

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 22 日現在

機関番号：12612
研究種目：基盤研究(B) (一般)
研究期間：2014～2016
課題番号：26289100
研究課題名(和文)アレイ化カスコード線形ドハティ増幅器

研究課題名(英文)Arrayed Cascode Linear Doherty Amplifier

研究代表者

本城 和彦 (Honjo, Kazuhiko)

電気通信大学・情報理工学(系)研究科・教授

研究者番号：90334573

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,000,000円

研究成果の概要(和文)：アレイ化カスコード線形ドハティ増幅器を実現するため、基本セル構造となる独立バイアス型のInGaP/GaAs HBT 3段カスコードMMICとAlGaIn/GaN HEMT 3段カスコードMMICを設計・試作した。HBTMMICでは非独立バイアス型に比べて電力利得は10dB以上、アイソレーションは23dB以上改善され、電力効率特性とひずみ特性も独立に最適化調整できることが実験的に確認された。HEMT MMICでも同様の効果が確認された。このようなセルを2つ用いてドハティ増幅器を構成したところ、出力バックオフ5dB以上の領域で付加電力効率の改善がシミュレーションで確認され、本手法の有効性が示された。

研究成果の概要(英文)：In order to realize an arrayed cascode linear Doherty amplifier, we designed and fabricated an independent bias type InGaP / GaAs HBT three-stage cascode MMIC and AlGaIn / GaN HEMT three-stage cascode MMIC as a basic cell structure. In HBTMMIC, the power gain was improved by more than 10 dB, the isolation was improved by more than 23 dB, and it was confirmed experimentally that the power efficiency characteristic and the distortion characteristic can be optimized and adjusted independently as compared with the nonindependent bias type. The same effect was confirmed with HEMT MMIC. We constructed Doherty amplifiers using two such cells, and the improvement of the power added efficiency was confirmed by simulation in the area of output backoff of 5 dB or more, and the effectiveness of this method was shown.

研究分野：マイクロ波工学

キーワード：マイクロ波 ミリ波 電力増幅器 線形性 高効率

1. 研究開始当初の背景

複数トランジスタ複合回路の例であるカスコード (Cascading to Cathode の略) 増幅器では、ソース (エミッタ) 接地トランジスタのドレーン (コレクタ) 電極をゲート (ベース) 接地された次段トランジスタのソース (エミッタ) 電極に接続されており、初段トランジスタに誘発された電流を縦積みされた高インピーダンスの電流バッファ回路に導入している。このため出力内部抵抗の増大による高電力利得化、ミラー効果軽減による広帯域化、縦積み構造による高耐圧化が計れるというメリットの一方で、接続部電位がフローティングとなるため動作が不安定であるといった欠点を有していた。これに対してこれまで応募者らが提案してきた独立バイアス型カスコード増幅器では、当該接続部に外部からバイアス電圧を供給し電位を固定するため、これまでのカスコード増幅器としての特徴に加えて動作の安定性が確保されるため、電力効率とひずみ特性をそれぞれ最適化できトレードオフ特性を大きく改善できることを見出した。この様なこれまでの知見をベースに、マイクロ波増幅器のバックオフを大きくとったときに、電力効率とひずみ特性のトレードオフ関係から開放される新しい増幅器の着想を得た。

2. 研究の目的

広い出力バックオフレンジにおいて、線形性を損なわずに電力効率を大きく保つことができる $n \times n$ アレイ化カスコードドハティ増幅器を提案し、設計理論を確立する。本提案増幅器では、複雑な信号パスにより生成される電気メモリ効果や熱メモリ効果の影響を複雑に受けるので、これまで応募者が提案してきたボルテラ級数を用いた熱メモリ効果補償回路を一般化し、本提案の増幅器に導入する。また基本波だけでなく高調波の終端条件が増幅器電力効率に大きく影響することを考慮して設計を行う。増幅器試作においては、コア部は MMIC プロセスにより作製し、周辺部は HIC により作製する。マイクロ波帯増幅動作実験により有効性を確認する。このような増幅器により、次世代デジタル無線送信機に要求される究極的性能を提供することができる。

3. 研究の方法

$n \times n$ アレイ化カスコードドハティ増幅器を実現するために、先ず GaNHEMT, GaAs pHEMT, InGaP HBT に対して熱応答を含む高精度大信号モデリングを実施し正確なデバイスパラメータを得る。増幅器試作は第一ステップとして 2×2 アレイに相当する独立バイアス型カスコード増幅器を用いたドハティ増幅器を試作評価し、出力バックオフ時に、ひずみと効率との間の

トレードオフが解消されることを実験的に確認する。次にこれを 3×3 アレイ構成に拡張し、シミュレーションで特性を予測するとともに、MMIC プロセスならびに HIC プロセスの両方を用いて増幅器モジュール全体を試作し、マイクロ波評価を行い、有効性を確認する。アレイ化カスコード増幅器設計理論を $n \times n$ ($n > 3$) に拡張し理論体系を完成させる。さらに半導体スイッチ等を用いたリコンフィギュラブル化を目指した基礎検討も行う。

4. 研究成果

先ず、熱特性を考慮した InGaP/GaAsHBT ならびに AlGaIn/GaN HEMT の大信号モデルパラメータを抽出し、最適負荷インピーダンス推定法ならびに多段熱等価回路モデル抽出法を提案した。これらをベースにして、アレイ化カスコードドハティ増幅器を実現する上での基本増幅セルとなる独立バイアス型 3 段カスコード MMIC チップを InGaP/GaAsHBT プロセスならびに AlGaIn/GaN HEMT プロセスを用いて設計試作し、本セル構造に期待されるアイソレーション特性の改善ならびにマイクロ波電力増幅諸特性の独立制御に関して実験とシミュレーションの両面から検討を行った。この結果、独立バイアス型 InGaP/GaAs HBT 3 段カスコード MMIC チップのマイクロ波実験により、従来の非独立バイアス型に比べて 1.5~2.5GHz の周波数に亘って計算で予測されたとおり、10dB 以上高い最大有能電力利得 (40~45dB) が実現できることが分かり、アイソレーションに関しても同帯域で 23dB 以上改善され -90dB が得られた。また本構造では、マイクロ波能動素子特性として重要な電力効率特性とひずみ特性をそれぞれ独立に最適化調整できることも明らかとなり、52% の最大付加電力効率が確認された。加えて、独立バイアス型 3 段カスコード AlGaIn/GaN HEMT の基本動作実験を行ったところ、第一ゲートバイアスは付加電力効率、3 次相互変調ひずみ、および出力電力に大きく影響を与える一方で、第三ゲートバイアスは 3 次相互変調ひずみのみに関与すること、さらに第一ドレーン電圧は 3 次相互変調ひずみには関与しないが、付加電力効率と出力に大きく影響を与えることなどが明らかとなった。これにより 1W の出力、最大付加電力効率 48%、20dB の電力利得、5 dB 出力バックオフ時に -30dBc の 3 次相互変調ひずみが得られた。

ドハティ構成の増幅器を MMIC 化した場合、平衡モードからなる基本増幅モードに対して、増幅器の不安定要因となる奇 (閉ループ) モードを十分抑制しないと、MMIC ドハティ増幅器の本来の広帯域特性が実現されないことを明らかにした。さらにこの奇モードを抑制するための解析方法を提案するとともに、奇モードループを MMIC 内で抑制する安定化バイアス回路を提案した。この安定化バイア

ス回路を、具体的に CASCODE 構成を用いない構成の 6GHz 帯 pHEMTMMIC ドハティ増幅器に適用した結果、6.1~6.8GHz の広帯域に亘って 10dB 入力バックオフ時の付加電力効率が 40%以上という高性能が得られ、従来の 2 倍の広帯域化を達成した。この増幅器安定化技術はドハティ増幅器以外にも、第五世代移動体通信で用いられるコンカレントデュアルバンドなどにも応用できる。また、将来アレイ化構成を可変切り替えるために、高域通過/低域通過電子切り替え型半導体スイッチ構造に関しても新しい知見を得た。

開発された独立バイアス型 3 段カスコード MMIC 基本セル 2 組をハーモニックバランスシミュレーションにより並列負荷変調ドハティ合成し、一方をキャリア増幅器となるようにバイアスし、他方をピーク増幅器となるようにバイアスすると、独立バイアス 3 段カスコード MMIC 基本セルと比べて、出力バックオフが 5dB 以上の領域で優位な付加電力効率を維持することが示され、本提案の手法が優れていることが明らかとなった。n × n アレイ化カスコードドハティ増幅器の実用化にはまだ残された課題があるが、本研究により、本手法の有効性が確認された。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 8 件)

- (1) Manh Duy Luong, Ryo Ishikawa, Yoichiro Takayama, Kazuhiko Honjo, "Microwave Characteristics of an Independently Biased 3-stack InGaP/GaAs HBT Configuration," IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular papers, vol. 64, No. 5, pp. 1140-1151, May 2017. [10.1109/TCSI.2016.2637406](https://doi.org/10.1109/TCSI.2016.2637406)
- (2) 陶堯、石川亮、本城和彦,"低周波アクティブロード・プル評価に基づくマイクロ波高効率増幅器設計法— ートランジスタ内寄生容量の非線形性考慮による高精度化— (招待論文)," 電子情報通信学会和文論文誌 C, vol. 99-C, No. 12, pp. 651-658, Dec. 2016
- (3) Ryo Ishikawa, Yoichiro Takayama, Kazuhiko Honjo, "Experimental Design Method for High-Efficiency Microwave Power Amplifiers Based on a Low-Frequency Active Harmonic Load-Pull Technique," IEICE Transactions on Electronics, vol. 99-C, No. 10, pp. 1147-1155, Oct. 2016 [10.1587/transele.E99.C.1147](https://doi.org/10.1587/transele.E99.C.1147)
- (4) Tsuyoshi Yoshida, Yoichiro Takayama, Ryo Ishikawa, Kazuhiko Honjo, "Miniature Design Technique of Stabilized C-Band p-HEMT MMIC Doherty Power Amplifier with Lumped Element Load Modulator," IEICE Transactions on Electronics, vol. 99-C, No. 10, pp.

1130-1139, Oct. 2016

[10.1587/transele.E99.C.1130](https://doi.org/10.1587/transele.E99.C.1130)

- (5) 本城和彦, 高山洋一郎, 石川亮, "マイクロ波電力増幅器の統一的設計理論とその応用 (招待論文)," 電子情報通信学会和文論文誌 C, Vol. J97-C, No. 12, pp. 446-455, Dec. 2015
- (6) 吉田慎悟, 石川亮, 本城和彦, 熱メモリ効果解析のための大信号 HEMT モデル用多段はしご型 RC 熱回路のパルス応答評価による実験的パラメータ抽出手法," 電子情報通信学会和文論文誌 C, Vol. J97-C, No. 12, pp. 456-462, Dec. 2015
- (7) Duy Manh Luong, Yoichiro Takayama, Ryo Ishikawa, Kazuhiko Honjo, "Power Gain Performance of Independently Biased HBT CASCODE Chip," Japanese Journal of Applied Physics, vol. 54(04DF11), pp. 1-8, Mar. 2015 [10.7567/JJAP.54.04DF11](https://doi.org/10.7567/JJAP.54.04DF11)
- (8) Shintaro Watanabe, Yoichiro Takayama, Ryo Ishikawa, Kazuhiko Honjo, "A Miniature Broadband Doherty Power Amplifier With a Series-Connected Load," IEEE Transactions on MTT, Vol. 63, No. 2, pp. 572-579, Feb. 2015 [10.1109/TMTT.2014.2377725](https://doi.org/10.1109/TMTT.2014.2377725)

[学会発表] (計 18 件)

- (9) 眞下和樹, 石川亮, 本城和彦, "4.5/4.9 GHz 帯域可変型 GaN HEMT 高効率増幅器の基礎検討," 2017 年電子情報通信学会総合全国大会, C-2-9, 名城大 (名古屋市), 2017 年 3 月 23 日
- (10) 丸山有慧, 高山洋一郎, 石川亮, 本城和彦, "単一 GaNHEMT を用いたデュアルバンド電力増幅器における 2 周波同時増幅時の大信号特性の検討及び線形性改善," 電子情報通信学会技術研究報告, マイクロ波研究会, MW2016-139, 防衛大 (横須賀市), 2016 年 12 月 15 日
- (11) 西沢永, 榎本純, 高山洋一郎, 石川亮, 本城和彦, "2 増幅回路結合構成コンカレントデュアルバンド電力増幅器," 電子情報通信学会技術研究報告, マイクロ波研究会, MW2016-140, 防衛大 (横須賀市), 2016 年 12 月 15 日
- (12) Hiroshi Mizutani, Ryo Ishikawa, and Kazuhiko Honjo, "GaN SPST MMIC Switches Based on HPF/LPF Switching Concept for High Power Applications," Proceedings of 46th European Microwave Conference, pp. 691-694, London (UK), Oct. 5, 2016 [10.1109/EuMC.2016.7824437](https://doi.org/10.1109/EuMC.2016.7824437)
- (13) Kazuhiko Honjo, Ryo Ishikawa, "High Efficiency GaN HEMT Power Amplifier /Rectifier Module Design Using Time Reversal Duality (Invited Paper)," 2015 IEEE CSICS, Dig. pp. 227-230, New Orleans (USA), Oct. 14, 2015 [10.1109/CSICS.2015.7314507](https://doi.org/10.1109/CSICS.2015.7314507)

- (14) D. M. Luong, Y. Takayama, R. Ishikawa, K. Honjo, "Power gain mechanism of single electron transistor (SET) in comparison that of heterojunction bipolar transistor (HBT)," 2015 Energy Materials Nanotechnology (EVN) Meeting on Vacuum Electronics, Las Vegas (USA), Nov. 21, 2015
- (15) Jun Enomoto, Haruka Nishizawa, Ryo Ishikawa, Yoichiro Takayama, and Kazuhiko Honjo, "Parallel Combination of High-Efficiency Amplifiers with Spurious Rejection for Concurrent Multiband Operation," Proceedings of 46th European Microwave Conference, pp. 1075-1078, London (UK), Oct. 5, 2016. [10.1109/EuMC.2016.7824533](https://doi.org/10.1109/EuMC.2016.7824533)
- (16) Yao Tao, Ryo Ishikawa, Kazuhiko Honjo "Optimum Load Impedance Estimation for High-Efficiency Microwave Power Amplifier Based on Low-Frequency Active Multi-Harmonic Load-Pull Measurement," Proceedings of 2015 Asia Pacific Microwave Conference, 1, pp. 1-3, Nanjing (China), Dec. 6 2015 [10.1109/APMC.2015.7411814](https://doi.org/10.1109/APMC.2015.7411814)
- (17) Ryo Ishikawa, Kazuhiko Honjo, "High-Efficiency DC-to-RF /RF-to-DC Inter conversion Switching Module at C-Band," Proceedings of 45th European Microwave Conference, pp. 295-298, Paris (France), Sept. 8, 2015. [10.1109/EuMC.2015.7345758](https://doi.org/10.1109/EuMC.2015.7345758)
- (18) Hiroshi Mizutani, Ryo Ishikawa, Kazuhiko Honjo, "High Isolation MMIC Switch Design Technique Based on Novel High-/Low-Pass Switch Concept," Proceedings of 45th European Microwave Conference, pp 56-59, Paris (France), Sept. 8, 2015. [10.1109/EuMC.2015.7345698](https://doi.org/10.1109/EuMC.2015.7345698)
- (19) Akira Saitou, Ryo Ishikawa, Kazuhiko Honjo, "Analytical expression of broadband characteristics for wide-angle planar sectorial antennas" IEEE-APS Topical Conference on Antennas and Propagation in Wireless Communications, pp. 235-238, Torino (Italy), Sept. 7, 2015 [10.1109/APWC.2015.7300151](https://doi.org/10.1109/APWC.2015.7300151)
- (20) 榎本純, 石川亮, 本城和彦, "高調波処理を含む入出力整合回路の周波数特性を考慮した高効率 GaNHEMT 電力増幅器の広帯域設計 (招待講演)," 2015 年電子情報通信学会ソサイエティ大会, CT-1-2, 東北大学 (仙台市) 2015 年 9 月 9 日
- (21) 陶堯, 石川亮, 本城和彦, "寄生非線型容量を考慮した低周波トランジスタ真性部特性抽出による高効率マイクロ波増幅器設計," 2015 年電子情報通信学会ソサイエティ大会, C-2-14, 東北大学 (仙台市), 2015 年 9 月 9 日
- (22) Yosuke Iguchi, Yoichiro Takayama, Ryo Ishikawa, Kazuhiko Honjo, "Two Signal Power Level Design for Shunt-Connected Type GaN HEMT Doherty Power Amplifier without a Quarter-Wave Inverter," Proceedings of 2014 Asia Pacific Microwave Conference, FR2B-4, pp.1004 -1006, Sendai International Center (Sendai), Nov. 2014
- (23) Luong Duy Manh, Yoichiro Takayama, Ryo Ishikawa, Kazuhiko Honjo, "Comparison of Power Gain Performance between Conventional and Independently Biased HBT Cascode Chips," SSDM2014, PS-6-1, pp.120-121, International Congress Center (Tsukuba City) Sept.10, 2014
- (24) 吉田剛, 高山洋一郎, 石川亮, 本城和彦, "小型広帯域高効率 C 帯 GaAs pHEMT MMIC ドハティ増幅器," 2014 年電子情報通信学会ソサイエティ大会, C-2-18, 徳島大学 (徳島市), 2014 年 9 月 23 日
- (25) 石川亮, 本城和彦 "GaN 素子対応 MHz 帯高調波アクティブロードプルによる高効率増幅器設計," 2014 年電子情報通信学会ソサイエティ大会, C-2-15, 徳島大学 (徳島市), 2014 年 9 月 23 日
- (26) 吉田剛, 高山洋一郎, 石川亮, 本城和彦, "インピーダンス反転回路を用いない広帯域高効率 C 帯 GaAs pHEMT ドハティ増幅器 MMIC, 電子情報通信学会技術研究報告, マイクロ波研究会 (MW2014-103), 114/ 267, 秋田県立大学 (由利本荘市), 2014 年 10 月 23 日
- [図書] (計 0 件)
[産業財産権]
○出願状況 (計 0 件)
○取得状況 (計 1 件)
名称: ドハティ増幅回路
発明者: 高山洋一郎, 本城和彦
権利者: 電気通信大学
種類: 登録特許
番号: 特許第 5924730 号
取得年月日: 平成 28 年 4 月 28 日
国内外の別: 日本
[その他] なし
6. 研究組織
(1) 研究代表者
本城 和彦 (HONJO Kazuhiko)
電気通信大学・大学院情報理工学研究所・教授
研究者番号: 90334573
(2) 研究分担者 なし
(3) 連携研究者 なし
(4) 研究協力者 なし