

令和 6 年 6 月 19 日現在

機関番号：32619

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04181

研究課題名（和文）次世代高効率増幅器に向けたCRLH線路のみで構成される超小型高調波処理回路の実現

研究課題名（英文）Realization of extremely compact harmonic tuning circuit consisting solely of CRLH TL for next-generation high-efficiency amplifiers

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） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：携帯電話基地局の電波を増幅する電力増幅器（PA）には、今後、一層の高効率化と広帯域化が求められる。しかし、既に高密度に実装された回路に新たな機能向上の回路を追加するのは困難であった。本研究では、そのような課題を解決するため、非常に小さな回路サイズでPAの高効率化と広帯域化を実現できる右手左手系複合（CRLH）線路を用いる新しいPAを提案した。この技術をGaN HEMT PAに適用した結果、世界最高水準の電力効率を実現したほか、近年注目される連続F級増幅器の回路面積を従来よりも一桁小さくすることに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

携帯電話の無線技術は、現代社会の情報通信ネットワークの中核技術のひとつに位置付けられる。本研究の提案内容は、従来の携帯電話基地局の増幅器のサイズを増やすことなく、高効率化と広帯域化を実現することに貢献するため、従来装置との互換性を保ちながら性能向上を図れる利点がある。自然界に存在しない左手系電磁波の性質を用いるCRLH線路は従来も研究されてきたが、本研究の設計手法は独自の理論に基づいており、他者の追従を許さないものである。従って、本研究で得られた成果は学術的にも意義深いものである。

研究成果の概要（英文）：The power amplifier (PA) to amplify the radio waves of mobile phone base stations will increasingly require higher efficiency and wider bandwidth in the future. However, it is difficult to add new functional circuits to circuits that are already densely integrated. In this study, in order to solve such challenges, we propose a new PA using composite right/left-handed (CRLH) transmission lines that can achieve high efficiency and wide bandwidth of PA with very small circuit size. When this technology was applied to GaN HEMT PA, it not only achieved the world's highest level of power efficiency but also succeeded in reducing the circuit area of the recently focused continuous class F amplifiers by an order of magnitude compared to conventional methods.

研究分野：マイクロ波回路

キーワード：マイクロ波 電力増幅器 左手系メタマテリアル 電力効率 高調波処理

1. 研究開始当初の背景

社会生活に密着した移動体通信技術は常に進化が求められており、各種ハードウェアへの要求も厳しさを増している。そのうち電力増幅器は、線形動作と高効率動作のバランスをとるために回路構成が複雑なドハティー増幅器などが採用されている。今後は更なる高効率化を実現するため高調波処理技術が必須となるが、既に高密度実装された増幅器に新たな機能を組み込むためには、その専用回路を極限まで小さくする必要がある。しかし、高効率化に必要な高調波処理回路を小型化するのは容易ではない。一般にマイクロ波回路は、1GHz以下では小型化に適した集中定数回路が使われ、10GHz以上では性能面で分布定数回路が明確に有利になる(図1)。しかし、その狭間にある携帯電話の周波数(1-6GHz)では、高調波処理回路を分布定数回路で設計すると小型化が困難で、集中定数回路を使うと高調波の周波数に対応できない。申請者はこのジレンマに対処すべく第三の回路設計手法として右手/左手系複合(Composite Right-/Left-Handed; CRLH)線路を用いて高調波処理回路を小型化してきた(科研費15K06027)。その結果、図2に示すように、2本のマイクロストリップ(MS)線路スタブを使う従来手法の代わりに、極めて短い1本のCRLH線路スタブで2つの高調波を一括処理できることを実証した。さらにCRLH線路スタブにDCバイアス回路の機能も持たせ、増幅器全体の回路面積を縮小した。このように回路の小型化と多機能化を同時に実現できたのは、我々が独自に提案した非周期的な構造をもつCRLH線路によるものであった。

しかしながら、これらの高調波処理回路は依然として長いMS線路が使われており、回路を更に小型化する余地が大きかった。その大きな理由のひとつは、高調波処理の原理自体が従来の考え方から脱却していなかったためである。即ち、周波数 $f_0$ で動作する増幅器において、従来の高調波回路は $2f_0, 3f_0$ の各高調波にて①短絡形成⇒②インピーダンスを変換(短絡→ $Z_{L,opt}$ )という2ステップで最適な高調波負荷インピーダンス( $Z_{L,opt}$ )を作っていた。これまで我々が提案してきた回路では、ステップ①に相当するスタブをCRLH線路化することで小型化できたが、ステップ②に相当するMS線路はそのままでの形で残っていた。

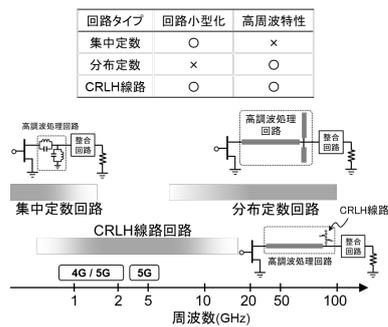


図1 CRLH線路技術の位置づけ

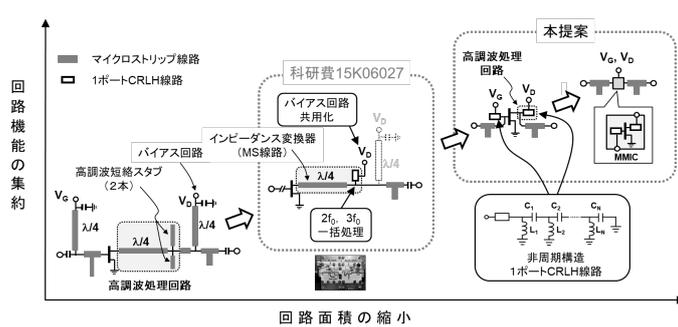


図2 高調波処理技術の開発ロードマップ

2. 研究の目的

以上の背景を踏まえて、本研究課題では、高調波処理の仕組みを根本的に変え、ワンステップで所望の高調波インピーダンスを作る手法を確立することを目標とした。このワンステップの操作の具体的な実現方法としては、超小型のCRLH線路のみで高調波処理回路を構成する(図2右)。本提案の独自性は「複数の高調波に対して如何なる高調波インピーダンスが求められても、ワンステップの操作でそれを実現する」という点にある。図3に提案内容の概念図を示す。提案する増幅器は、1ポートのCRLH線路をFETに直結させるというユニークな構成である。そのような単純な構成で任意の負荷条件に柔軟に対応し得ると考える根拠は、「非周期構造のCRLH線路を用いて左手系電磁波の非線形な位相特性を制御する」という我々の手法を応用発展できる可能性があると考えたからである。しかしながら、本研究課題を申請した時点では、実現に向けては乗り越えるべき壁が2つあった。第一の課題は、仮に1ポートCRLH線路で高調波を処理できたとして、そこから基本波 $f_0$ の出力をどのように引き出すかという問題である。そこで、 $2f_0, 3f_0$ では1ポートに見えるCRLH線路が、 $f_0$ では2ポート回路に見えるような仕組みが必要になる。その手段としては、高調波トラップフィルタを用いて基本波と高調波とでポートの切り替えを行う(図3)。第二の課題は、1ポートのCRLH線路が所望の高調波負荷条件を満たすように合理的かつ簡便な方法で設計できるかという問題である。申請者は、研究を始めた当初、すでに1ポート型のCRLH線路の分散特性を反射係数の位相に基づいて定義する新しい定義の方法を提案していた。一方、高調波のインピーダンスも反射係数の位相で定まる。そこで現在は高調波インピーダンスをCRLH線路の分散に関連付けるなどの方法により、高調波インピーダンスを制御できるのではないかとこの着想を得た(図4)。

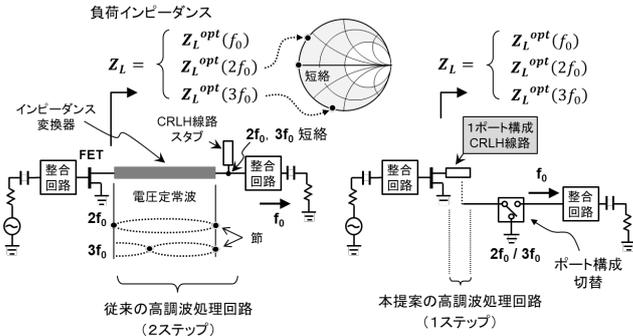


図3 提案回路の基本概念

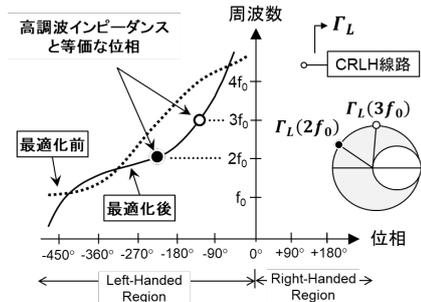


図4 回路設計方法に関する予備検討

### 3. 研究の方法

提案した回路は、動作原理が新しい概念に基づくものであることから、原理実証、性能実証、実用性実証と1年毎に研究フェーズの段階を上げて行き、3年の期間で研究を完結させることとした。具体的には、原理実証のフェーズでは理論的な裏付けと具体的設計方法を明らかにするため、単一周波数で動作する高調波処理回路を用いて高効率増幅器を実証することを目標とした。性能実証のフェーズでは、本提案の手法を最も活かせる応用として、広帯域と高効率を両立させる増幅器に着目し、CRLH線路技術を適用することとした。その理由は、この種の増幅器は広帯域・高効率という性能を実現することはできても回路面積が肥大化し、実用性が大きく損なわれる傾向があったため、CRLH線路による回路小型化の利点を活かし得ると考えたためである。最後の実用性実証のフェーズでは、提案回路が回路の小型化につながるだけでなく、従来では難しかった高調波処理の実現にも資するというを明らかにすることで、幅広い用途に応用できることを示すことを目標とした。

### 4. 研究成果

#### (1) シングルバンド増幅器での実証

提案した1ポートCRLH線路により高調波処理を施した2GHz帯GaN HEMT増幅器を試作した(図5, 6)。CRLH線路部のみ用いる高調波処理部はFETのセラミックパッケージと同程度の占有面積しか有しておらず、マイクロストリップ線路を用いる従来の高調波処理回路と比較して回路サイズをほとんど無視できる大きさにすることができた。試作回路は、2GHzにて10Wの飽和出力と最高水準の電力付加効率79.3%を達成した(図7)。

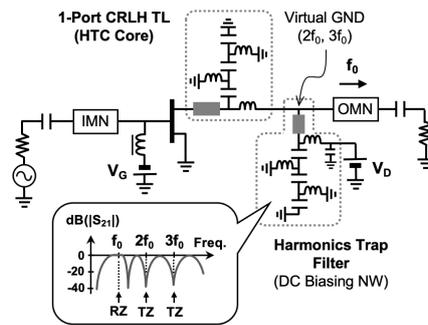


図5 2GHz帯GaN HEMT増幅器の回路構成

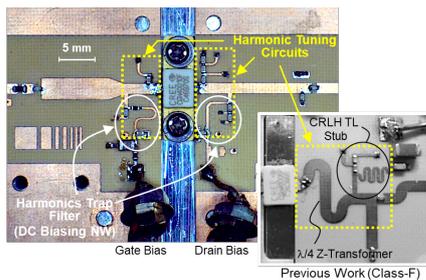


図6 試作回路器の外観写真

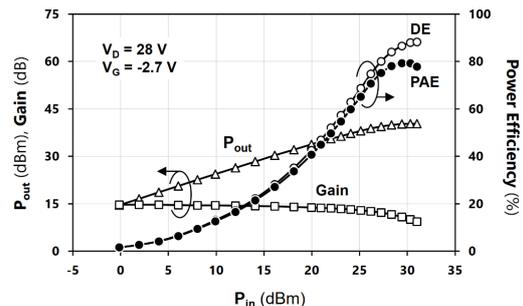


図7 試作回路の増幅器特性

(2) 世界最小サイズで連続F級増幅器を実現

次世代無線通信システムでは、電力増幅器には広い帯域で高効率動作が求められる。90年代の後半から注目されるようになった高調波処理技術は狭い帯域でしか実現できないのが難点であったが、2010年頃から広い帯域にわたって連続して高調波処理が実現できる連続F級増幅器が報告されるようになった。しかしながら、従来の連続F級増幅器は基本波から高調波にかけて最適な負荷インピーダンスを実現するためにローパスフィルタ(LPF)を用いるため、回路が肥大化するという課題を抱えていた。そこで、高調波は1ポートCRLH線路で処理し、基本波のみLPFで広帯域整合させるといった回路構成を提案した(図8, 9)。1ポートCRLH線路はほとんど任意の高調波負荷インピーダンスに対応することができる上、LPFに課せられる要求が大幅に緩和されるためLPF自体を小型化することが可能になった。これにより、従来のF級増幅器と同等もしくはそれ以下の回路サイズで連続F級増幅器を実現することが可能になった。試作した回路は1.6-2.2 GHzの約600MHzの帯域で70%以上のドレイン効率を示した(図10, 11)。これは既報告の連続F級増幅器と比較して遜色のない性能であり、それでいて回路面積は1桁小さく(図12)、連続モード増幅器の実用化に向けて大きな前進となる成果を得た。

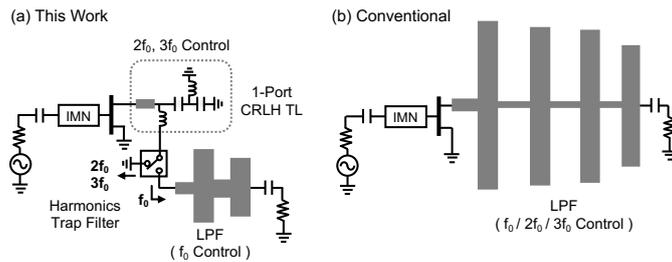


図8 連続F級増幅器の回路構成 (a) 提案 (b) 従来

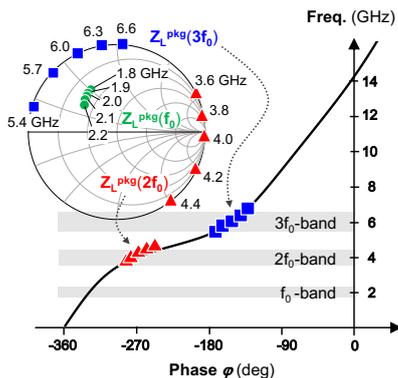


図9 CRLH線路の設計方法

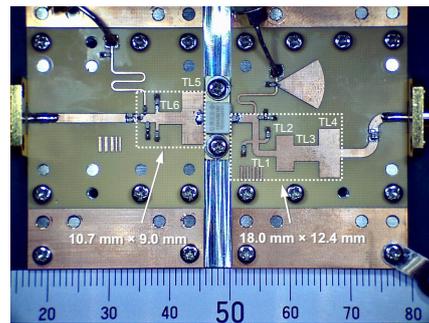


図10 試作回路器の外観写真

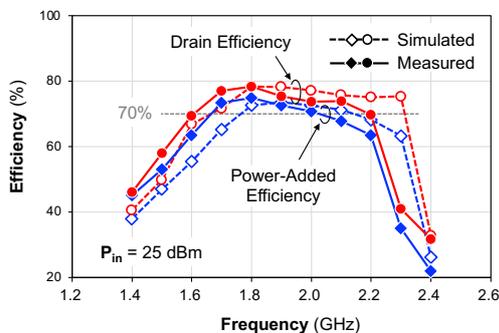


図11 試作回路の電力効率

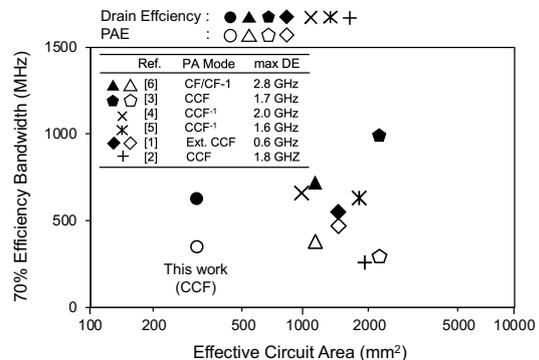


図12 ベンチマーク比較

(3) 高効率・広帯域動作の逆E級増幅器を実現

連続F級増幅器は原理は比較的簡単であるが、実際にはFETの寄生成分の影響を考慮するために設計が煩雑になるという問題がある。そこで、よりシンプルな設計方法で増幅器の高効率・広帯域動作を実現する方法として、逆E級増幅器に着目した(図13)。F級増幅器など一般に高調波処理を用いる高効率増幅器は、高調波の最適負荷インピーダンスが周波数の増加に対して

反時計回りに回転する。これはFETの寄生成分の影響を考慮すると、真性FETに最適な高調波負荷条件を与えるためにはFETの外部端子での負荷条件はそうならざるを得ないためである。その結果、周波数が中心周波数から僅かに外れるだけで負荷条件は最適条件から外れてしまい(図14(右)),狭い帯域でしか高効率が得られなくなる。一方、逆E級増幅器は広帯域な特性を示す潜在力はあるものの、FETの寄生容量を補償するための並列補償コイル( $L_{cmp}$ )を使わざるを得ないため、それが特性を狭帯域化する要因になっていた。そこで、周波数を掃引しながら最適な $L_{cmp}$ とスイッチングインダクタ( $L_s$ )の値をシミュレーションで求め、それらの値で決まる高調波負荷インピーダンスを求めると、図14(左)に示すように僅かに反時計回りに回転するもののインピーダンスの動きは最小限に抑えられることがわかった。このように周波数変化のない高調波インピーダンスをMS線路で実現するのは難しいが、CRLH線路であれば分散特性を制御することでそのような条件を満たすことは容易である(図15)。実際に試作した逆E級増幅器の外観写真を図16に示す。比較のために従来の手法で設計した逆E級増幅器も製作した。測定した電力効率の周波数依存性を図17に示す。1.80-2.24GHzの広い帯域幅(440MHz)で70%以上のドレイン効率を維持していることがわかる。このように1ポートCRLH線路を用いれば、連続モードの考え方を使わなくても簡易な設計方法で高効率・広帯域な増幅器を実現できることを実証することができた。

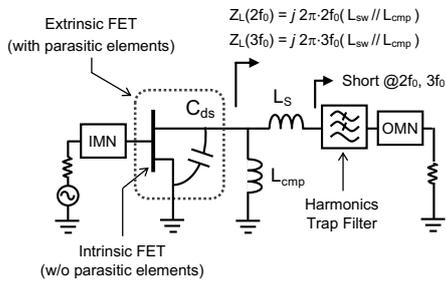


図13 提案する逆E級増幅器の設計方法

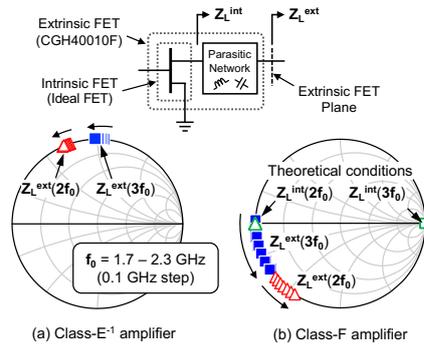


図14 高調波負荷インピーダンスの周波数依存性

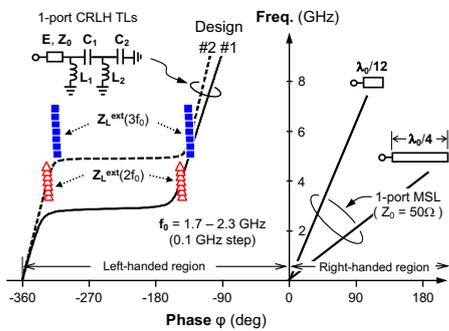


図15 CRLH線路の分散特性

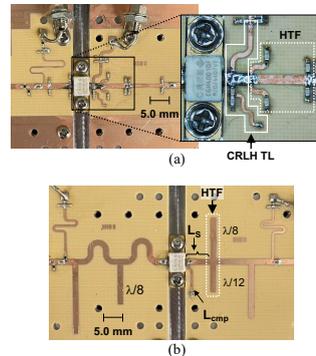


図16 ベンチマーク比較 ((a)提案手法 (b)従来手法)

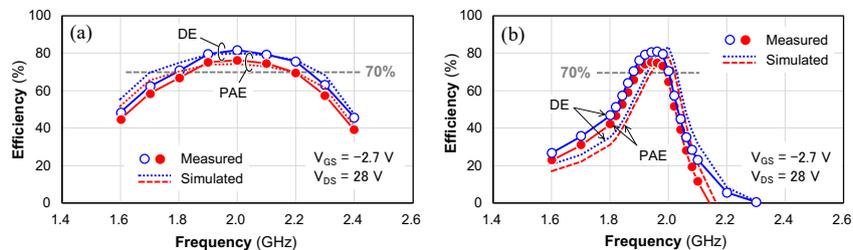


図17 逆E級増幅器の電力効率  
(a)提案回路 (b)従来回路

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 S. Tanaka, H. Asami, T. Suzuki	4. 巻 E105-C
2. 論文標題 Class-E Power Amplifier with Improved PAE Bandwidth Using Double CRLH TL Stub for Harmonic Tuning	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEICE Transaction on Electronics	6. 最初と最後の頁 441-448
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/transele.2022MMI0002	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計15件（うち招待講演 1件/うち国際学会 5件）

1. 発表者名 川島雪永, 田中慎一
2. 発表標題 1ポートCRLH線路を用いて広帯域で高調波処理を施した1.8-2.2GHz帯逆E級高出力増幅器
3. 学会等名 電子情報通信学会マイクロ波研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Y. Kawashima and S. Tanaka
2. 発表標題 A Compact 2-GHz Band Inverse Class-E Power Amplifier With >70% Efficiency Over 440-MHz Bandwidth
3. 学会等名 European Microwave Conference 2024 (EuMC2024) (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 S. Tanaka, E. Tsuji
2. 発表標題 A 1.6-2.2 GHz Continuous Class-F Power Amplifier with Compact Harmonically Controlled Networks
3. 学会等名 European Microwave Conference 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 E. Tsuji, S. Tanaka
2. 発表標題 1.8-2.2 GHz Continuous GaN HEMT Class-F Amplifier Using 1-Port CRLH TL
3. 学会等名 Topical Symposium on Heterostructure Microelectronics 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 辻恵梨, 田中慎一
2. 発表標題 連続高調波処理CRLH線路を用いた 1.6-2.2GHz帯 10W高効率増幅器
3. 学会等名 電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 最上椋太, 辻恵梨, 田中慎一
2. 発表標題 1 ポート CRLH 線路の分散制御による高効率電力増幅器の帯域改善
3. 学会等名 電子情報通信学会マイクロ波研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 辻恵梨, 青沼奏志, 田中慎一
2. 発表標題 1 ポート CRLH 線路を用いる連続 F 級/逆 F 級動作 2GHz 帯 GaN HEMT 電力増幅器
3. 学会等名 電子情報通信学会マイクロ波研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Shinichi Tanaka, Naoaki Iisaka
2. 発表標題 A 2-GHz 79%-PAE Power Amplifier with a Novel Harmonic Tuning Circuit Using Only CRLH TLs
3. 学会等名 European Microwave Conference 2021 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 辻恵梨, 田中慎一
2. 発表標題 CRLH 線路を用いる連続 F 級モード電力増幅器の検討
3. 学会等名 電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 川島雪永, 田中慎一
2. 発表標題 1ポートCRLH線路を用いる広帯域・高効率逆E級増幅器の検討
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 鈴木貴大, 田中慎一
2. 発表標題 入力側高調波処理がFET増幅器の電力効率に影響する条件について
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 辻恵梨, 田中愼一
2. 発表標題 1 ポートCRLH線路を用いる 1.8-2.2GHz帯連続F級増幅器の設計
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 川島雪永, 田中愼一
2. 発表標題 1ポートCRLH線路を用いて広帯域で高調波処理を施した1.8-2.2GHz帯逆E級高出力増幅器
3. 学会等名 電子情報通信学会マイクロ波研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yukinaga Kawashima, Shinichi Tanaka
2. 発表標題 A Compact 2-GHz Band Inverse Class-E Power Amplifier With >70% Efficiency Over 440-MHz Bandwidth
3. 学会等名 European Microwave Conference 2024 (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 田中愼一
2. 発表標題 連続モード高調波処理技術による高効率電力増幅器の広帯域化
3. 学会等名 Microwave Workshop & Exhibition 2023 (MWE2023) (招待講演)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------