

平成 30 年 5 月 23 日現在

機関番号：32619

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06027

研究課題名(和文) CRLH線路スタブの分散制御によるマイクロ波増幅器及び整流器の高効率化

研究課題名(英文) Improvement of microwave amplifiers and rectifiers using dispersion engineering of CRLH transmission line stub

研究代表者

田中 慎一 (Tanaka, Shinichi)

芝浦工業大学・工学部・教授

研究者番号：00556243

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：マイクロ波電力増幅器は、第5世代無線通信システムに向けて電力効率など性能要求が厳しさを増している。本研究課題では、右手左手系複合(CRLH)線路スタブを用いて高効率F級増幅器を実現するための新しい高調波処理回路を提案し、様々な形態の実証回路の試作を通してその高い性能と実用性を実証した。代表例として、次世代半導体の窒化ガリウム(GaN)FETを用いた増幅器に適用した結果、2GHz帯の5W級F級増幅器にて従来より大幅に小型化した高調波処理回路を用いて88%という高いドレイン効率を実現した。本手法は、F級増幅器のみならず次世代システムに求められる高度なマイクロ波回路に広く応用できる。

研究成果の概要(英文)：Toward the 5th generation wireless communication system, the demand for microwave power amplifiers with even higher performance, such as power efficiency, is increasing. In this project, a new harmonic tuning circuit for class-F power amplifier based on composite right-/left-handed transmission line stub was successfully proposed. The performance and applicability of the novel harmonic tuning circuit was demonstrated by applying them to various kind of prototype circuit. For example, by applying the harmonic tuning circuit to a class-F power amplifier using 2 GHz/4 GHz-band 5W GaN FET, a drain efficiency as high as 88% was demonstrated even though the harmonic tuning circuit was considerably miniaturized compared to conventional ones. The developed method has wide range of applications for sophisticated microwave circuits required in next generation system.

研究分野：マイクロ波回路

キーワード：左手系メタマテリアル 電力増幅器 高効率 高調波処理回路

### 1. 研究開始当初の背景

携帯電話用の電力増幅器は、無線通信規格の高度化に伴い低歪化の要求が厳しくなるため、絶えず電力効率を犠牲にせざるを得ない状況に直面している。そこで実際にそのような事態になることを回避するため、次世代増幅器としてF級動作など高調波処理による高効率化の検討が盛んになされている。

一般に増幅器を含む能動素子回路ではスタブ(分岐信号線)が多用されており、F級増幅器もその例外ではない。ところが、従来型のスタブ回路はその設計手法に柔軟性がなく、特に高調波処理のために多数のスタブを必要とするF級増幅器においては、回路の大型化が実用化を阻む課題となっていた。とくに今後第5世代(5G)無線通信システムの実現・普及に向けて、マルチバンド化など機能向上と同時に、高効率化・低歪化などの高性能化と装置小型化を図らなければならない状況においては、上記課題は喫緊の課題であった。

一方、研究開始の当初において、研究代表者は特異な電磁波伝播特性を有する右手系左手系複合(CRLH)線路に着目し、これをスタブ共振器に応用することで、1/5の小型化と大幅な性能向上を実現できていた。

### 2. 研究の目的

本研究は第一の目的として、CRLH線路スタブ高調波処理回路を用いて小型なF級増幅器回路を実現できることを実証することである。さらに高調波処理回路を小型化するだけに留まらず、それをマルチバンド化したり、高調波処理回路と他の回路を共用化することで増幅器全体の小型化を図ったり、提案技術の広い応用範囲を示すことで、5G無線時代に向けて技術の有力な選択肢を示すことを目的とする。

### 3. 研究の方法

CRLH線路スタブを用いたF級増幅器の実証回路の試作にあたっては、提案手法の実用性を示すため、トランジスタとしては最先端の窒化ガリウム(GaN)電界効果トランジスタ(FET)を適用する。増幅器の動作周波数としては、現在のLTE(4G)無線通信で使われる2GHz帯のみならず、5G時代に追加されるバンドとして4GHz帯においても実用性を有することを示す。また、CRLH線路スタブの設計手法に汎用性を持たせるため、設計論を明確にし、増幅器以外の能動素子回路に本技術を展開する基盤を構築する。

### 4. 研究成果

(1)高効率マイクロ波増幅器の高調波処理をCRLH線路スタブで実現する手法を提案した。CRLH線路を用いたスタブの従来の報告例では正次数の共振モードを利用しており、CRLH線路がもつ本来の特性を活かすことができ

ていなかった。その結果、マイクロストリップ線路を使用する場合よりもサイズが大きくなる上、処理できる高調波の数も2個程度に限られていた。本手法は負次数共振を用いることを特長とし、例えば5次高調波まで処理するのに従来は4本のスタブを必要としたのに対し、1本ないし2本の超小型(従来比1/5)のスタブで実現できることを示した(図1)。負次数共振を用いることで小型化と多機能化が同時に実現できる理由は、負次数共振モードがCRLH線路のL、Cの定数が容易に制御できるためである。さらに従来のCRLH線路は信号の主線路で使われるケースが大半で、その場合はL、Cの定数はCRLH線路を伝送線路として機能させるための制約に縛られ、その結果として共振モードを自在に制御することはできなかった。しかし、CRLH線路をスタブとして用いる場合はそのような制約は一切受けないことを示し、それにより性能面だけでなく、回路の小型化という面でも増幅器を含むマイクロ波回路の進展に貢献することが実証された。

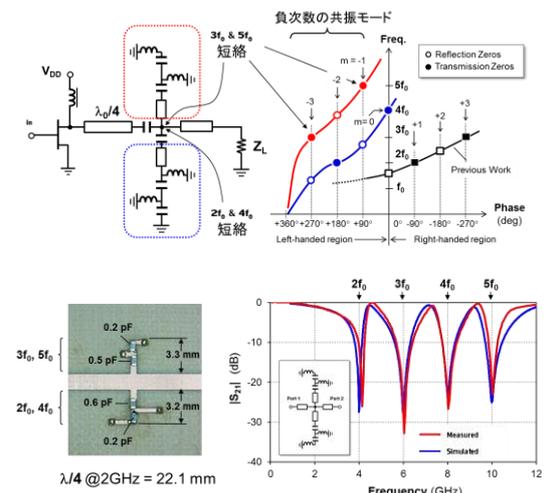


図1

(2)CRLH線路スタブを用いることで高効率かつ小型なF級増幅器が実現できることを実証した。CRLH線路スタブを用いた高調波処理回路を2GHz帯GaN HEMT増幅器に適用し、例えば5W出力、ドレイン効率88%、電力付加効率76%という高効率なF級増幅動作を確認した。(図2)

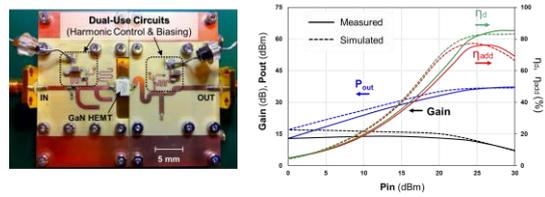


図2

5G無線への応用を念頭に、CRLH線路スタブを4GHz帯増幅器にも適用することを検討した。高い周波数帯においてはCRLH線路に

求められるキャパシタ容量は小さくなるので、外付けのチップコンデンサを用いることなくインターディジタルキャパシタなど分布定数線路の延長で作ることができることを示した。(図3) 本手法による4GHz帯F級増幅器を実際に試作し、2GHz帯増幅器と同等の性能を確認した。

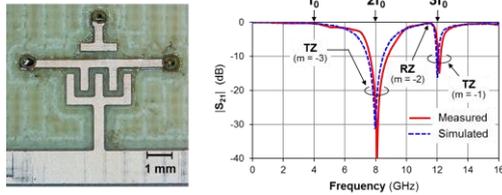


図3

また、CRLH線路スタブを用いてデュアルバンドで動作するF級増幅器を実現する方法を提案した。CRLH線路スタブは、周波数スペクトルにおいて伝送零点と反射零点の配置を自在に決めることができる。そこで0.8GHzに対応する $\lambda/4$ 線路インピーダンス変成器の途中に2.0GHzの伝送零点を生成すると同時に0.8GHzに対しては影響を及ぼさないCRLH線路スタブを配置することで、0.8GHz/2.0GHz帯に対応するデュアルバンド高調波処理回路を設計、試作回路にてその基本動作を実証した。(図4)

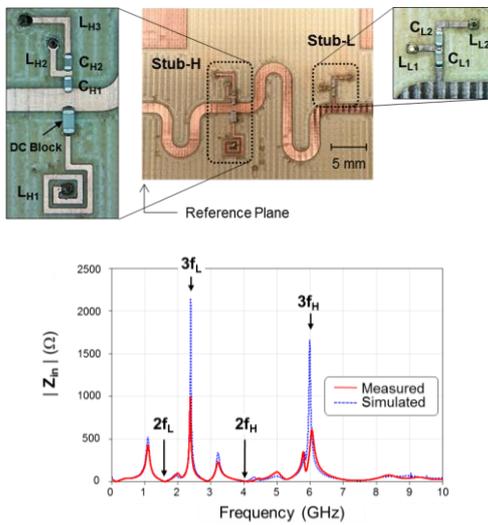


図4

CRLH線路スタブを用いることでF級高調波処理回路のスタブ部は1/5以下に小型化できることが確認できたが、インピーダンス変成回路やバイアス回路など $\lambda/4$ 線路を用いる部分が増幅器全体の小型化を阻んでいた。そこで、2次高調波、3次高調波に対して独立にインピーダンス変換を行うことができ、さらに部分的に集中定数を用いることで1/3以下に小型化可能なインピーダンス変成回路を提案した。(図5)

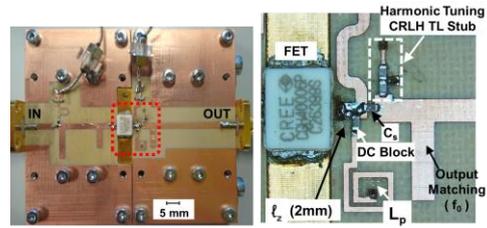


図5

さらにCRLH線路スタブにF級高調波処理とバイアス供給の機能を持たせることで、F級増幅器を更に小型できる手法を提案した。(図6) CRLH線路スタブを構成するC、Lの受動素子として、スタブの付け根から見て、直列Cを先行させるC先行型と並列Lを先行させるL先行型があるが、本提案はCRLH線路をL先行型とすることで主線路に最も近いLを給電パスとして用いることで、高調波処理回路とバイアス供給の機能を共用化することができる。本手法は実際に5W級のGaN増幅器に適用され、上述の性能を実証することができた。

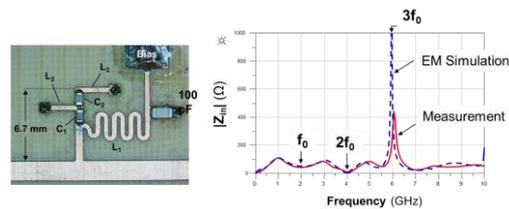


図6

5G無線通信に向けて、コンカレントデュアルバンド増幅器の需要が増している。コンカレントデュアルバンド増幅器としては、2つの周波数帯の混変調を防ぐためにユニット増幅器を分ける方が有利といわれている。その際、周波数を各々のユニット増幅器に選り分けるために必要となるのが分波器であるが、分波器の小型化のために集中定数を用いると性能が犠牲になり、性能を優先してマイクロストリップ線路を用いると回路サイズが大きくなる課題があった。そこで分波器にCRLH線路スタブを用いることで、この利害得失関係を克服することを検討した。実証回路として、特に小型化が困難となる低い周波数の0.8GHz帯/2.0GHz帯分波器を検討し、有能な結果を得ることができた。(図7)

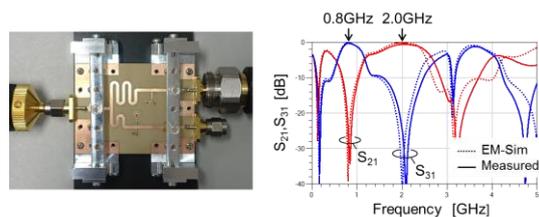


図7

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 1 件)

- ① S. Tanaka, K. Saito, T. Oka, Y. Shibosawa, "Applications of dispersion-engineered composite right-/left-handed transmission line stubs for microwave active circuits", IEICE Trans. on Electronics, 査読有, Vol. E100-C, no.10, 2017.  
[学会発表] (計 13 件)
- ① S. Tanaka, T. Oda and K. Saiki, "Novel DC-Biasing Circuits with Arbitrary Harmonic-Control Capability for Compact High-Efficiency Power Amplifiers", European Microwave Conference (EuMC), 査読有, Madrid, 2018. (採択済)
- ② 小田倫也、齋木研人、田中愼一、「CRLH 線路スタブ高調波制御/バイアス給電共用回路を用いた 2GHz 帯 GaN HEMT F 級高出力増幅器」(電子情報通信学会総合大会、査読無、C-2-25、2018 年 3 月 (東京電機大))
- ③ 齋木研人、田中愼一、「オンチップ F 級高調波処理回路を用いた高効率増幅器の検討」電子情報通信学会総合大会、査読無、C-2-26、2018 年 3 月 (東京電機大)
- ④ 馬島諒子、田中愼一、「コンカレント 2 周波増幅回路に向けた CRLH 線路小型分波器」電子情報通信学会総合大会、査読無、C-2-27 2018 年 3 月 (東京電機大)
- ⑤ T. Oda and S. Tanaka, "A Compact CRLH Transmission Line Stub Dual-Use Circuit for Harmonic-Tuning and DC-Biasing of Class-F Amplifiers," Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS), 査読有, Singapore, 2017.
- ⑥ 小田倫也、田中愼一、「F 級増幅器に向けた高調波処理/バイアス給電共用回路の検討」電子情報通信学会ソサイエティ大会、査読無、2017 年 9 月 (東京都市大)
- ⑦ 小泉聡太、田中愼一、「導体パターンのみを用いた CRLH 線路スタブ高調波処理回路による 4GHz 帯 F 級 GaN HEMT 増幅器」電子情報通信学会総合大会 C-2-7、査読無、2017 年 3 月 22 日 (名城大)
- ⑧ 志保沢洋大、田中愼一、「デュアルバンド F 級増幅器に向けた小型 CRLH 線路スタブ高調波処理回路の検討」電子情報通信学会総合大会、査読無、C-2-6 2017 年 3 月 22 日 (名城大)
- ⑨ S. Tanaka, S. Koizumi and K. Saito, "Compact Harmonic Tuning Circuits for Class-F Amplifiers Using Negative Order Resonance Modes of CRLH Stub Lines," European Microwave Conference (EuMC), 査読有, London, 2016.
- ⑩ 小泉聡太、田中愼一、「CRLH 線路スタブ F 級高調波処理回路を用いた GaN HEMT 増幅器」電子情報通信学会ソサイエティ大会、査読無、C-2-8、2016 年 9 月 20 日 (北大)

- ⑪ 小泉聡太、齊藤賢吾、田中愼一、「CRLH 線路スタブの負次数共振モードを用いた F 級増幅器に向けた小型高調波処理回路」電子情報通信学会マイクロ波研究会、査読無、2016. 3. 3 発表 (広島大学)
- ⑫ 小泉聡太、吾妻俊明、田中愼一、「CRLH 線路ダブルスタブ高調波処理回路を用いた F 級増幅器」電子情報通信学会総合大会、査読無、C-2-6、2016 年 3 月 15 日 (九州大)
- ⑬ 小泉聡太、田中愼一、「F 級増幅器に向けた CRLH スタブ高調波処理回路の小型化の検討」電子情報通信学会ソサイエティ大会、査読無、C-2-15、2015 年 9 月 9 日 (東北大)

[図書] (計 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

名称：高調波処理回路、及びそれを用いた F 級増幅回路

発明者：田中愼一、齊藤賢吾、小泉聡太

権利者：学校法人芝浦工業大学

種類：特許

番号：2015-163118

出願年月日：2015 年 8 月 20 日

国内外の別：国内

○取得状況 (計 件)

名称：

発明者：

権利者：

種類：

番号：

取得年月日：

国内外の別：

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

田中 愼一 (TANAKA, Shinichi)

芝浦工業大学工学部・教授

研究者番号：00556243

(2) 研究分担者

( )

研究者番号：

(3) 連携研究者

( )

研究者番号：

(4) 研究協力者

