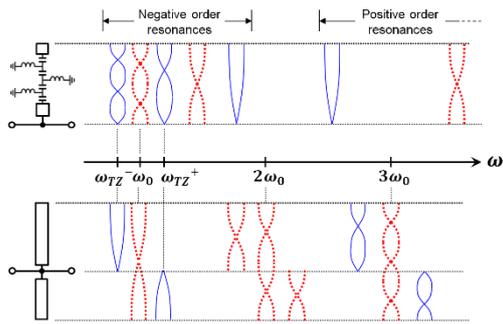


図2 共振モードの比較

(2) 基本特性のシミュレーション検討

(1)で予想された動作の原理を踏まえ、マイクロ波回路シミュレータ(ADS)を用いて、提案した共振器基本動作の確認を行った。まず、MM線路の分散特性とMM線路をスタブに用いたときの特性との対応を調べた。図3に示すように負次数の共振が起きている低い周波数領域では反共振・共振モードの周波数列が交互に且つ密に並んでおり、その結果反共振による鋭いバンドパス特性が得られることが確認された。また、このように1つの反共振を2つの前後する共振モードで挟むためには、単位セル数は少なくとも2個必要であることもわかる。この解析から、バンドパス特性を鋭くする(負荷Qを高める)方法としては単位セル数を増やし高次の負次数共振モードを利用することで、分散曲線の勾配をさらに小さくする方法があることがわかる。また、右手系線路部を長くすることも同じ効果が得られることもわかった。しかし、前者の方法は損失が増大させ、後者の方法は共振器サイズを増大させることから、負荷Qを制御する別の手段を検討した。

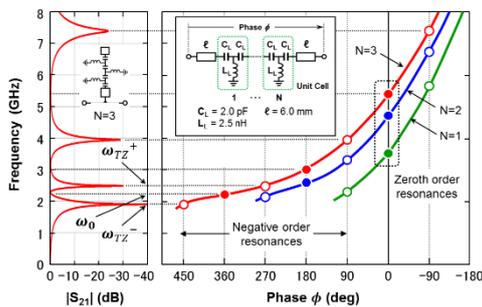


図3 分散曲線と共振器特性 f の関係

そこで、単位セル数は最小限の2に固定した上で、左手系の回路パラメータがMMスタブ共振器の特性に及ぼす影響について調べた。その結果、図4に示すように、2つのインダクタンス $L_1, L_2$ の値により、各々低周波側、

高周波側の減衰極をほぼ互いに独立に制御することができることがわかった。これにより、左手系の単位セル数は最小限の2に抑えても、共振器の負荷Qをインダクタンスの値だけで自由に制御できることがわかった。

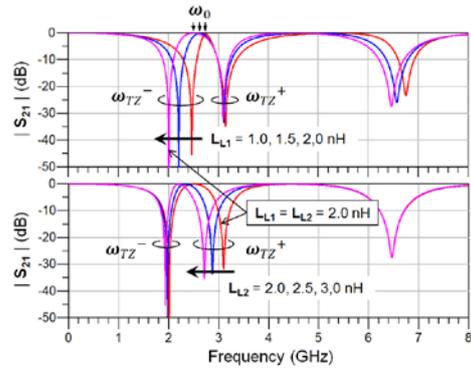


図4 共振モードの比較

(3) 実験検討

図4から読み取れるもう一つの重要な事実は、負荷Qが向上しても共振周波数における挿入損失がほとんど劣化しないことである。これは従来のダブルスタブ共振器とは顕著な違いあり、その原因を探るために、負荷Qの値を変えた共振器を試作し、負荷Qと挿入損失の関係調べた。誘電体基板としてはプリント基板(FR4)を用いた。

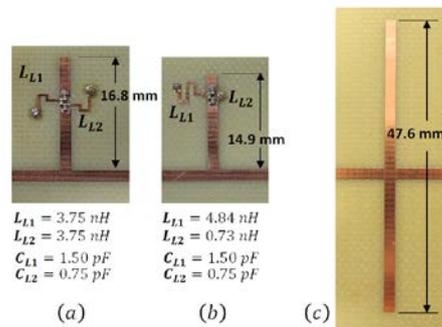


図5 試作したスタブ共振器

図5に試作した共振器の代表的な外観写真を示す。図5(a)(b)はMM線路を用いたスタブ共振器を示す。左手系線路部のインダクタとしてはメアンダ型を、キャパシタンスとしてはチップコンデンサを採用した。図5(b)は2つのインダクタの値を非対称にすることで負荷Qを向上させたタイプを示す。共振器の特性は主として左手系線路部で決まり、右手系線路部は共振周波数を決める上で主要な役割はない。しかし、負荷Q値を所望の値にする上で右手系線路の長さは微調整の機能があるため、共振器は一定のサイズは確保する必要がある。それでも、図5(c)と比較してわかるように、MM線路を用いること

で共振器サイズはダブルスタブ共振器の約1/3にまで小型化することができた。(負荷Qが優先事項でなければ1/20のサイズも実現できることを確認している。)

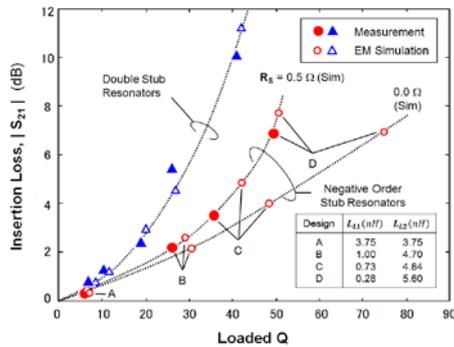


図6 負荷Qと挿入損失の相関

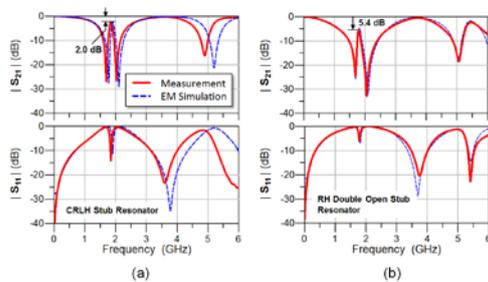


図7 スタブ共振器のSパラメータ特性

- (a) メタマテリアル線路スタブ共振器
- (b) 従来のダブルスタブ共振器

図6にスタブ共振器の負荷Qと挿入損失の相関を示す。従来の右手系のダブルスタブ共振器では負荷Qの増大と共に挿入損失が顕著に増大するのに対し、MM線路スタブ共振器では挿入損失の増加が緩やかであることがわかる。図7に同等の負荷Q値(約25)の条件でMM線路スタブ共振器とダブルスタブ共振器のSパラメータ特性を比較した結果を示す。挿入損失の値は、後者の5.4dBに対し前者では2.0dBと大幅に抑えられていることがわかる。

負荷Qと挿入損失の値について実験結果を電磁界解析の結果と比較すると、ダブルスタブ共振器の場合はよい一致が得られている。一方、MM線路スタブ共振器に関しては、コンデンサとして理想キャパシタを仮定すると実験と解析の一致はよくない。しかし、解析においてコンデンサの直列抵抗として0.5Ωを仮定するとよい一致をみることができた。これはMMスタブ共振器が左手系線路部の寄生抵抗の影響を強く受けることを意味する。

図6の結果に基づいて、MMスタブ共振器の無負荷Qを評価した。共振器の挿入損失は

$$|S_{21}(\omega_0)| = 1 - \frac{Q_L}{Q_u}$$

と表されることから、図8に示すように負荷Q ( $Q_L$ ) と挿入損失の相関を無負荷Q ( $Q_u$ ) を見積もることができる。まずダブルスタブ共振器に関しては、 $Q_u = 63$ と見積もられたが、これはFR4基板上のマイクロストリップ線路共振器について報告されている数値とよく一致する。一方、理想コンデンサを仮定したMM線路スタブ共振器の場合、シミュレーション上は $Q_u = 140$ とダブルスタブ共振器の場合の2倍強の値が見積もられた。実験で得られた無負荷Q値92-126と140よりも低い値が得られたが、これはコンデンサの寄生抵抗の影響と考えられる。いずれにせよ、MM線路の導入により無負荷Qが大きく向上しており、これが挿入損失の低下に繋がっていることが新たに判明した。

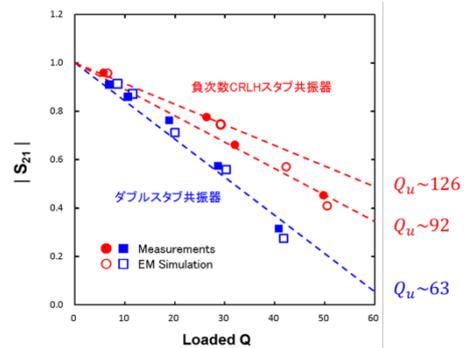


図8 無負荷Qの評価

メタマテリアル線路を用いたスタブ共振器で無負荷Qが向上したり、挿入損失が低減されたりする理由について考察した。共振器の無負荷Qは、伝送線路が分散を有する場合も考慮すると、一般に次式のように表される。

$$Q_u = \frac{\beta v_p}{2\alpha v_g}$$

ここで、 $\alpha$ は減衰定数、 $\beta$ は位相定数、 $v_p$ は位相速度、 $v_g$ は群速度を表す。この式から  $v_g < v_p$  なら、マイクロストリップ線路のような準TEM線路の場合 ( $v_g \cong v_p$ ) よりも無負荷Qの値が増加することがわかる。実際、図3からわかるように、負次数の共振モードの領域では分散の勾配が緩やかになっており、 $v_g$ は $v_p$ よりも約1/2となっており、見積もられた無負荷Qの増大率(理想的な条件で2倍強)とよく一致する。

挿入損失が低くなる理由は無負荷Qが向上することから理解できるが、別の観点で説明することもできる。図9に2つのタイプのスタブ共振器における共振時の電圧定在波のイメージを示す。ダブルスタブ共振器の場合、両スタブを合わせた共振器全体で $\lambda/2$ モードの共振を起こすことから、共振時には電

圧の節が主線路に極めて近くなり、スタブと主線路の結合点のインピーダンスが小さくなり、その結果として挿入損失が劣化する。一方、MM線路スタブ共振器の場合、1本のスタブで $\lambda/2$ モードの共振を起こすことから、スタブと主線路との結合点においてインピーダンスの低下が起きない。これが可能になるのは、MM線路を使うことで1本のスタブで2つの減衰極に挟み込まれたバンドパス特性を実現できるためである。

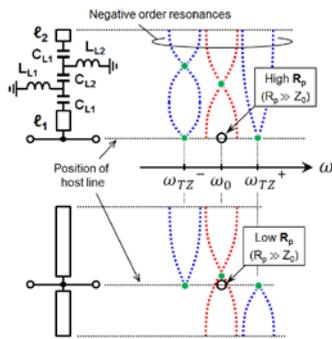


図9 スタブ共振器の電圧定在波

以上より、MM線路を用いたスタブ共振器において負次数の共振モードを利用することで、従来の右手系のスタブ共振器と比較して、小型でしかも性能が大幅に改善された共振器が実現できること新たに見出すことができた。性能改善が図れた理由はメタマテリアルならではのユニークなメカニズムによるものであることを明らかにした。また、今回は2GHzと比較的低い周波数で検討を行ったが、インダクタンスとキャパシタンスの値により容易に高周波化することができる。その際、高い周波数ほど必要なキャパシタンスは小さな値で済むため、コンデンサとして損失の大きいチップコンデンサの代わりにインターディジタルキャパシタを用いることで、MM線路スタブ共振器をより理想的な性能に近づけることができると期待される。なお、今回は周波数可変化に関しては実験での最終実証に至らなかったが、インダクタンス値を変動させるだけで負荷Qを制御できることを示し、また共振周波数もインダクタンスとキャパシタンスの値で決まることから、これらのパラメータをMEMS等により可変化することで周波数可変化も原理的に実現できると考えられる。

## 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)

[学会発表] (計6件)

- ① 奥野木雅和、片寄孝雄、田中慎一、「楕円キャパシタを装荷した小型ダブルスタブ共振器

(1)「スタブ短縮効果と無負荷Qの評価」、電子情報通信学会総合大会予稿集、C-2-48、2012年3月21日、岡山大学

- ② 片寄孝雄、奥野木雅和、田中慎一、「楕円キャパシタを装荷した小型ダブルスタブ共振器(2)「容量装荷が減衰極に及ぼす影響」、電子情報通信学会総合大会予稿集、C-2-49、2012年3月21日、岡山大学
- ③ T. Katayose, M. Okunogi, K. Hosoya, S. Tanaka, “High-Q Transmission Line Stub Resonators using Interdigital Capacitor Loading for MMIC Applications,” Proceedings, Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIER), pp.1909-1912, Mar.27, 2012, Kuala Lumpur, Malaysia.
- ④ 杉田量平、向田喬裕、田中慎一、「負次数の共振モードを用いるCRLH線路スタブ共振器(1)「基本動作原理」、電子情報通信学会総合大会予稿集、C-2-106、2013年3月22日、岐阜大学
- ⑤ 向田喬裕、杉田量平、田中慎一、「負次数の共振モードを用いるCRLH線路スタブ共振器(2)「低挿入損失・高負荷Qの実証」、電子情報通信学会総合大会予稿集、C-2-107、2013年3月22日、岐阜大学
- ⑥ S. Tanaka, K. Mukaida, R. Sugita, “High-Q CRLH Transmission Line Stub Resonator Utilizing Negative Order Resonance Modes,” Proceedings, European Microwave Conference, Oct.6, 2013, Nuremberg, Germany (採択済)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

田中 慎一 (SHINICHI TANAKA)  
芝浦工業大学・工学部・教授  
研究者番号：00556243