

通信用増幅器の基礎と適用事例紹介

Fundamentals and Examples of Power Amplifiers for Wireless Communications

齋木 研人 坂田 修一 小松崎 優治 鳥居 拓真 新庄 真太郎
Kento SAIKI Shuichi SAKATA Yuji KOMATSUZAKI Takuma TORII and Shintaro SHINJO

三菱電機株式会社
Mitsubishi Electric Corp.

概要

通信用途に用いられる高周波電力増幅器は、広帯域信号、複数周波数帯に対応するための広帯域動作と、低消費電力化のための高効率動作を両立すること、さらにはピーク対平均電力比(PAPR: Peak-to-Average Power Ratio)の大きい信号に対する高効率動作を実現することが強く求められる。特に、近年普及している第5世代移動体通信(5G)では、それよりも前の世代で使用される変調信号よりも PAPR が大きく、かつ帯域が広い変調信号が使用される。このような PAPR の大きな信号を高効率に増幅する技術として、ドハティ増幅器とエンベロップ・トラッキング増幅器が注目されてきた。本稿では、それらの増幅器における広帯域化の課題を解決する手法として、周波数補償回路の適用によるドハティ増幅器の広帯域化とソフトスイッチング技術を用いたエンベロップ・トラッキング増幅器の広帯域変調信号下における高効率化について解説し、それぞれ試作結果および評価結果を報告する。

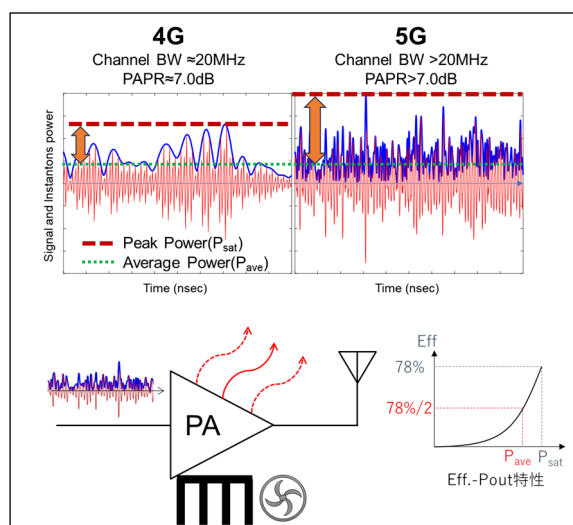


図1 通信用増幅器の動作

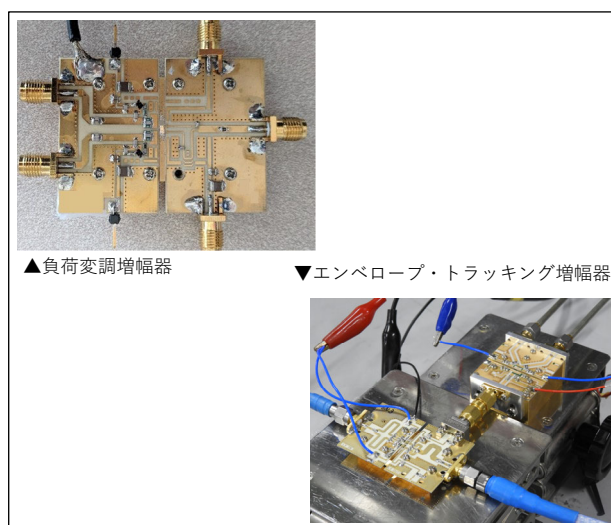


図2 通信用増幅器の例

Abstract

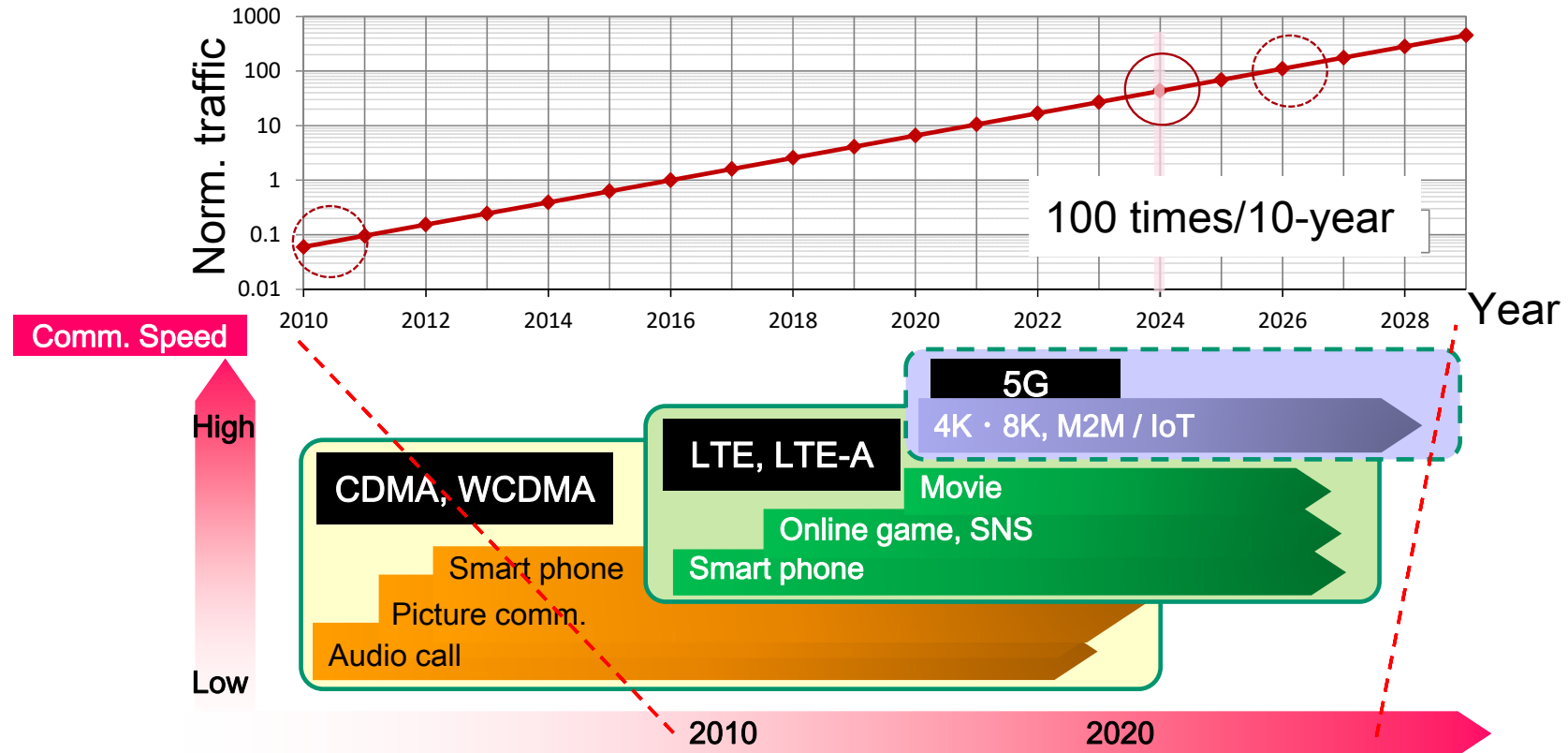
The high-frequency power amplifiers used for communication purposes are strongly required to achieve both wideband operation to accommodate wideband signals and multiple frequency bands, as well as high-efficiency operation for low power consumption. Furthermore, there is a significant demand for high-efficiency operation for signals with a large Peak-to-Average Power Ratio (PAPR). In particular, the modulation signals used in the recently popularized fifth-generation mobile communication (5G) exhibit both high PAPR and wide bandwidth. Technologies such as Doherty amplifiers and Envelope Tracking amplifiers have been focused on for efficiently amplifying such high PAPR signals. This paper discusses methods to address these challenges, specifically the wideband enhancement of Doherty amplifiers and the efficiency improvement of Envelope Tracking amplifiers.

MWE2025 基礎講座 FR1A

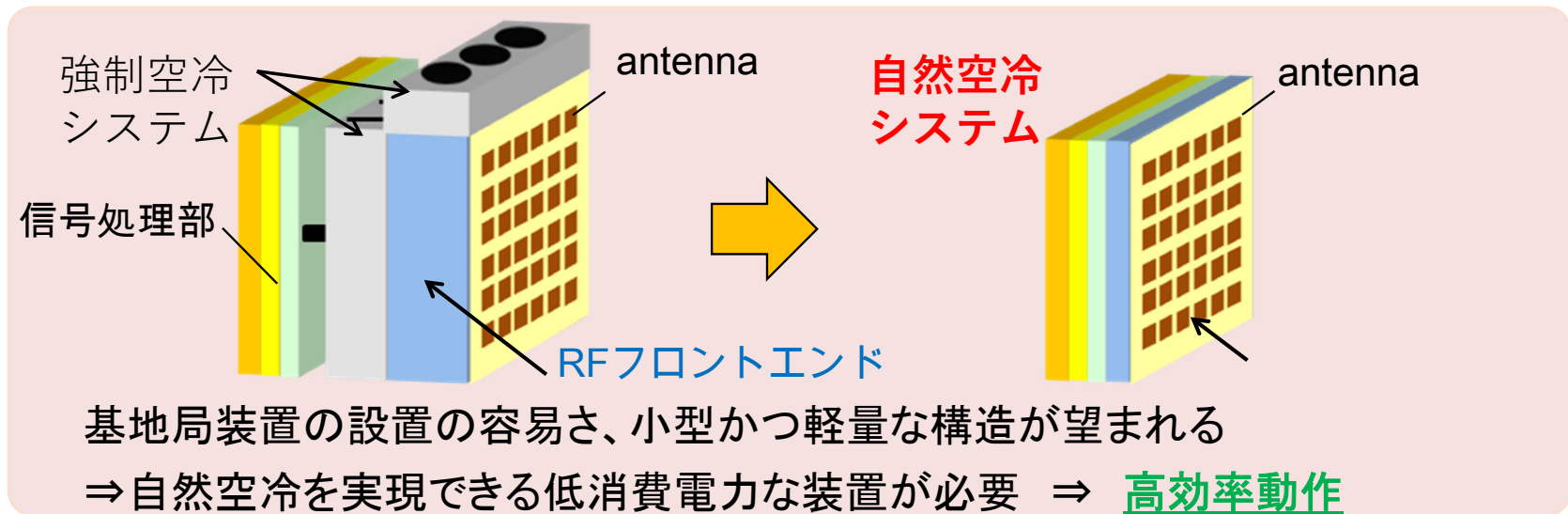
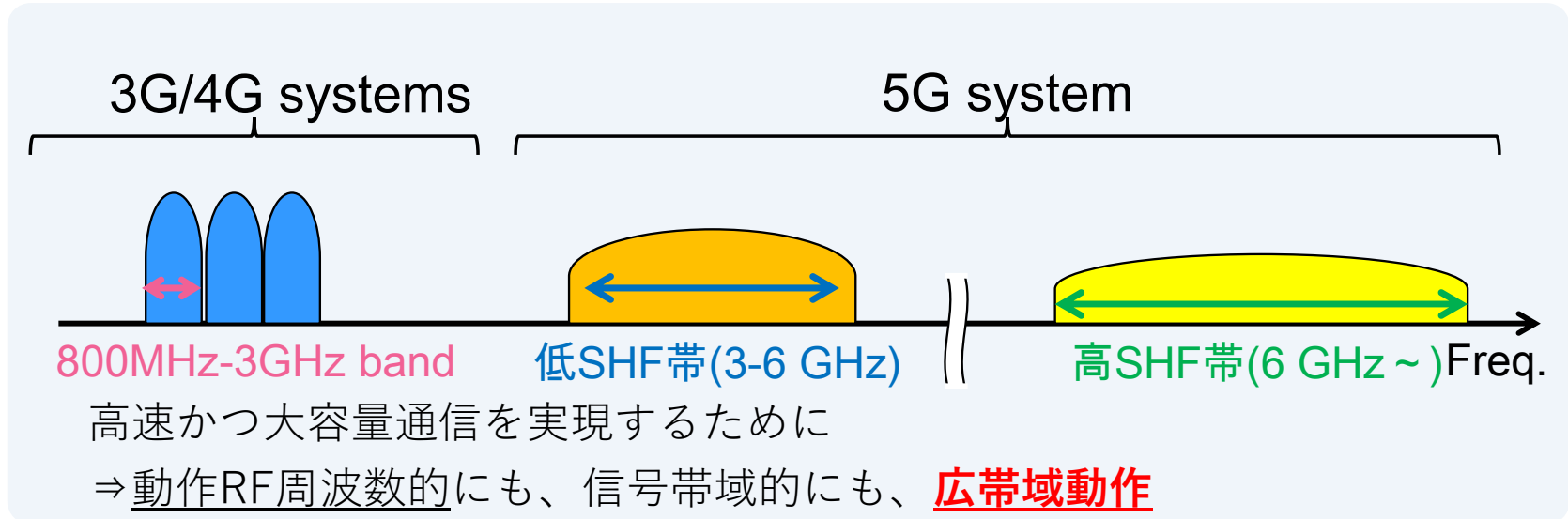
通信用電力増幅器の基礎と適用事例紹介

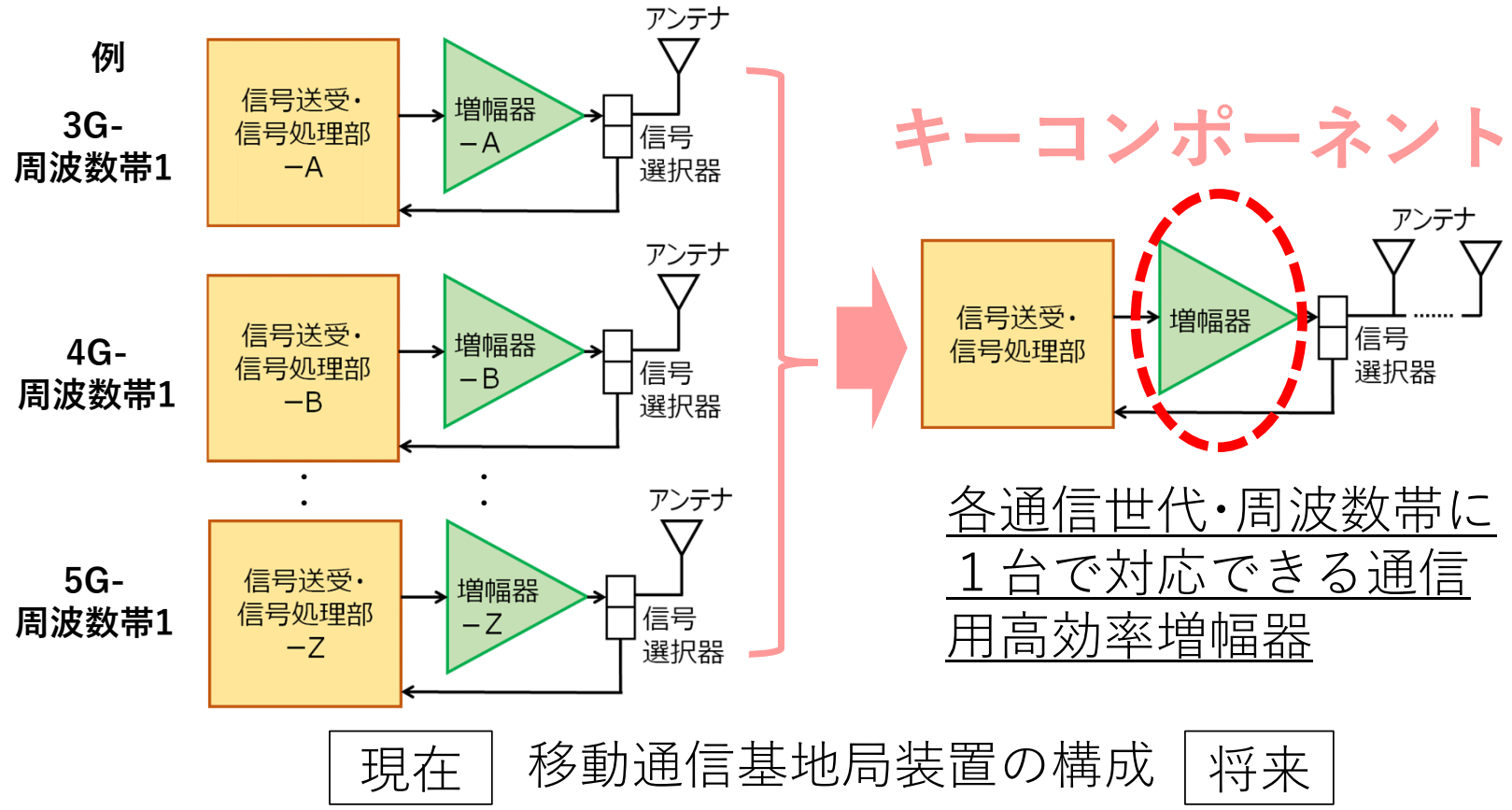
Fundamentals and Examples of Power Amplifiers for
Wireless Communications

齋木 研人, 坂田 修一, 小松崎 優治, 鳥居 拓真, 新庄 真太郎
三菱電機株式会社 情報技術総合研究所



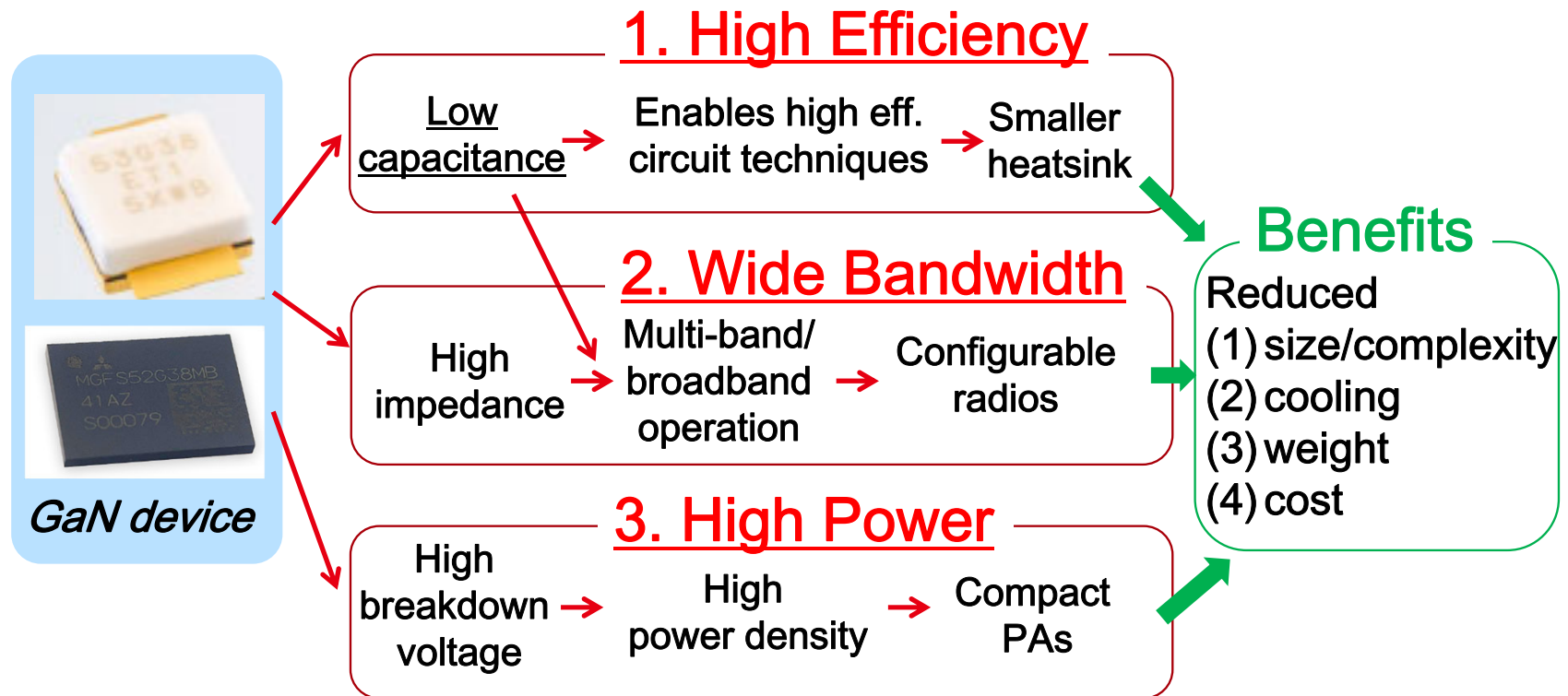
2026年には2010年に対してトラフィック量が1000倍増加
⇒更なる高速大容量通信が要求される





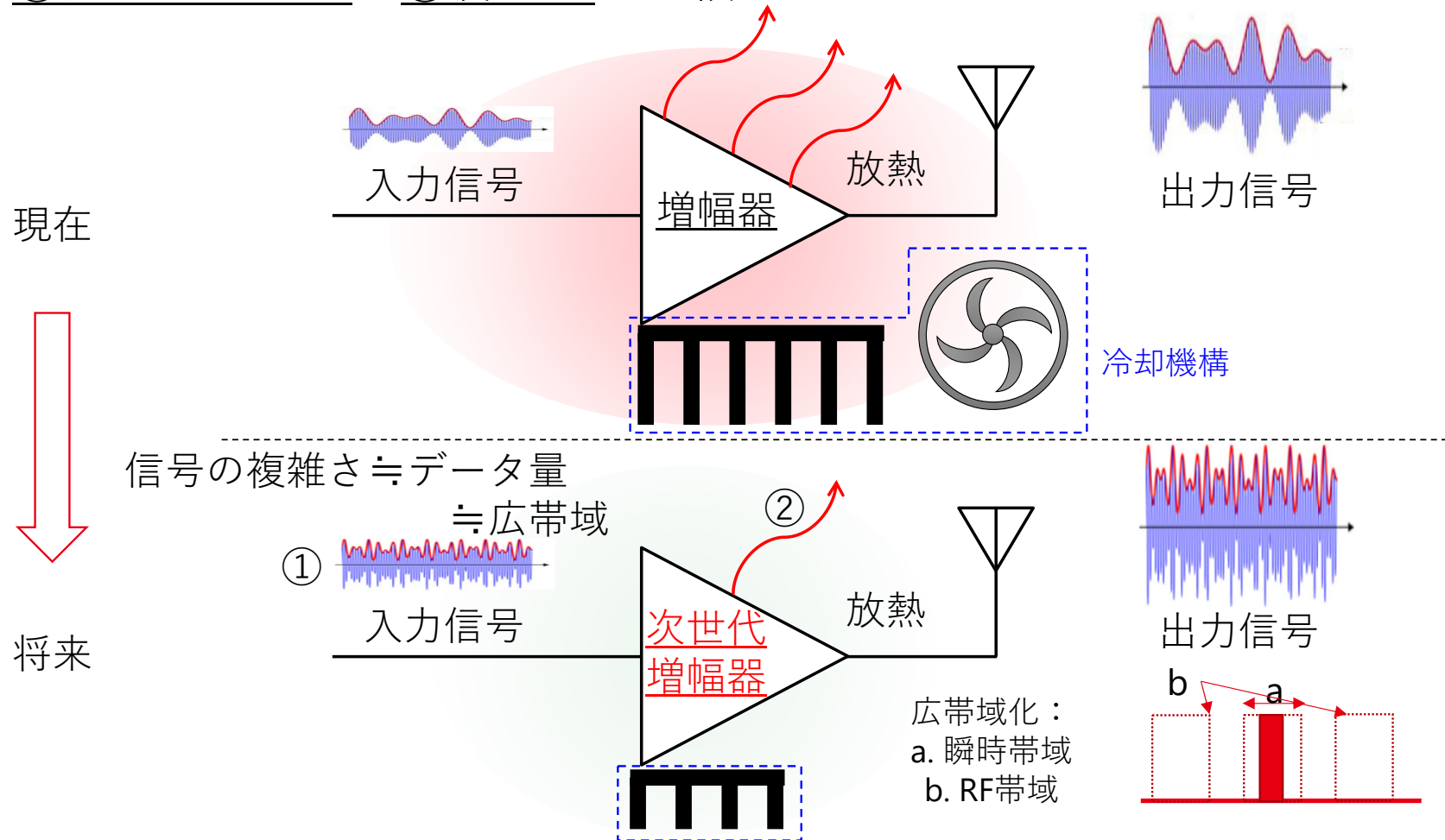
- ① 広帯域動作 ⇒ 基地局の大容量通信化
- ② 高効率動作 ⇒ 基地局の低消費電力化

高い出力電力・効率に加え、広い周波数帯域をカバーする広帯域性の実現
⇒ 高効率・広帯域・高出力なGaNデバイスを使用

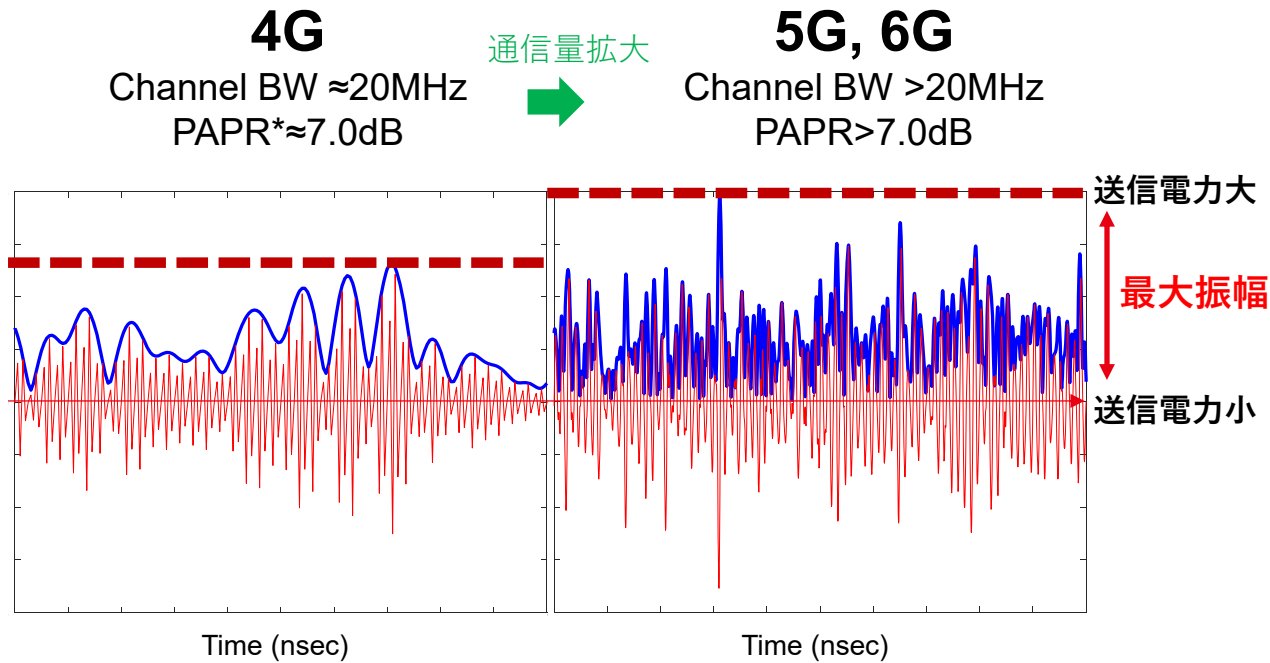


通信用高効率増幅器の動作原理1

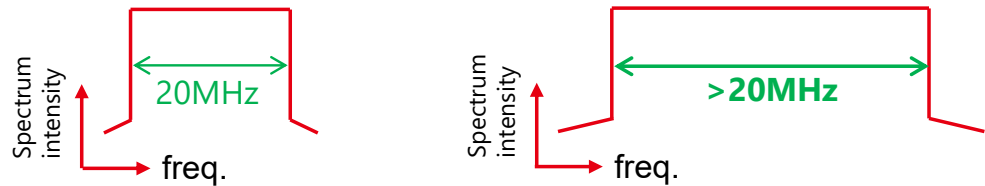
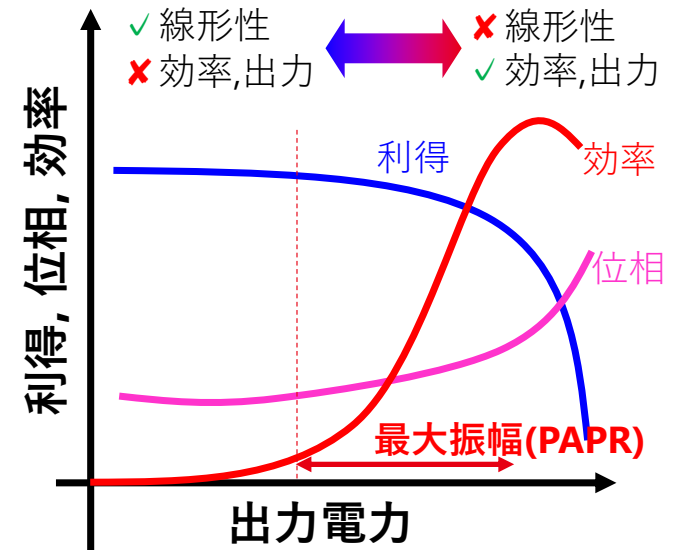
- 次世代の通信基地局用増幅器に求められるもの
→より①大量のデータを②省電力で送信



通信用高効率増幅器の動作原理2

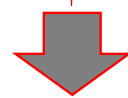
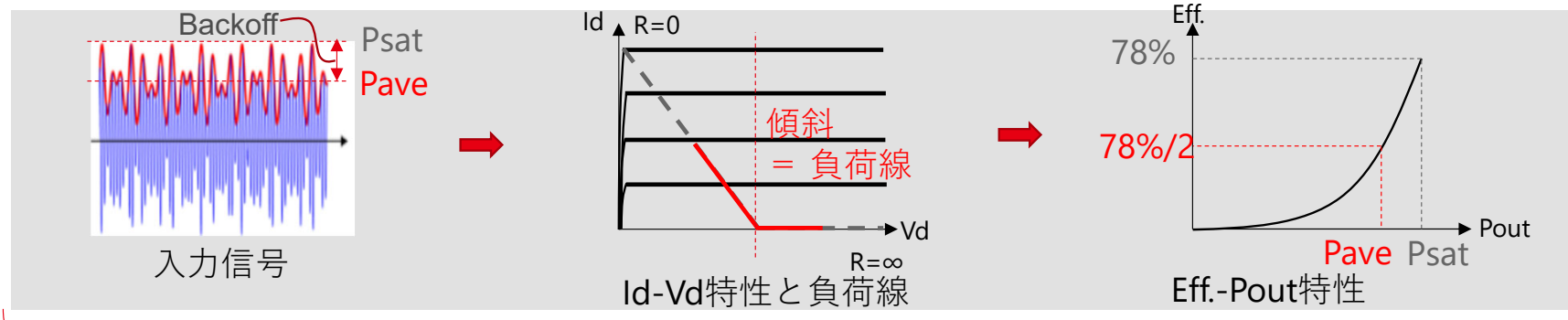


電力増幅器の特性の概念図



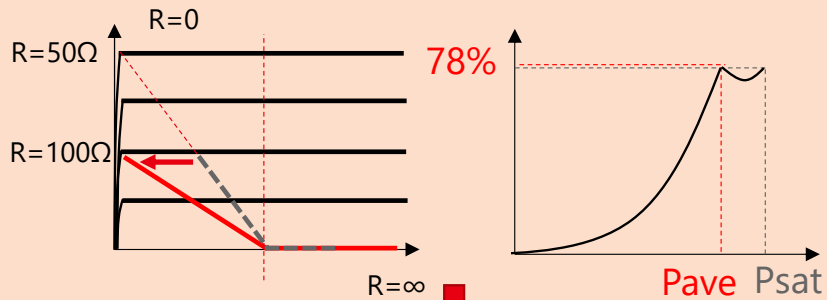
✗ 利得・位相が非線形 ➔ 信号品質の劣化
 ✗ 線形な動作範囲で利用 ➔ 効率・出力の低下

通信用増幅器の高効率化



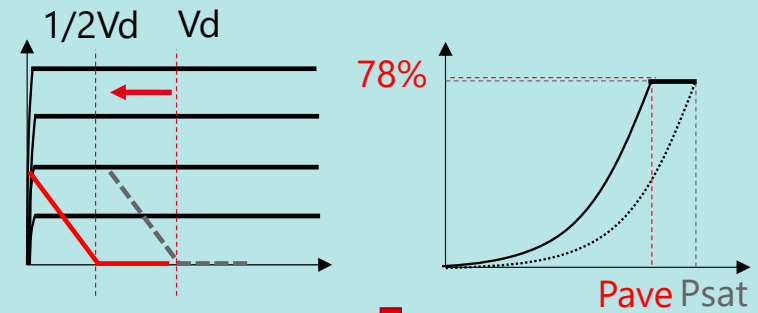
P_{ave} での効率を高めるには・・・

1. 負荷線を変更



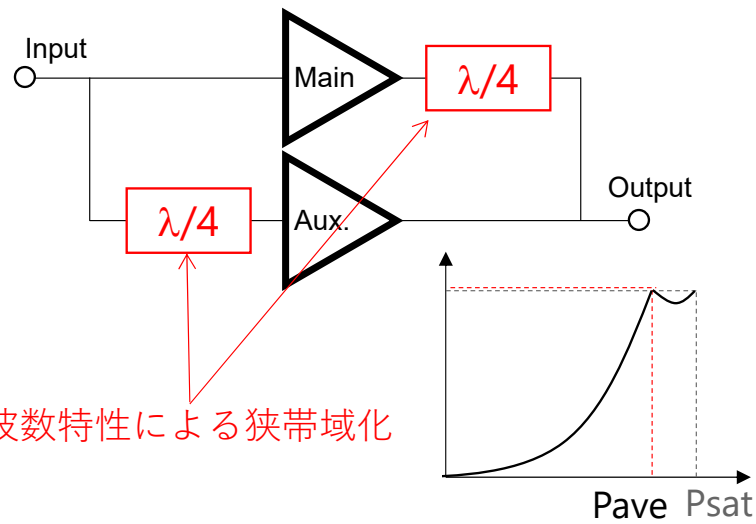
負荷変調増幅器
(ドハティ増幅器、アウトフェーシング増幅器)

2. 電源電圧を変更



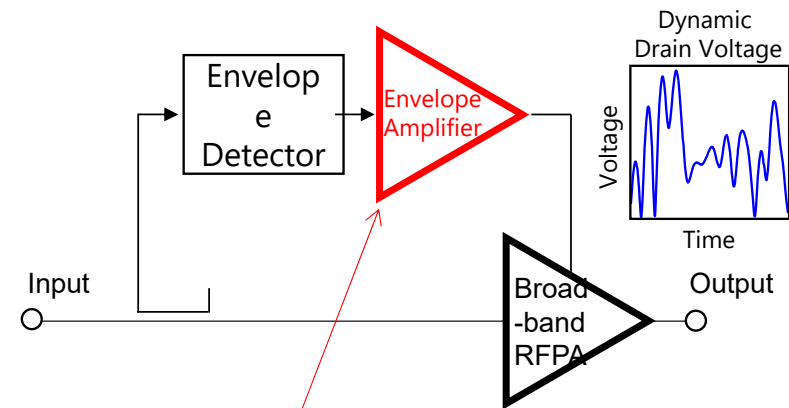
電源変調増幅器
(エンベロープトラッキング増幅器)

Doherty



周波数特性による狭帯域化

Envelope Tracking

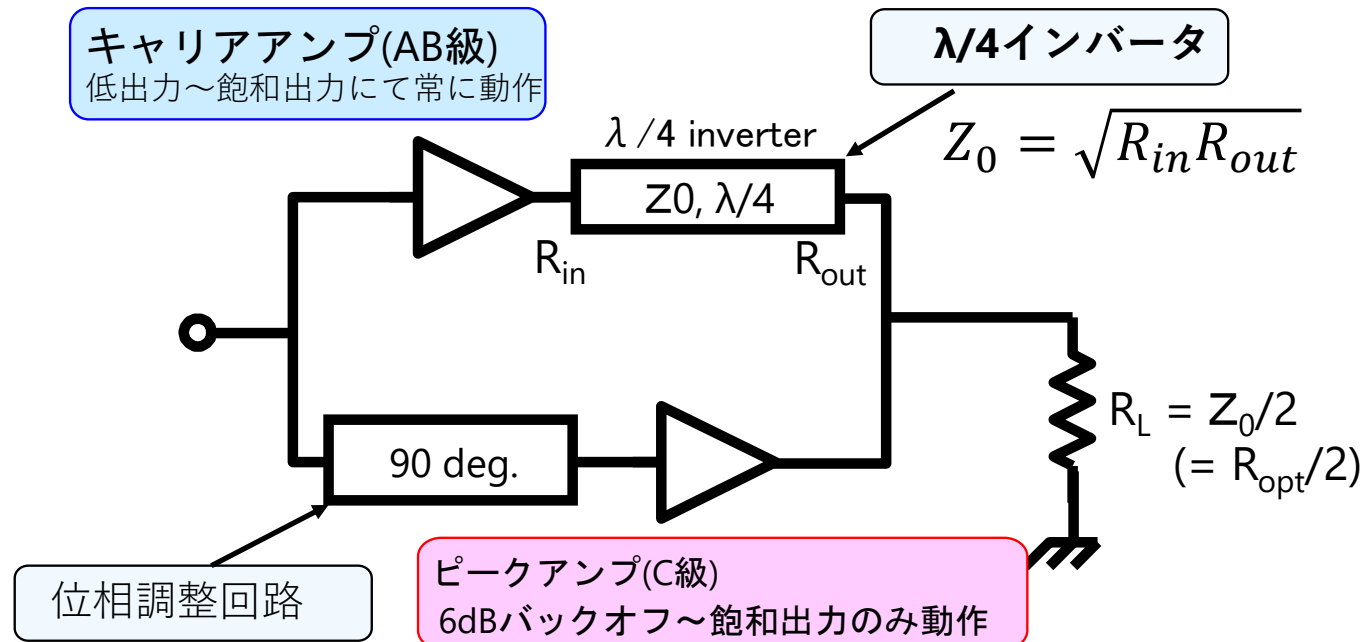


スイッチング速度遅速による狭帯域化

- ドハティ増幅器: **RF帯域=狭帯域**、変調帯域=制限されない
- エンベロープトラッキング増幅器: RF帯域=広帯域、**変調帯域=狭帯域**

ドハティ増幅器の基本構成

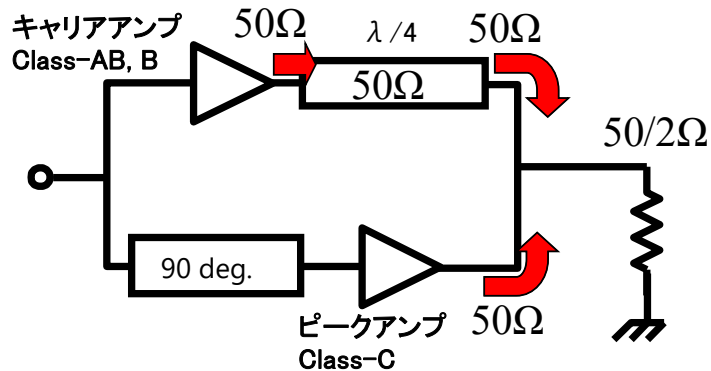
- Class-AB動作するキャリアアンプと、Class-C動作するピークアンプの二つの増幅器から構成
- キャリアアンプの出力側に付加される $\lambda/4$ インバータ(特性インピーダンス= Z_0)によって動作レベルによる負荷変調を実現
- キャリアアンプとピークアンプの通過位相を同相とするため、ピークアンプの入力側に位相調整回路(位相=90度)を付加



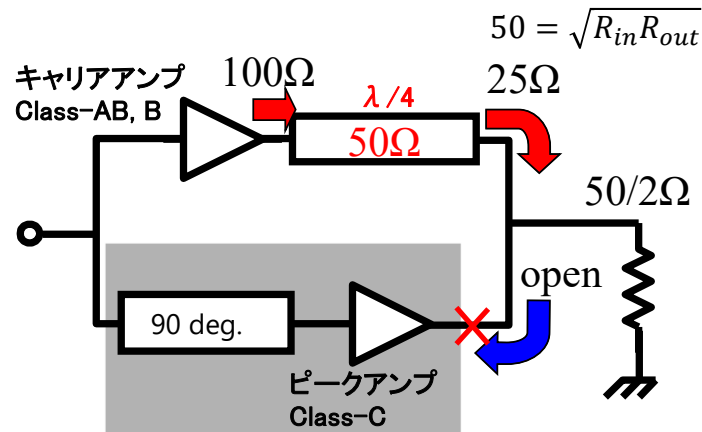
ドハティ増幅器の動作原理

$Z_0 = 50\Omega$ と仮定した場合

(1) 飽和出力動作時



(2) バックオフ動作時

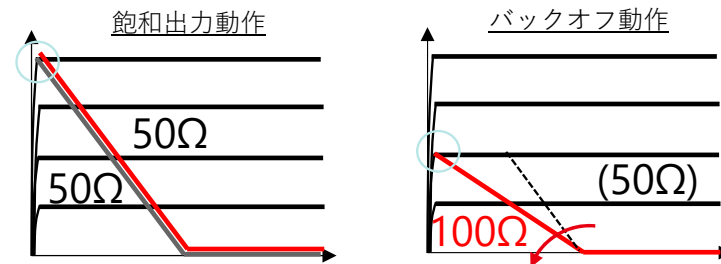


飽和出力動作

- ピークアンプとキャリアアンプは両方動作し負荷50Ωに対して並列接続した増幅器となる
- キャリアアンプとピークアンプはそれぞれ50/2Ωの負荷が接続している増幅器とみなされる

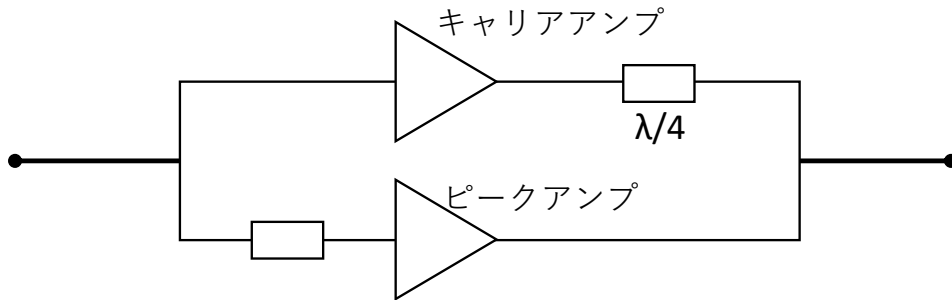
バックオフ動作

- バックオフ以下の動作領域ではピークアンプは動作しない (C級動作のため信号レベルが小さい領域では自動でOFFする) そのためピークアンプの出力インピーダンスはOPENとなる
- ピークアンプが動作していない場合、キャリアアンプはλ/4インバーターと50/2Ωの負荷が接続された増幅器とみなされる
- 負荷50/2Ωはλ/4インバーター($Z_0=50\Omega$)によって100Ωに変成され、キャリアアンプは飽和動作時の負荷(50Ω)に対し、2倍の100Ωとなり**負荷変調が実現**



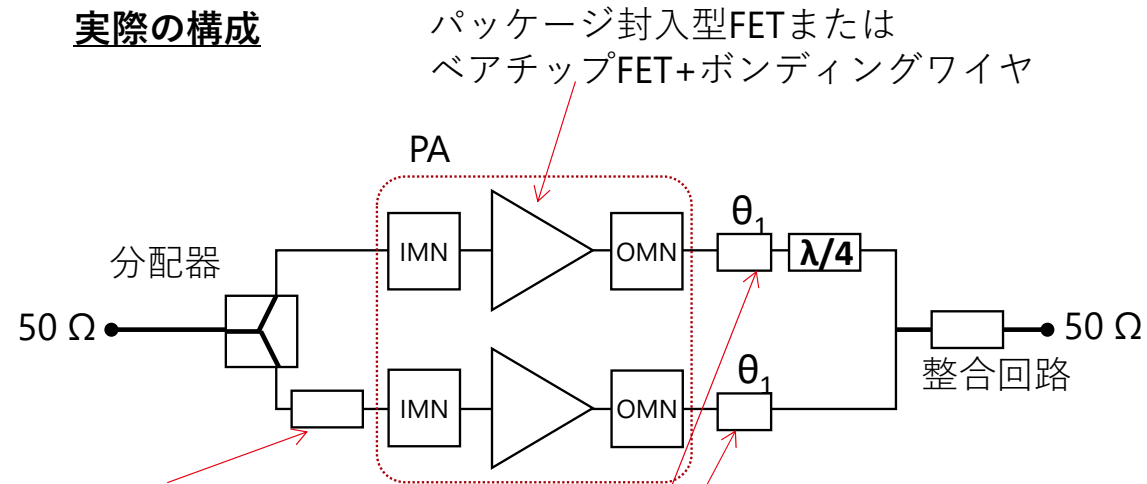
ドハティ増幅器の設計

ドハティ増幅器
(教科書的な) 典型例



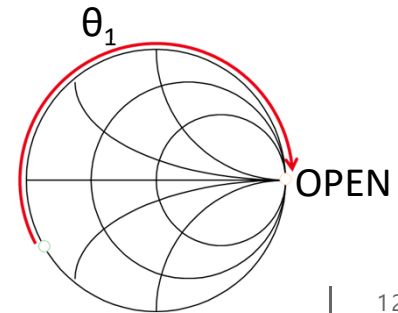
実際の増幅器に必要な回路などが省略されている理想形

ドハティ増幅器
実際の構成



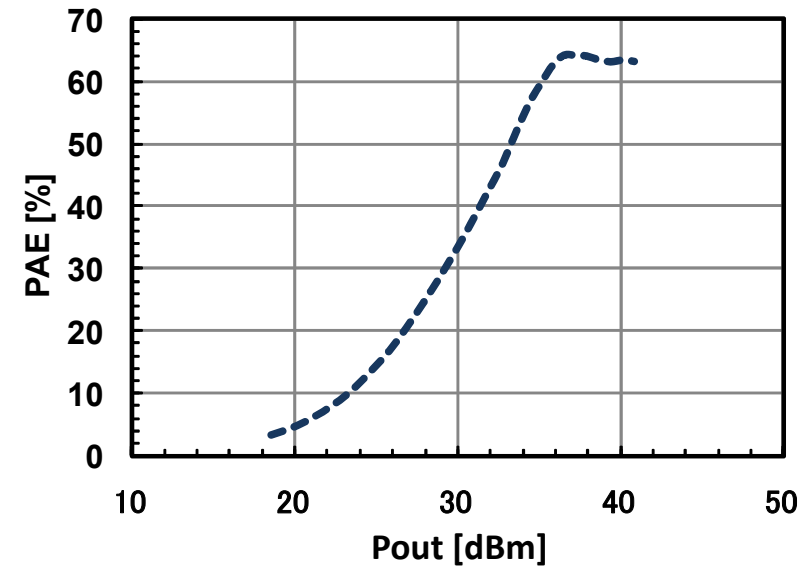
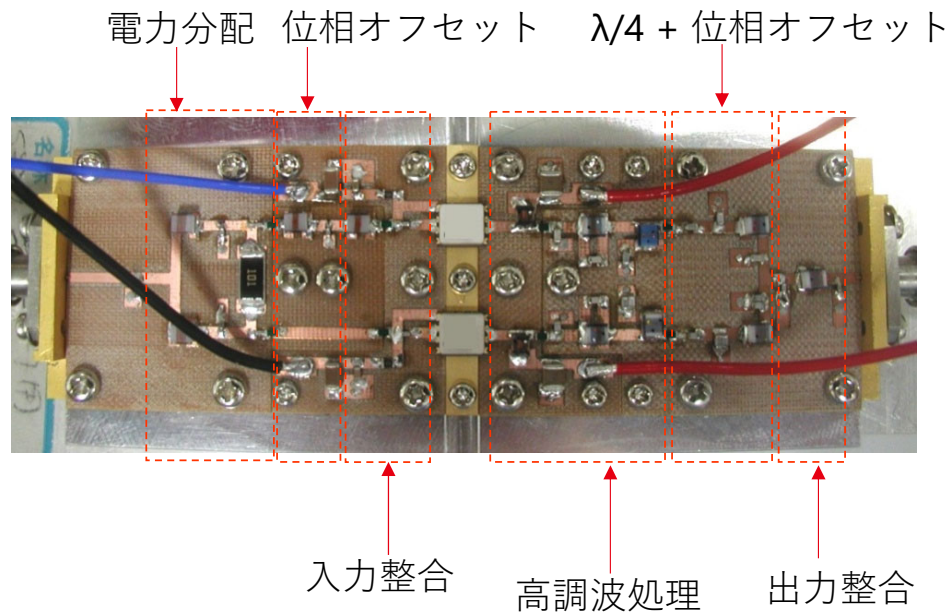
位相調整回路
⇒キャリアアンプとピークアンプの経路差(電気長)が同じになるように補正

位相オフセット回路
⇒OMNを介したピークアンプのC級動作時のインピーダンスをOPEN点に調整

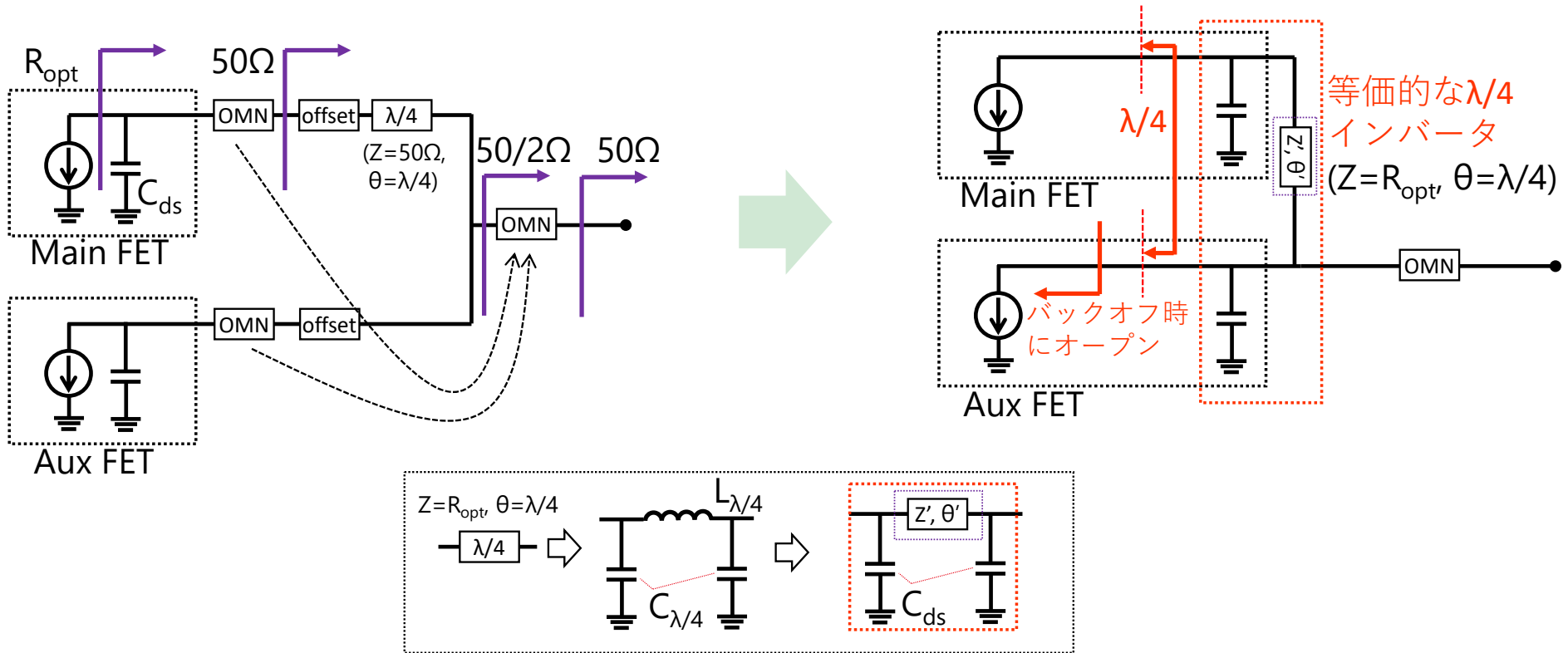


ドハティ増幅器の試作例1

- セラミックPKG入りGaN FETを用いたドハティ増幅器(VHF帯)

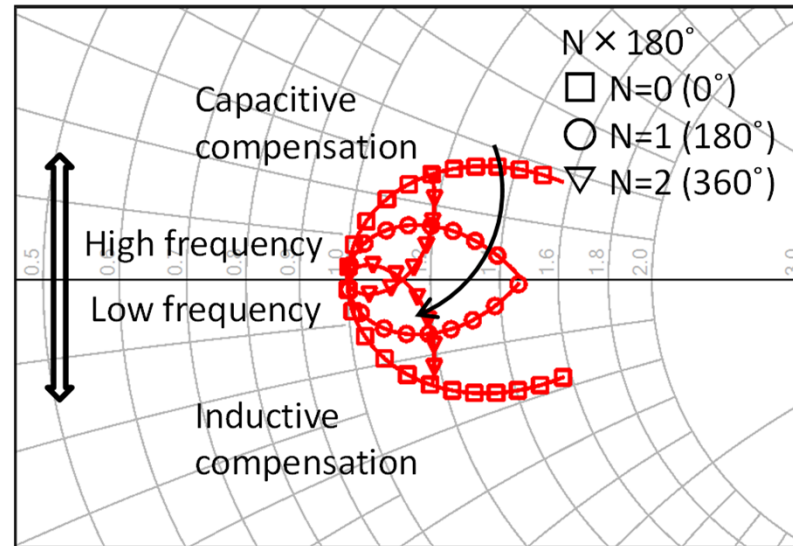
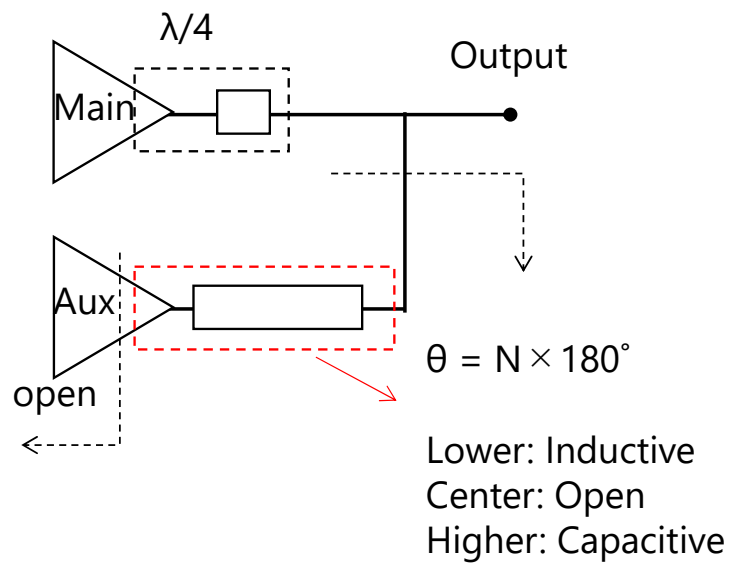


ドハティ増幅器の広帯域化1



トランジスタ寄生容量(C_{ds})の $\lambda/4$ 線路への吸収
 - 整合回路などは経由せず、 $\lambda/4$ 線路がトランジスタの等価電流源に直結される構成となる

ドハティ増幅器の広帯域化2



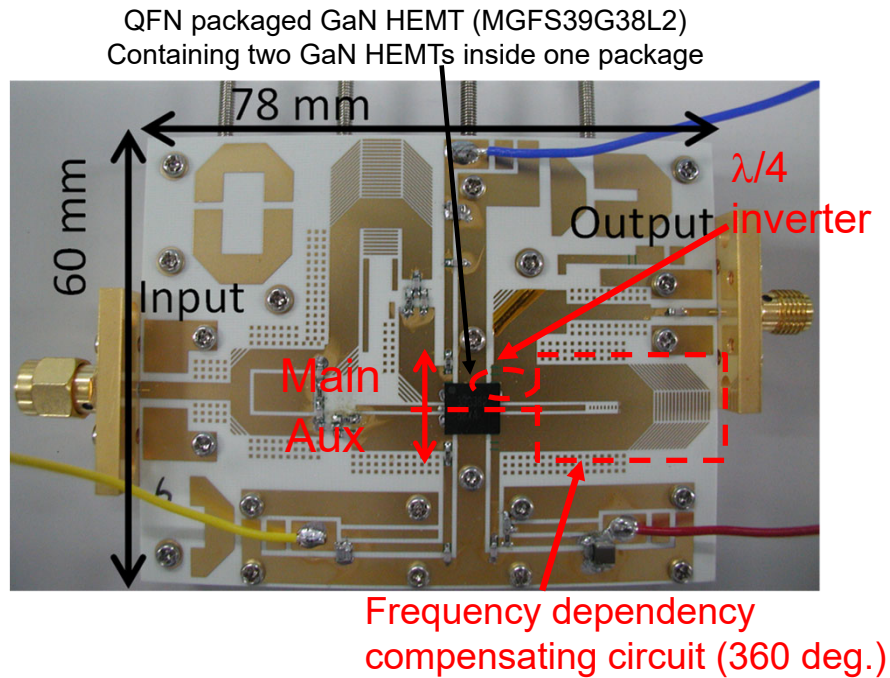
出力側から見たインピーダンス

Aux側への補償回路装荷

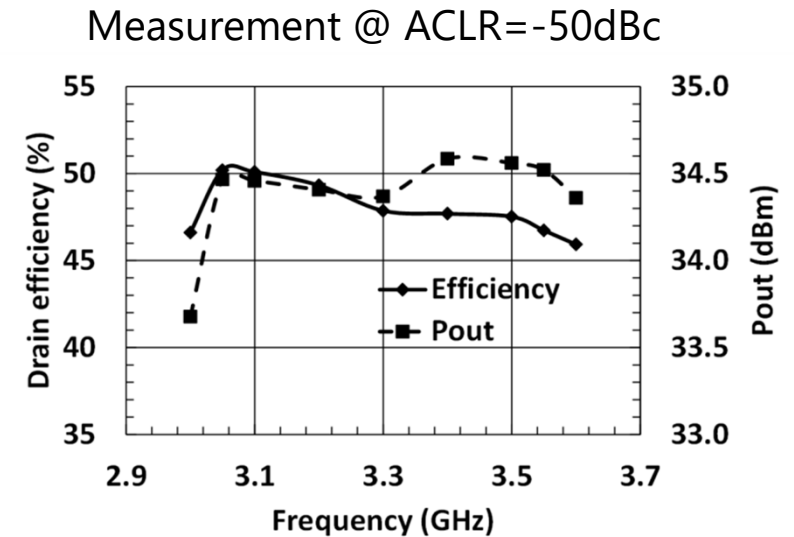
- 補償回路は、低周波域では誘導性リアクタンスとして、高周波域では容量性リアクタンスとして機能する
- 補償回路によって、 $\lambda/4$ 線路の周波数依存性が補償される

ドハティ増幅器の試作例2

- $\lambda/4$ インバータと360度の周波数依存性補償回路を、トランジスタとパッケージの寄生成分を取り込む形で構成した広帯域ドハティ増幅器



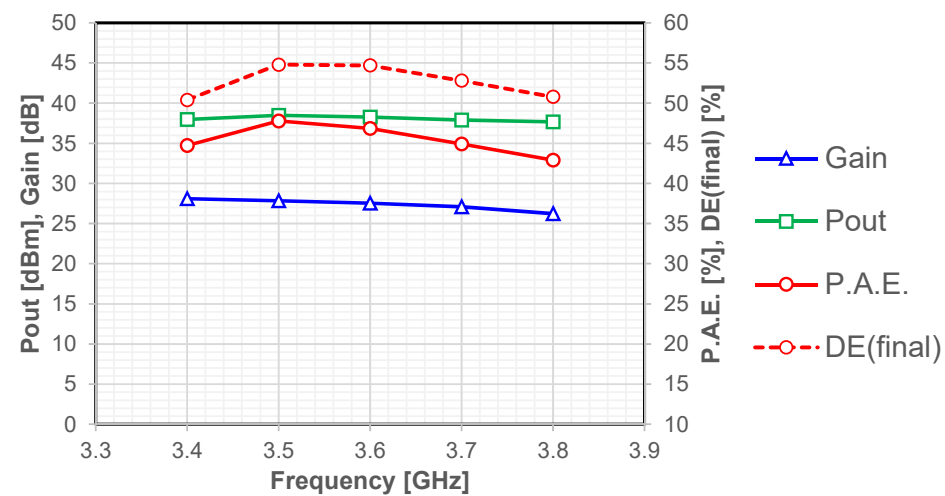
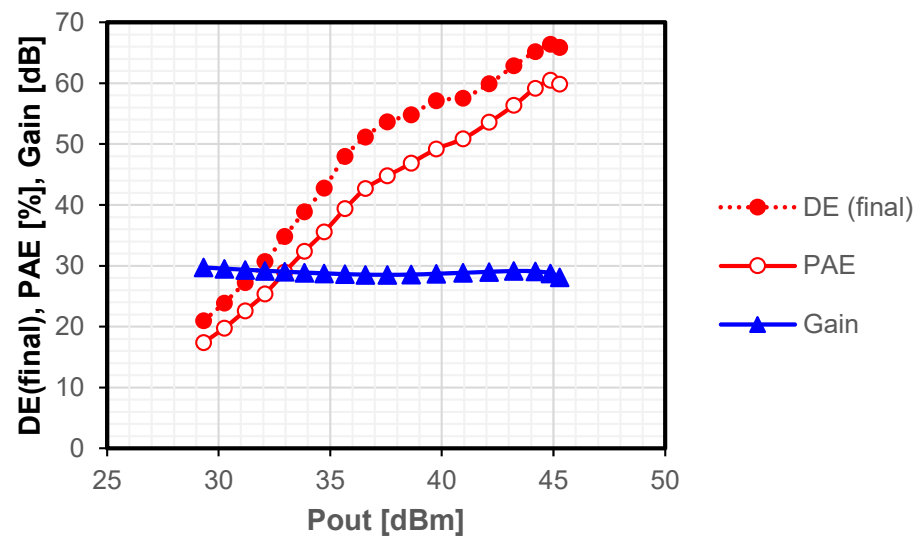
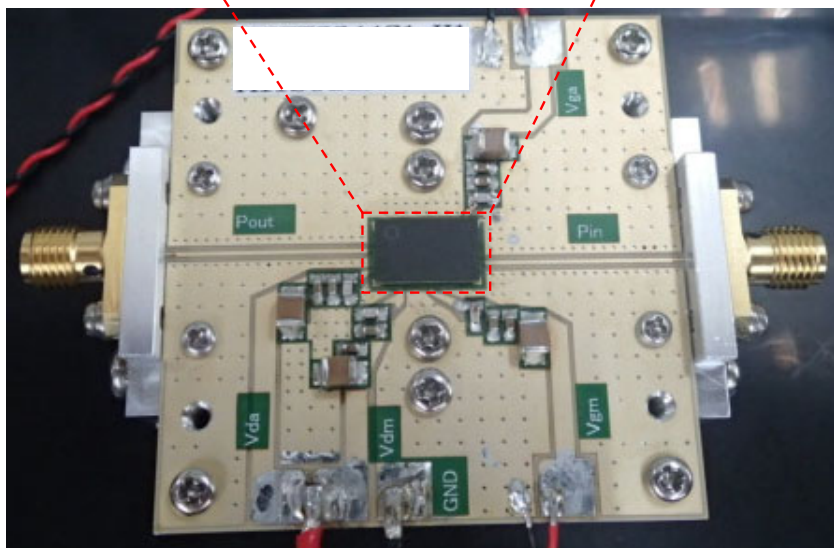
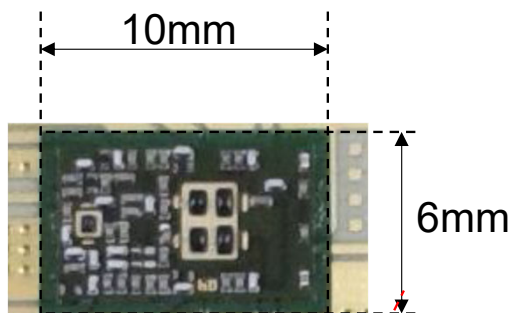
Measurement Results



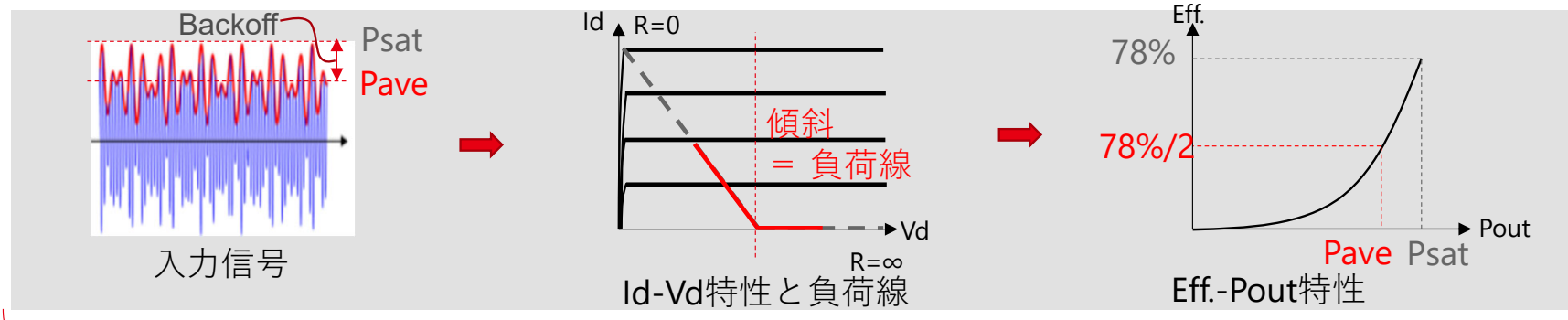
3.0~3.6GHzの600MHzの帯域にわたって効率46%以上

ドハティ増幅器の試作例3

- mMIMO向けドハティ増幅器モジュール

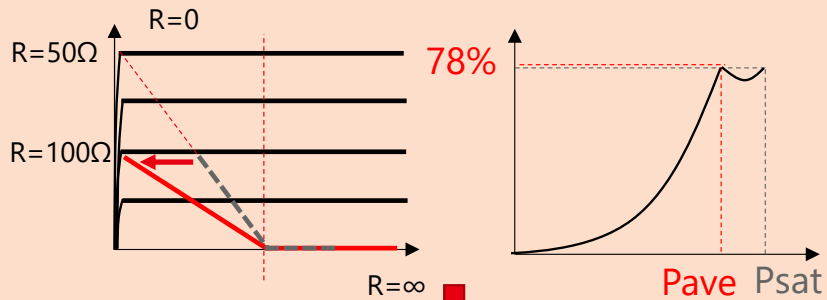


通信用増幅器の高効率化



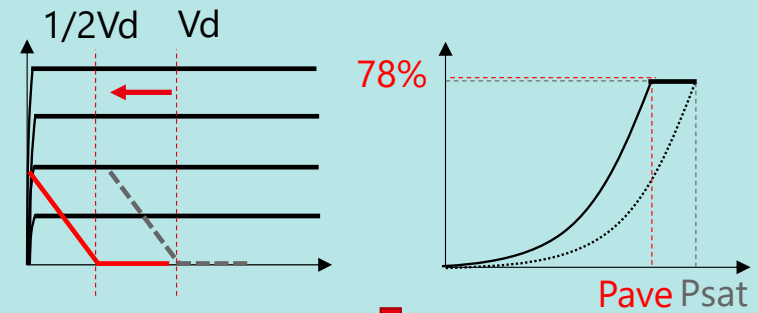
P_{ave} での効率を高めるには・・・

1. 負荷線を変更



負荷変調増幅器
(ドハティ増幅器、アウトフェーシング増幅器)

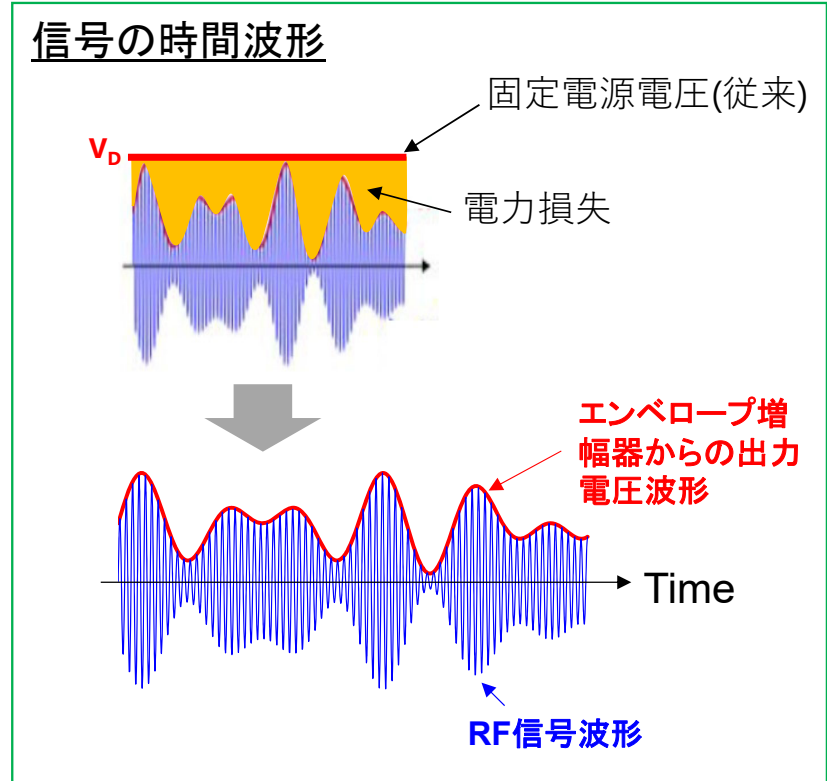
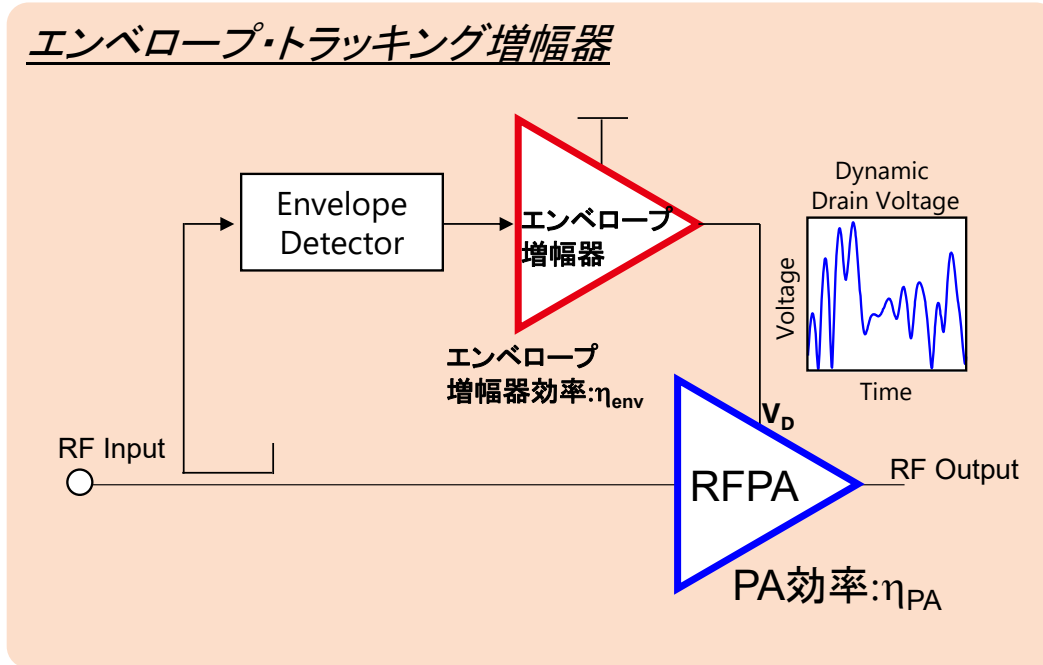
2. 電源電圧を変更



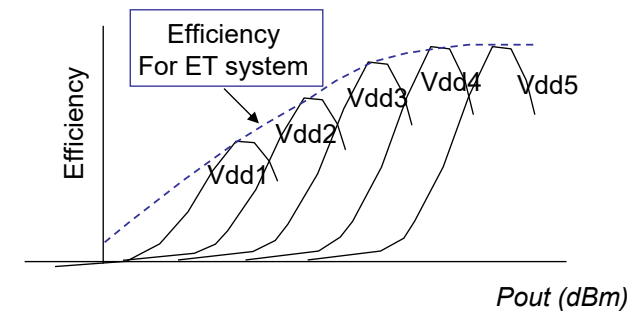
電源変調増幅器
(エンベロープトラッキング増幅器)

エンベロープ・トラッキング増幅器

- エンベロープ・トラッキング増幅器の概要

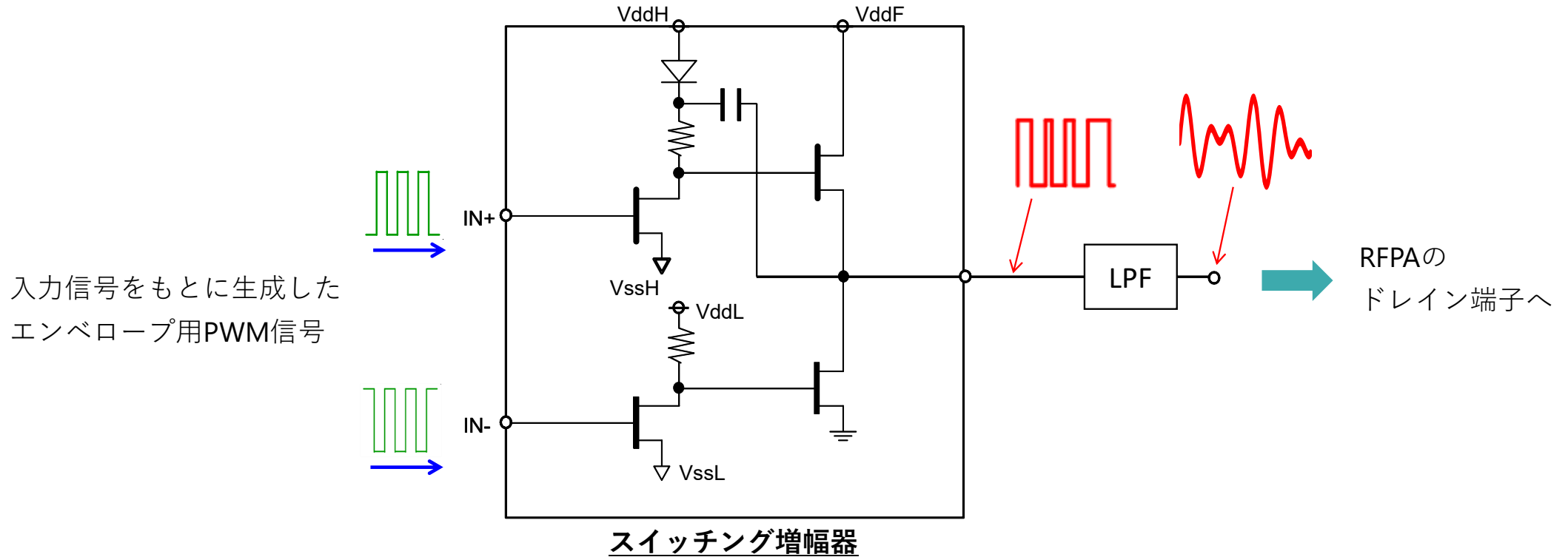


✓ 飽和から高バックオフにかけて高効率化を実現



エンベロープ・トラッキング増幅器

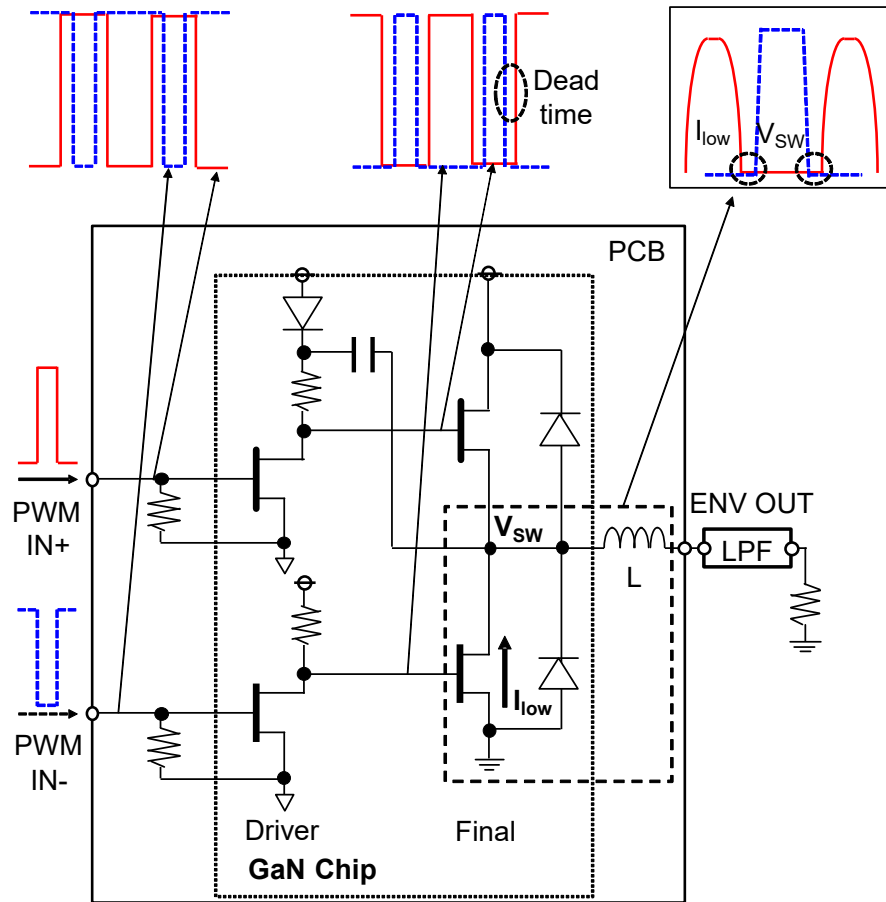
- エンベロープ増幅器の動作原理



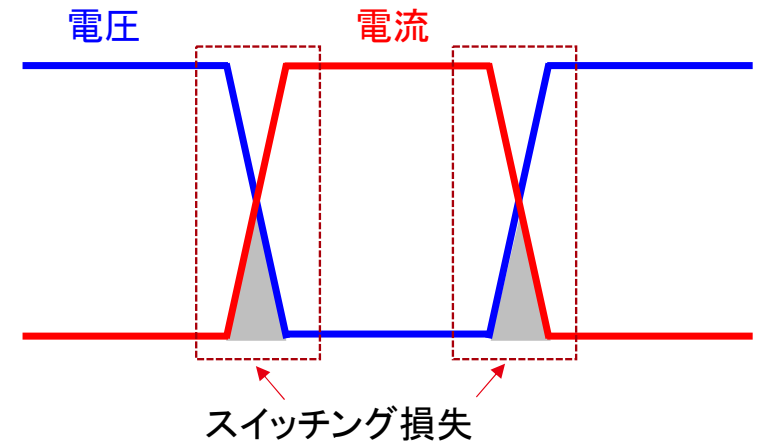
- ✓ 高効率動作のためにスイッチング増幅器を適用
- ✓ 標本化定理(ナイキスト定理)より、変調帯域の拡大にはスイッチング周波数の向上が必要 ($f_{sw} \gg BW_{tracking}$)

エンベロープ増幅器の高効率化

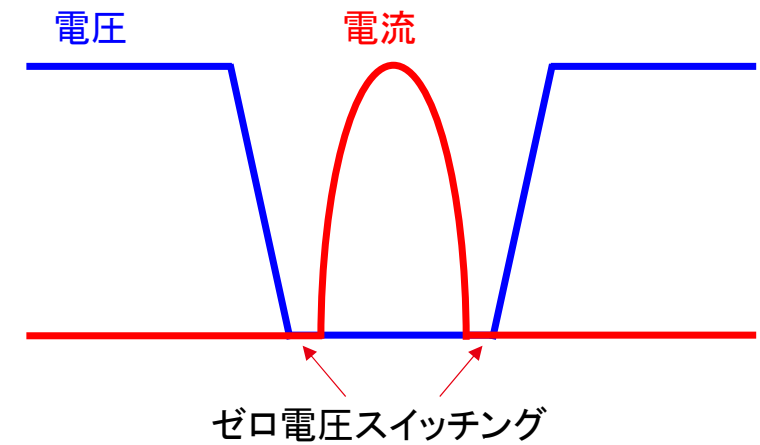
- ソフトスイッチング^[1]による高効率化



ハードスイッチング

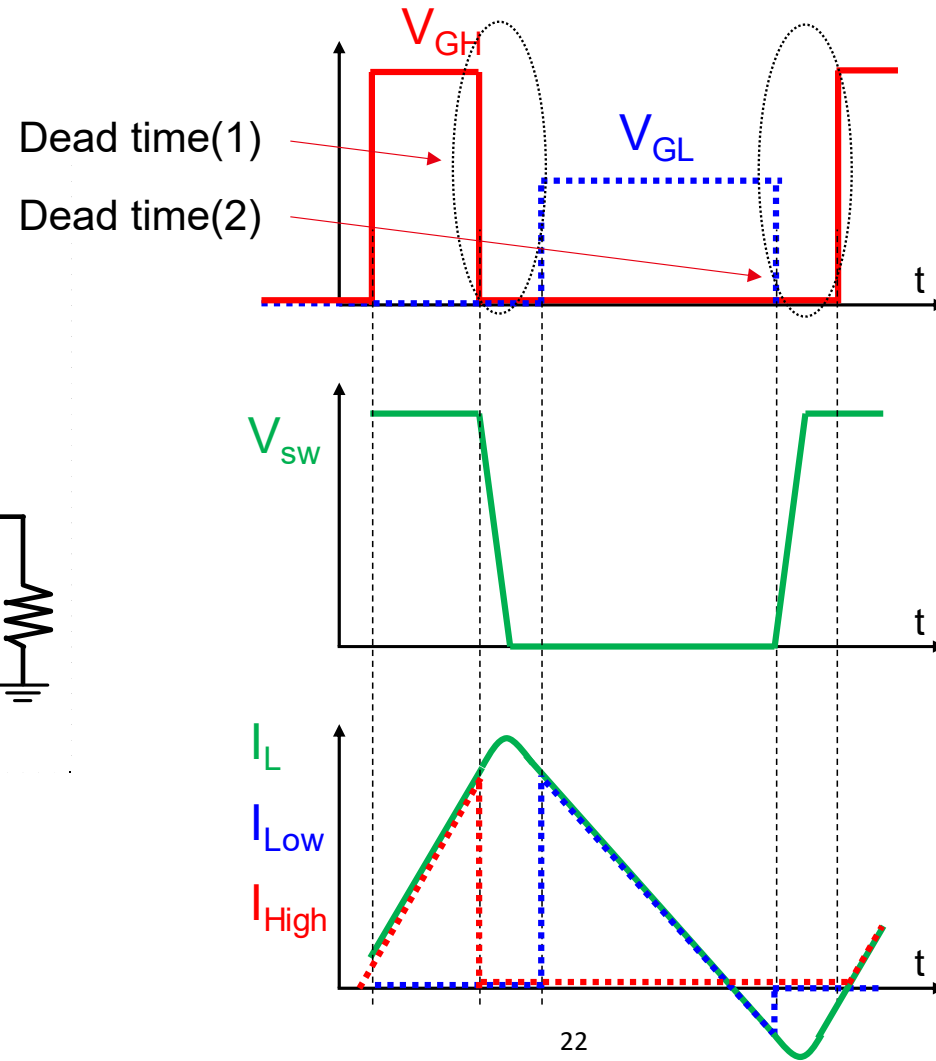
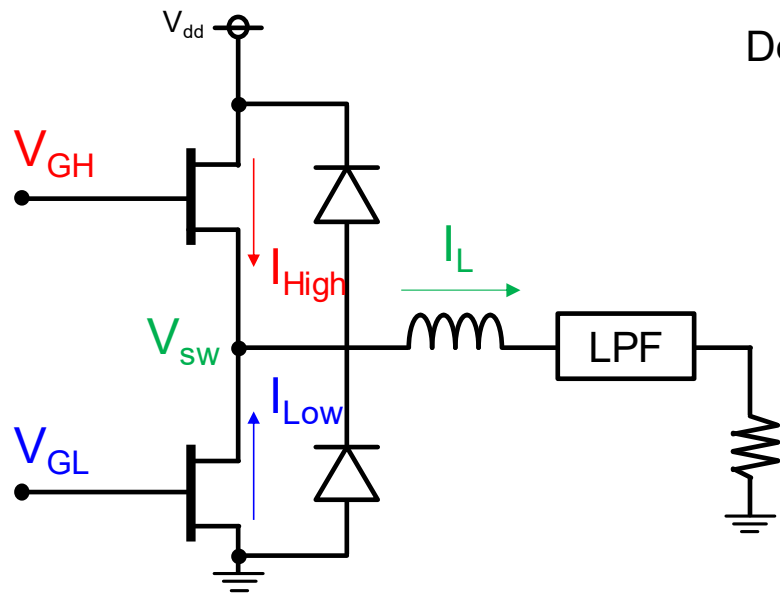


ソフトスイッチング



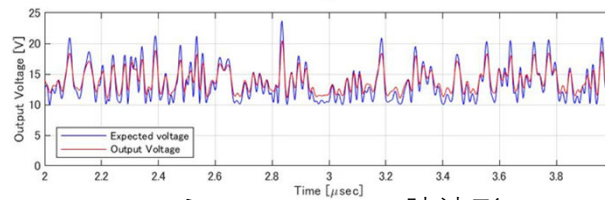
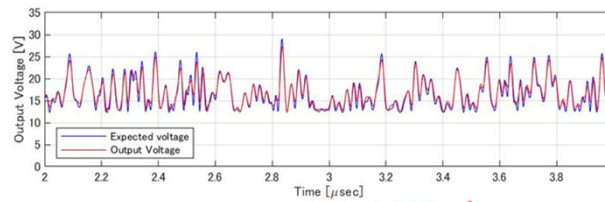
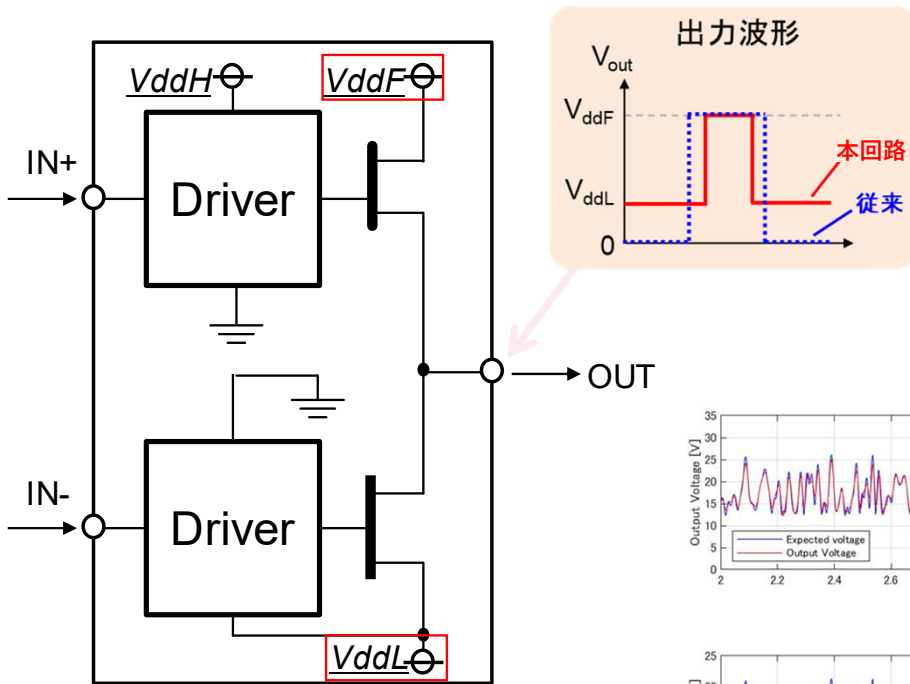
[1] D. Makismovic, "Design of the zero-voltage switching Quasi-Square-Wave Resonant Switch"

エンベロープ増幅器の高効率化

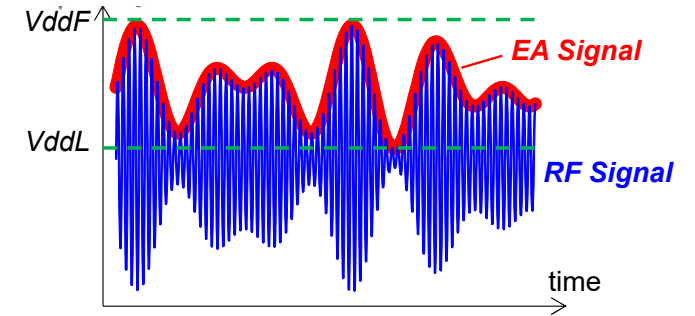


エンベロープ増幅器の高効率化

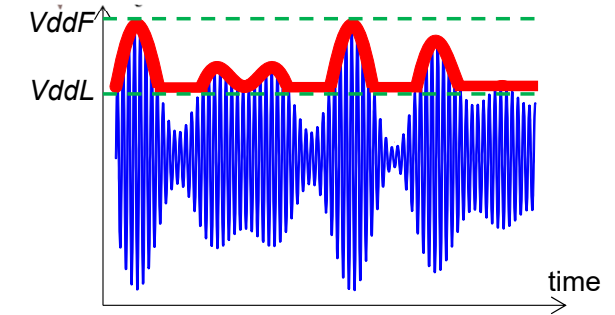
- 電圧最適化による高効率化



シミュレーション時波形



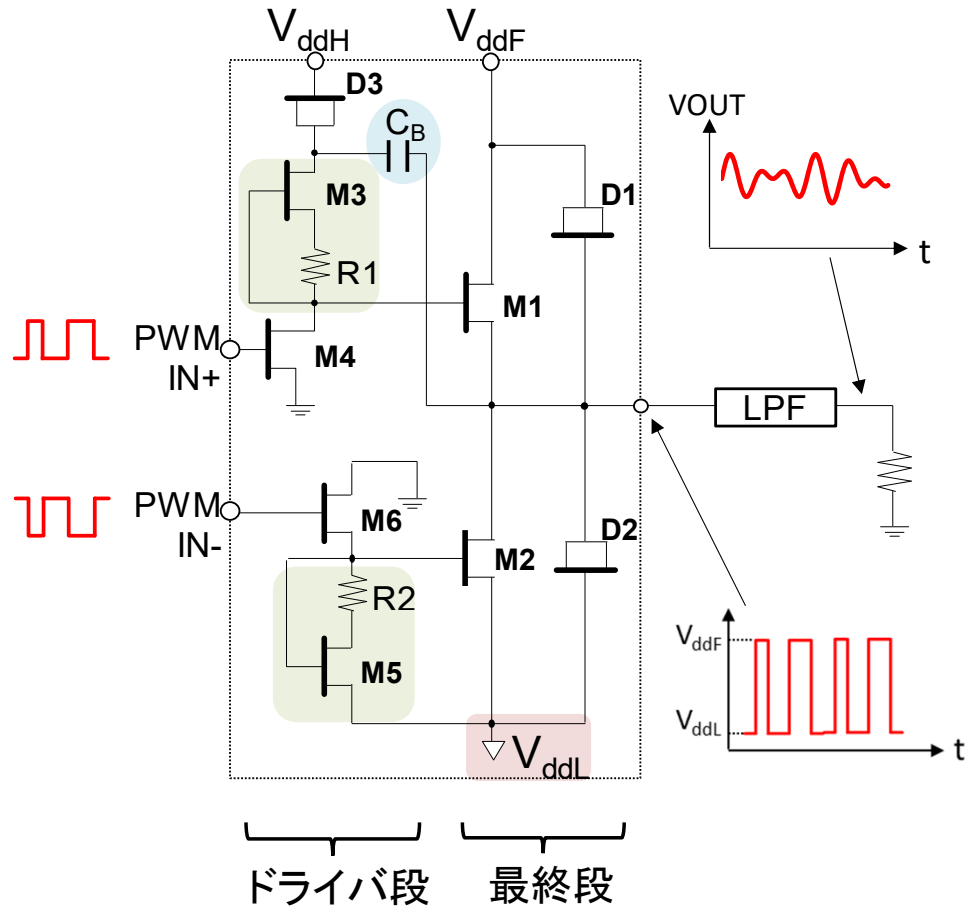
↓ VddL大



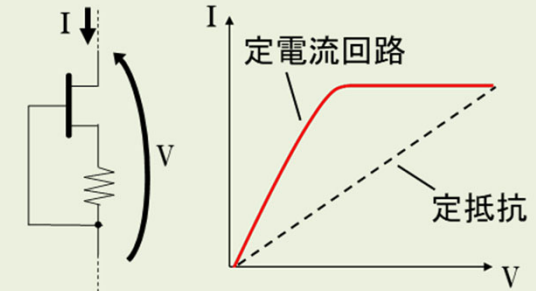
VddL大により....

- EA効率改善
- RFPA効率低下

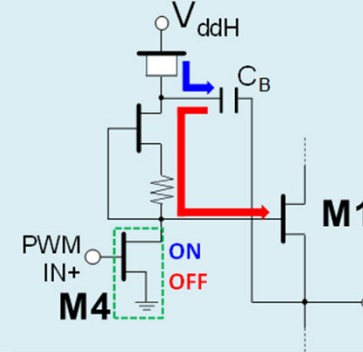
エンベロープ・トラッキング増幅器の高効率化



- 定電流回路による最終段FETのスイッチング動作高速化



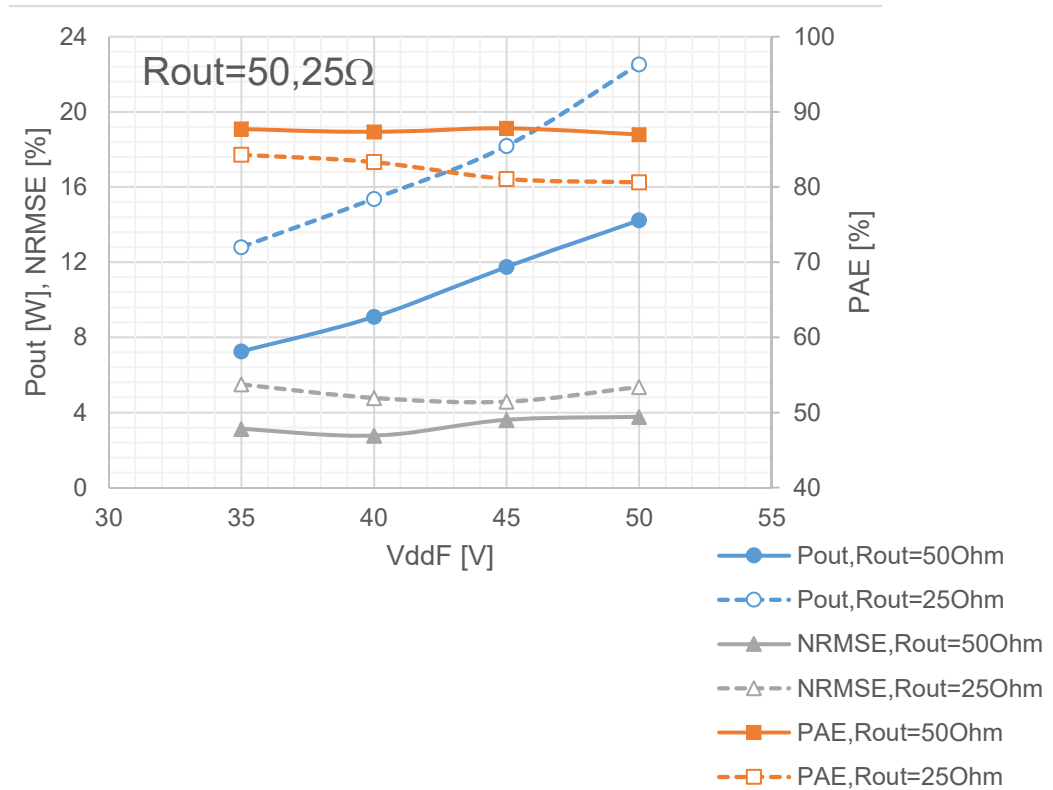
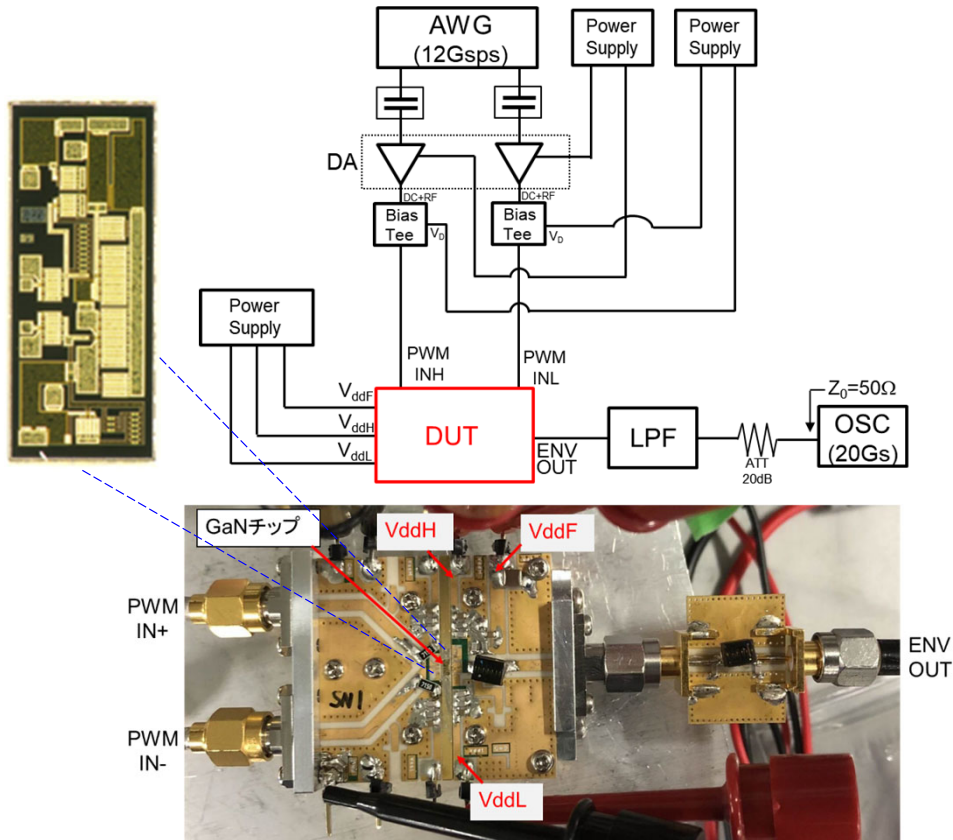
- ブートストラップキャパシタ(C_B)によるスイッチング動作高速化、 V_{ddH} 低電圧化による高効率化



エンベロープ・トラッキング増幅器の開発

GaNエンベロープ増幅器の試作評価結果

評価条件：変調帯域20MHz, PAPR6.5dB, fsw=184MHz



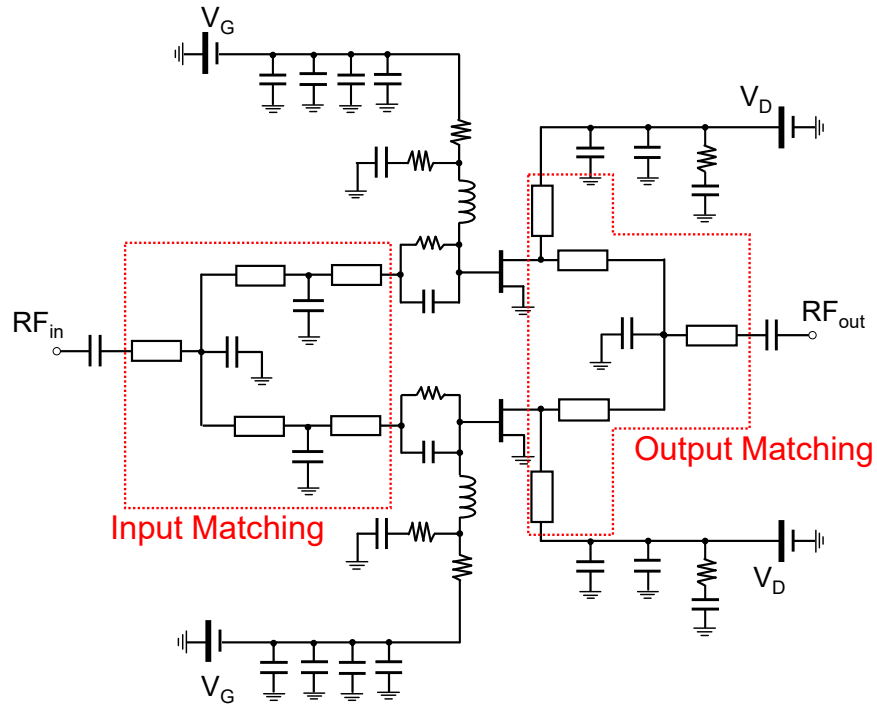
- VddF=45V, Rout=50Ωの時、PAE=87.8%を達成 (Pout=11.8W, NRMSE * =3.6%)
- VddF=40V, Rout=50Ωの時、NRMSE=2.8%を達成 (Pout=9.1W, PAE=87.3%)
- VddF=50V, Rout=25Ωの時、Pout=22.5Wを達成 (PAE=80.6%, NRMSE=5.4%)

* : Normalized Root-Mean-Square Error
©Mitsubishi Electric Corporation

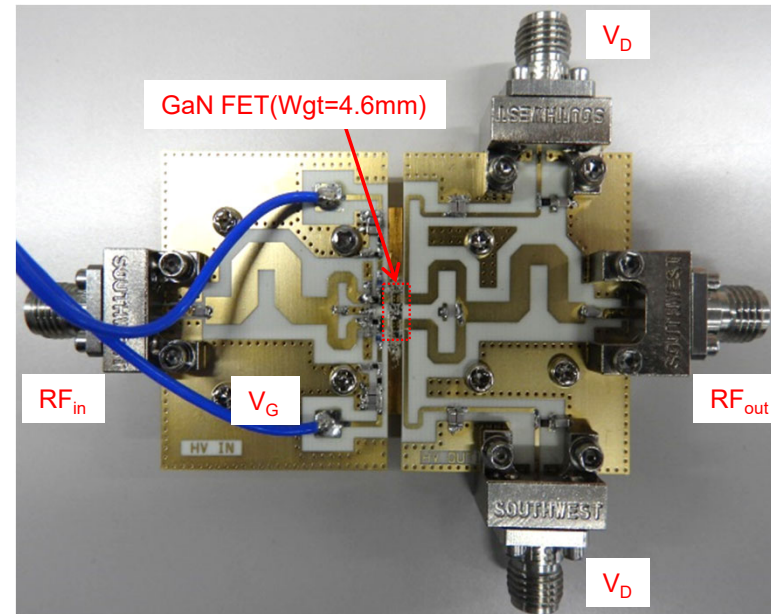
エンベロープ・トラッキング増幅器の開発

- GaNエンベロープ増幅器と組み合わせるRFPA

回路図



試作増幅器外観

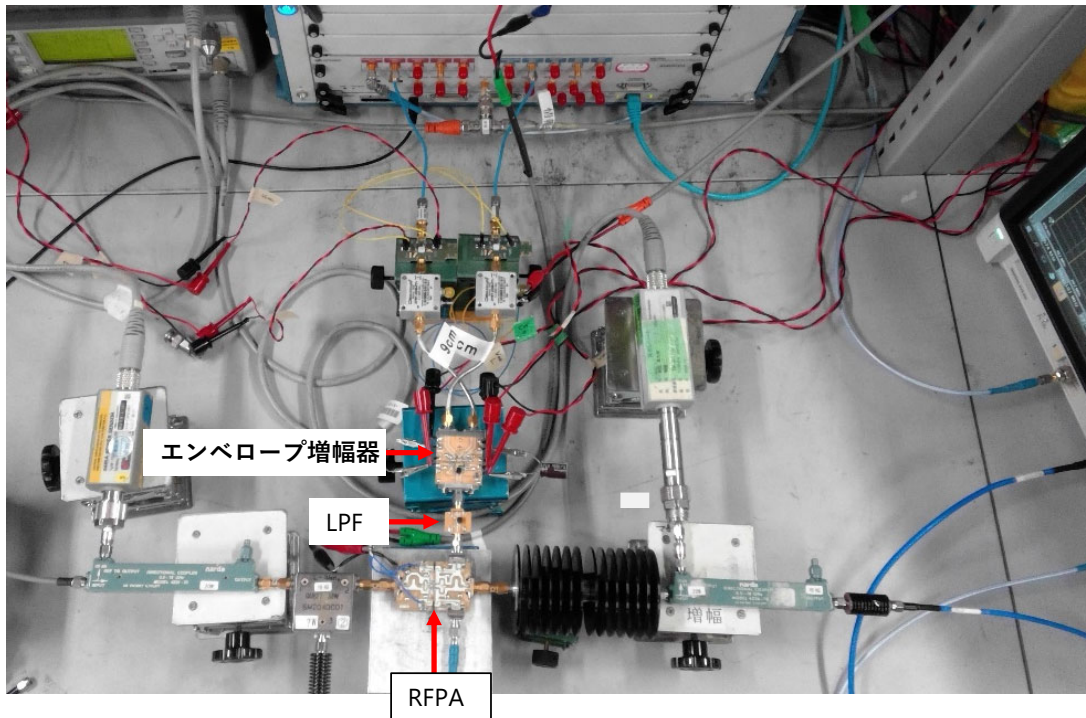


- ・周波数 : 1.3~2.8GHz
- ・飽和出力電力 : 47.0dBm
- ・ドレイン効率 : 50%
- ・ドレイン電圧 : 48V

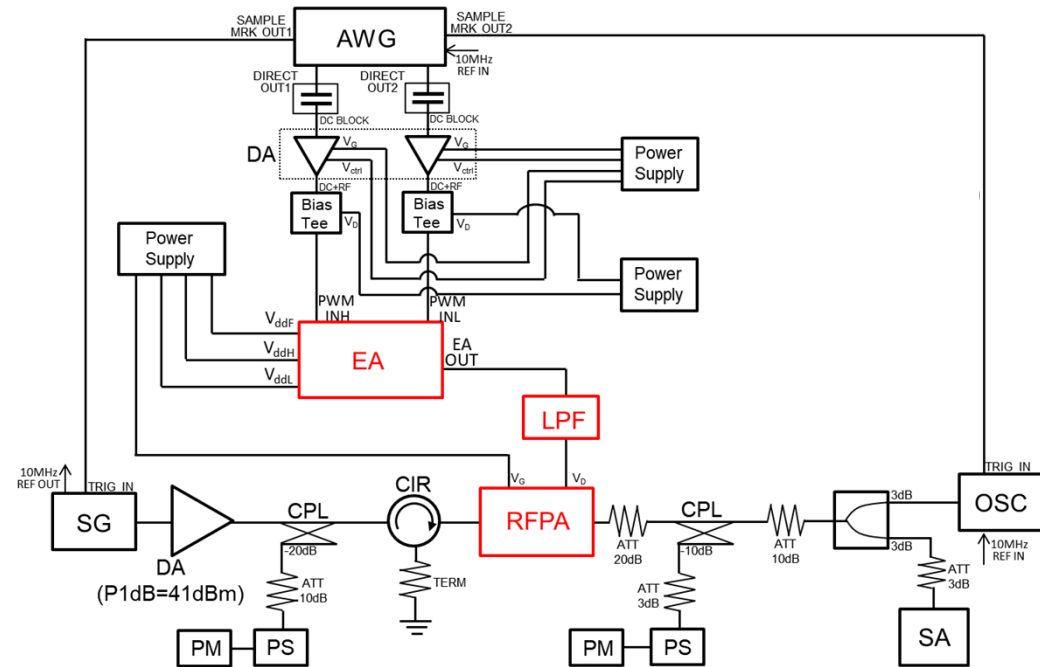
エンベロープ・トラッキング増幅器の開発

- GaNエンベロープ・トラッキング増幅器の評価

評価系外観

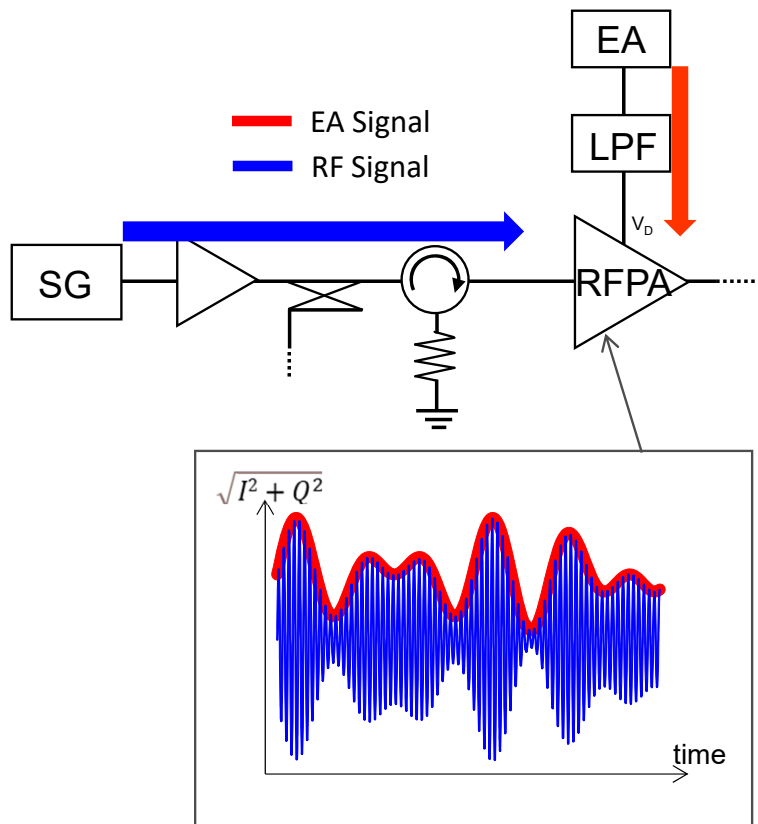


ブロック図



エンベロープ・トラッキング増幅器の開発

- エンベロープ信号とRF信号の観測結果
(RF周波数1.8GHz, 変調帯域20MHz, PAPR7.5dB, fsw=200MHz)



▲信号タイミングが一致したところが最も良好な特性となる

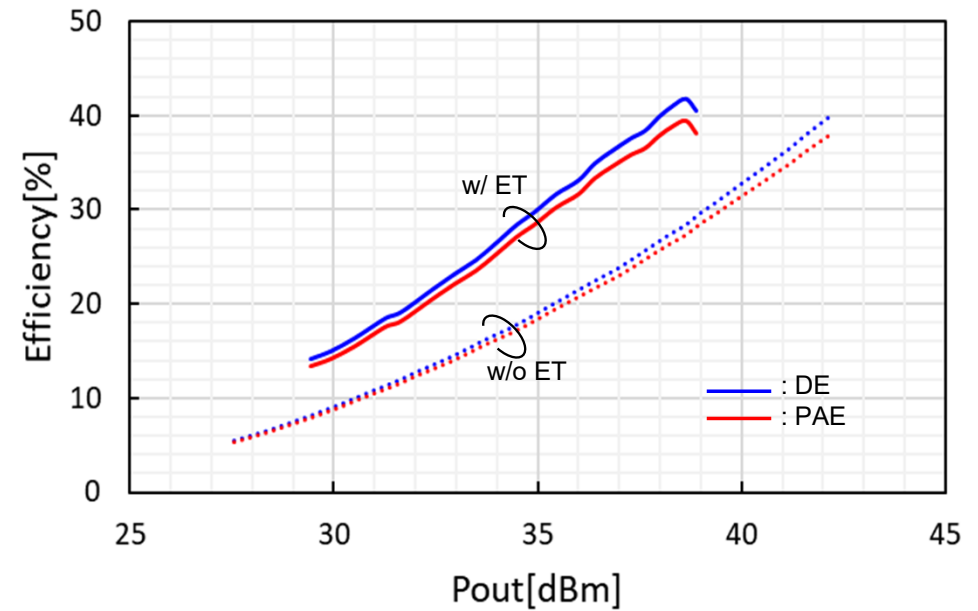
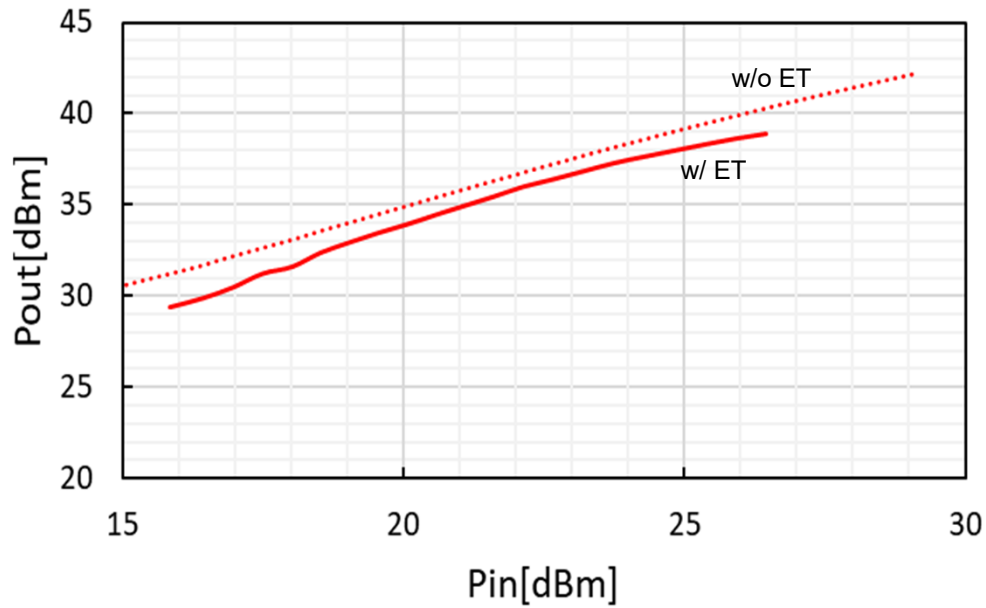


▲オシロスコープで観測したEA出力信号とRF信号の重ね合わせ

エンベロップ・トラッキング増幅器の開発

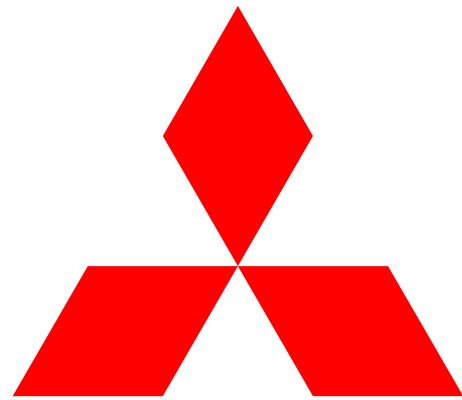
- エンベロップ・トラッキング増幅器の評価結果

評価条件：RF周波数1.8GHz, Vd48V変調帯域20MHz,
PAPR7.5dB, fsw=200MHz



- Pout=38.8dBm, DE=41.7%, PAE=39.4%
- 最大でドレイン効率11.3pt、PAE10.6ptの改善

- 通信用増幅器の基礎的と実際の開発への適用事例を紹介。
- 通信用増幅器はバックオフ時の効率改善のため、ドハティ増幅器やエンベロップ・トラッキング増幅器の適用が有効である。
- それら従来の通信用増幅器の狭帯域な特性を改善するため、以下の技術の適用を適用し、広帯域化を実証した。
- (1)ドハティ増幅器
 - 周波数補償回路の適用で動作周波数帯域を広帯域化
- (2)エンベロップ・トラッキング増幅器
 - ソフトスイッチング技術および定電流回路の適用で動作変調帯域を広帯域化



**MITSUBISHI
ELECTRIC**

Changes for the Better