

電力増幅器の高効率・広帯域化技術の基礎

Foundations of High-Efficiency and Wideband Power Amplifier Techniques

田中 慎一

Shinichi TANAKA

芝浦工業大学

Shibaura Inst. of Tech.

概要

本講座では、マイクロ波電力増幅器における高効率化および広帯域化を実現するための基礎技術を概観します。電力効率改善の手法としては、F級やE級に代表される高調波処理を利用した各種動作級が知られています。さらに近年は、広帯域かつ高効率な動作を可能にするため、これらの動作級に基づいて高効率動作の周波数帯域を拡大する連続モードなどの利用に注目が集まっています。加えて、高効率化と広帯域化をより高いレベルで両立するためには、高調波処理と基本波整合を協調させた回路設計の重要性が増しています。このように、高効率・広帯域電力増幅器の設計には、帯域幅拡大の手法や動作級の選択を軸とした多様なアプローチが存在します。しかし一方で、回路サイズや設計のロバスト性といった実用的観点も考慮する必要があり、最終的には設計目的に応じた最適な手法の選択が求められます。本講座では、著者らの最近の研究成果を設計事例として取り上げ、これらを交えながら電力増幅器設計において留意すべきポイントを解説します。

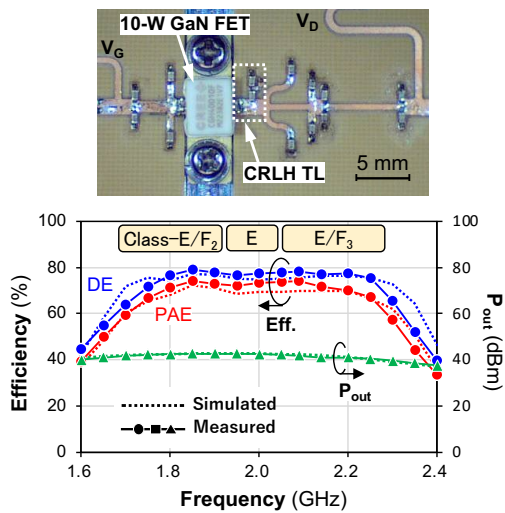


図1 小型連続E級増幅器

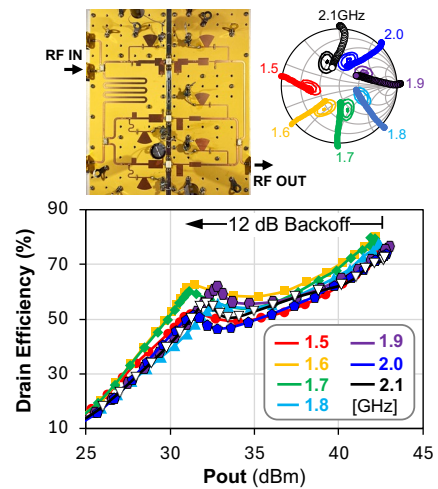


図2 広帯域負荷変調バランス増幅器

Abstract

This lecture overviews fundamental technologies for achieving high efficiency and wide bandwidth in microwave power amplifiers. It briefly reviews well-known operation classes, such as Class-F and Class-E, focusing on key characteristics and design considerations, and highlights recent approaches using continuous modes to broaden efficient frequency ranges. Practical factors like circuit size and design robustness also require careful consideration. Case studies from the authors' recent research are presented to illustrate key design considerations for power amplifier engineers.

電力増幅器の 高効率・広帯域化技術の基礎

Foundations of High-Efficiency and Wideband
Power Amplifier Techniques

田中慎一

Shinichi TANAKA

芝浦工業大学

Shibaura Institute of Technology

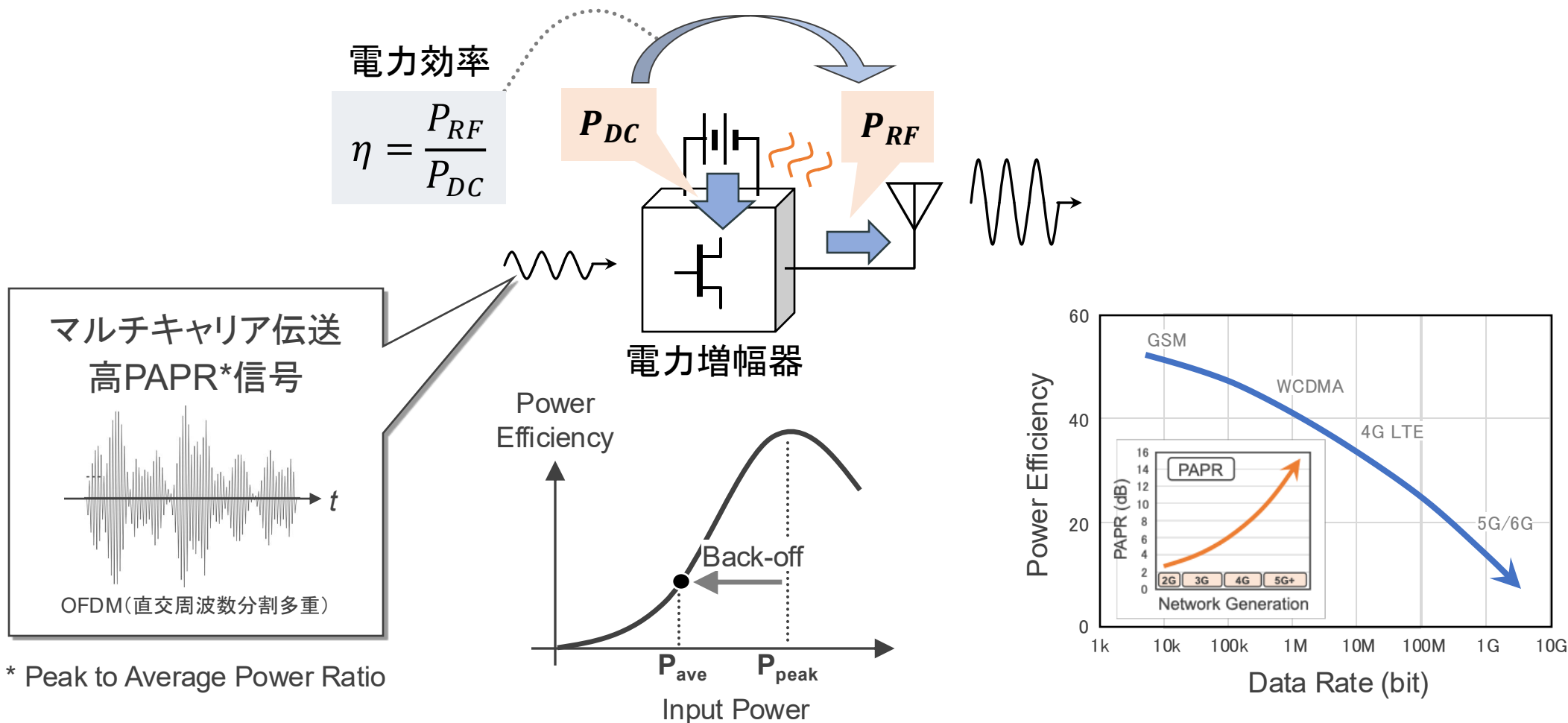
s-tanaka@shibaura-it.ac.jp

概要

1. 背景
2. 高効率化技術
 - a. 基本原理
 - b. 高調波処理回路
 - c. FET寄生成分の影響
3. 広帯域化技術
 - a. 連続モード増幅器
 - b. 基本波／高調波回路の一体化設計
4. 応用事例
 - a. 負荷変調増幅器
 - b. 広帯域SLMBA
5. まとめ

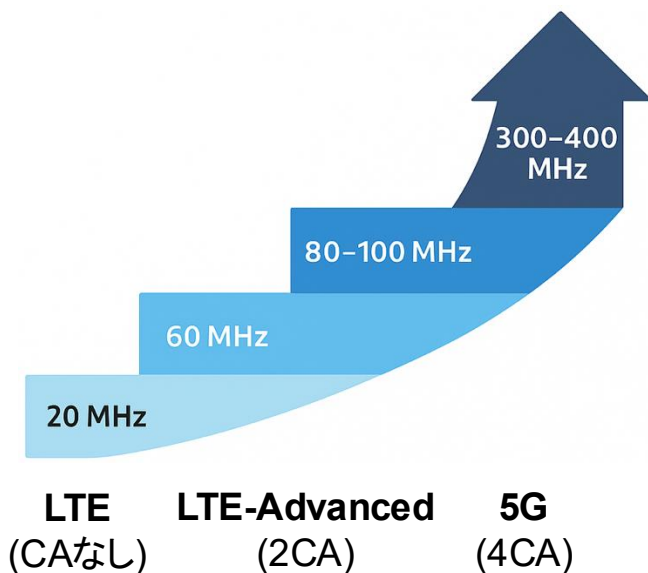
電力増幅器(PA)の技術課題 ～高効率化～

- 次世代無線システムに向けて、PAの高効率化は重要課題の一つ

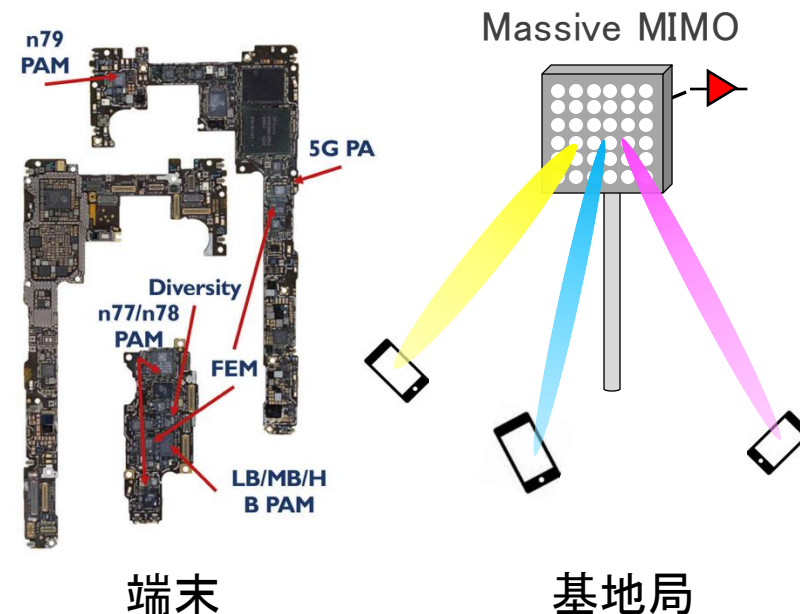
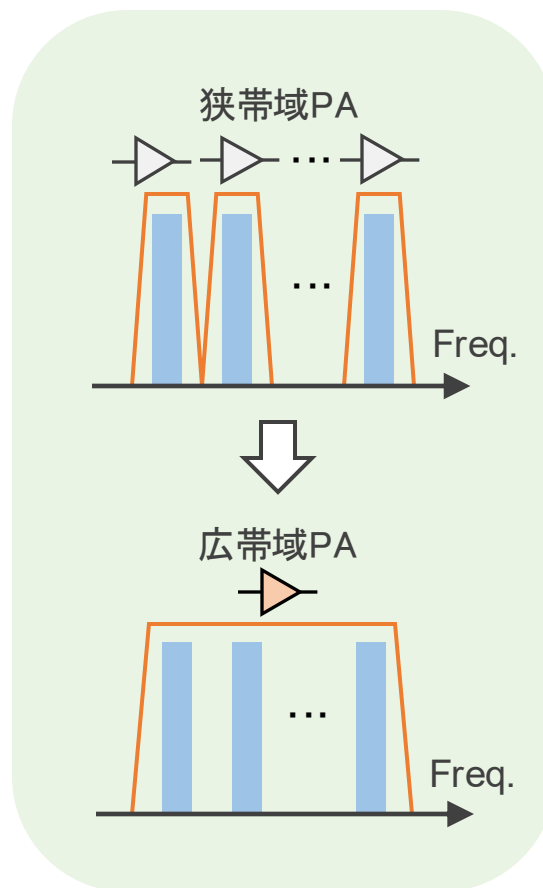


電力増幅器(PA)の技術課題 ~広帯域化~

- キャリアアグリゲーション(Carrier Aggregation)への対応
- 複数PAを統合した省スペース実装



CAによる帯域拡大



ハードウェアの高密度化

概要

1. 背景
2. 高効率化技術
 - a. 基本原理
 - b. 高調波処理回路
 - c. FET寄生成分の影響
3. 広帯域化技術
 - a. 連続モード増幅器
 - b. 基本波／高調波回路の一体設計
4. 応用事例
 - a. 負荷変調増幅器
 - b. 広帯域SLMBA
5. まとめ

高調波処理による増幅器の高効率動作 [1]

- 適切な基本波整合と高調波処理により効率100%(理想)が実現可能。

電力損失

$$P_{loss} = \frac{1}{T} \int_0^T i_d(t) \cdot v_{ds}(t) dt$$

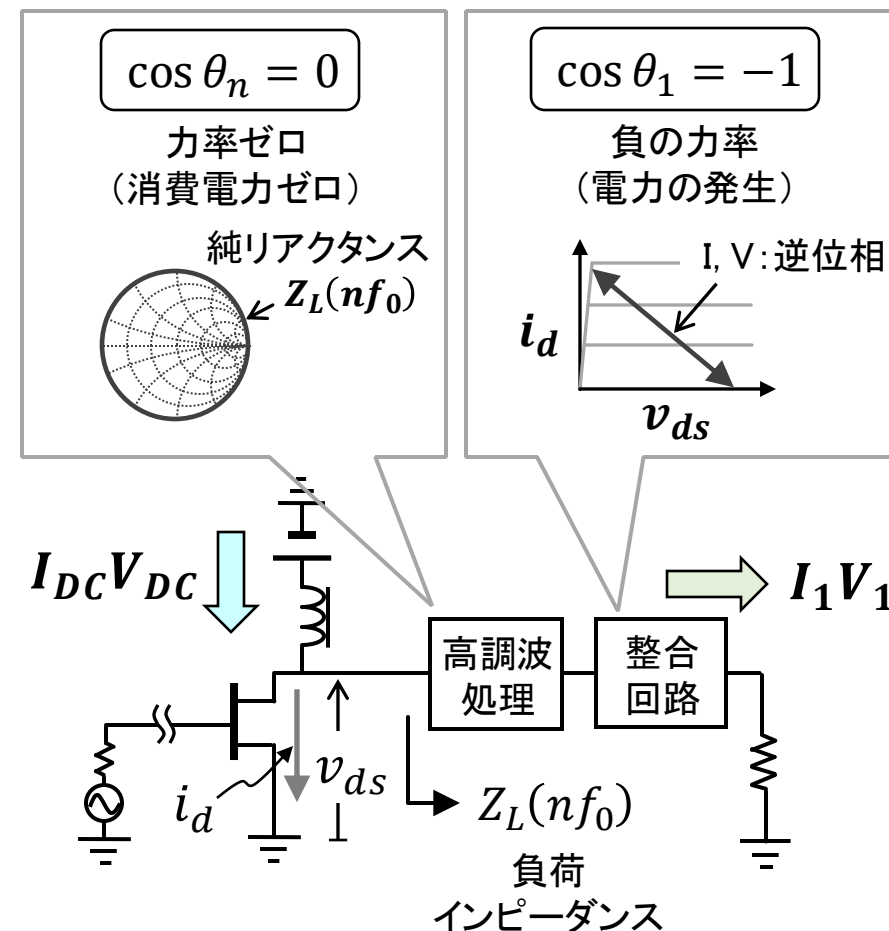
電流・電圧の
位相差

$$= \underbrace{I_{DC} V_{DC}}_{DC} + \underbrace{I_1 V_1 \cos \theta_1}_{RF(基本波)} + \sum_{n=2} \underbrace{I_n V_n \cos \theta_n}_{RF(高調波)}$$

$I_{DC} V_{DC} + I_1 V_1 (-1) = 0$ $\cos \theta_n = 0$
 (基本波整合) (高調波処理)

↓

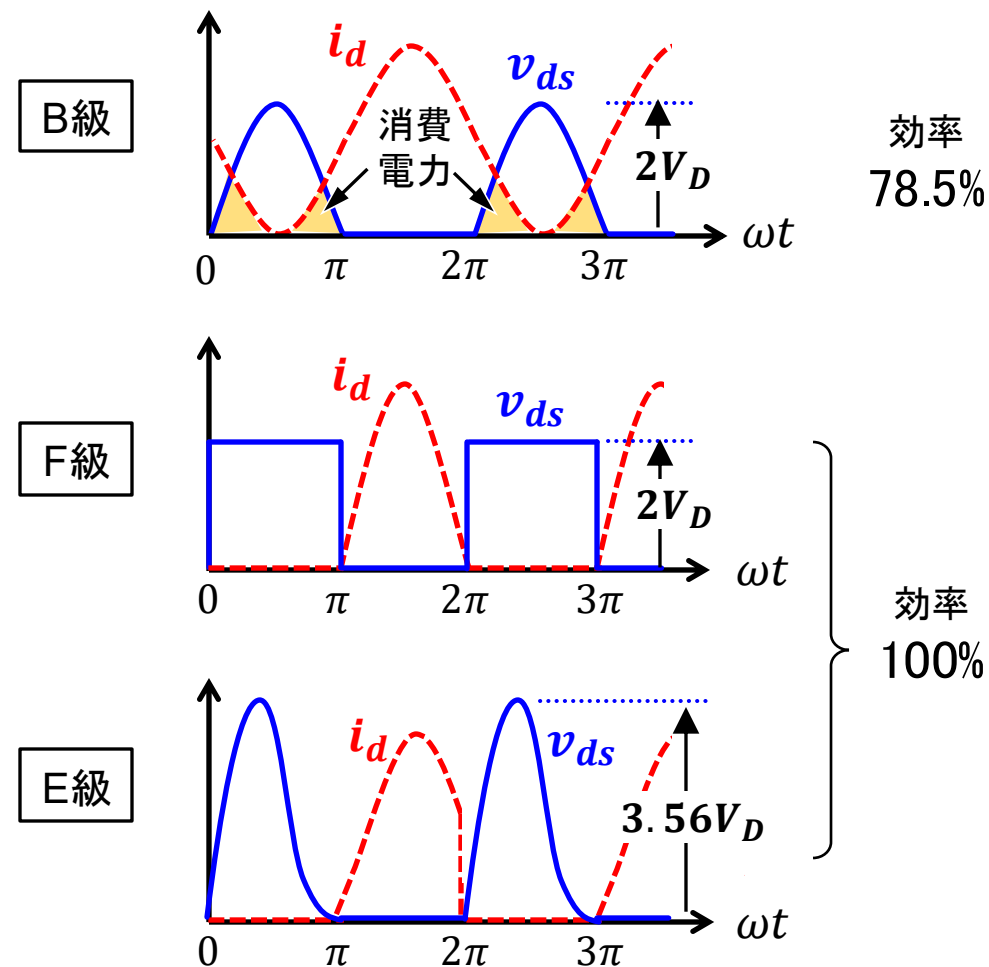
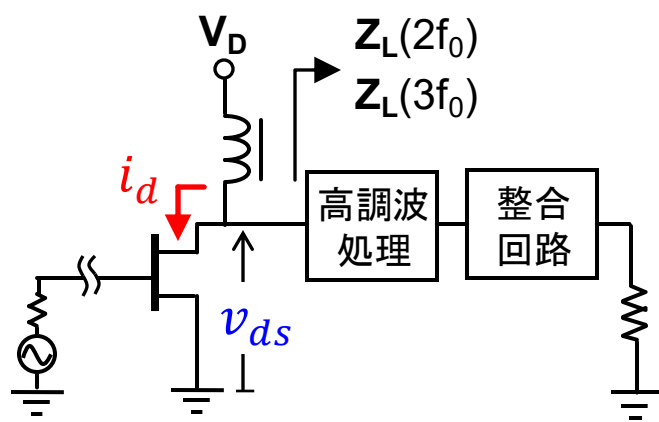
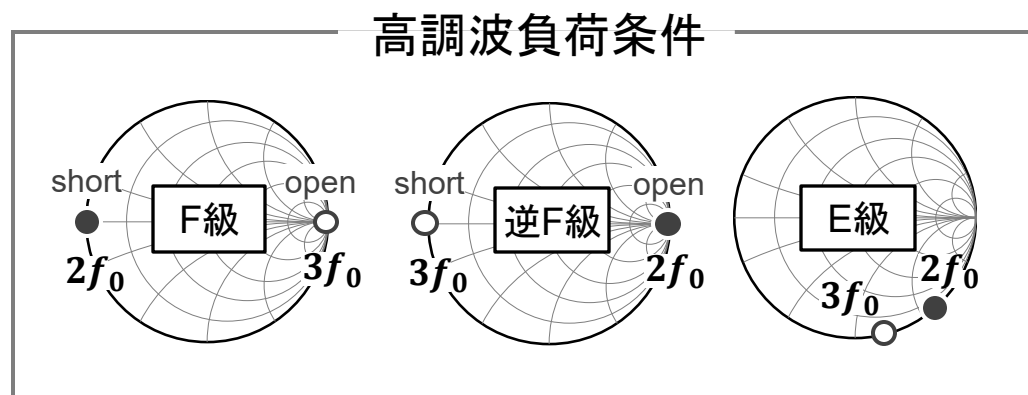
電力効率 100%



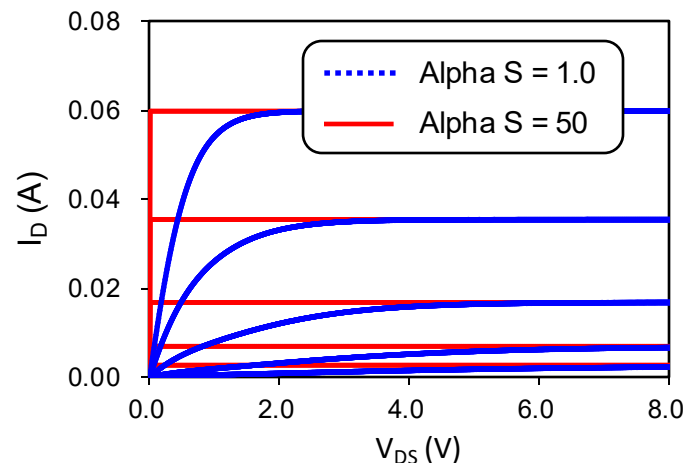
[1] 本城和彦, 高山洋一郎, 石川亮, 電子情報通信学会 和文論文誌C, vol. J97-C(12), 2014.

代表的な動作級

- 回路設計では、目的に応じて動作級の特徴を踏まえた選定が重要。



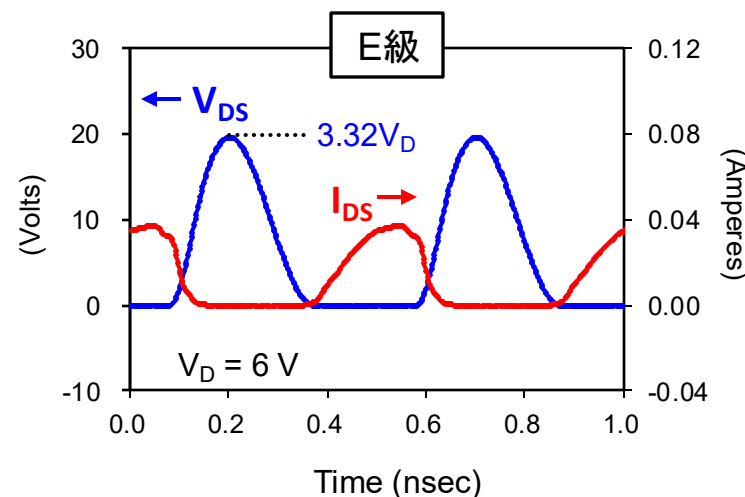
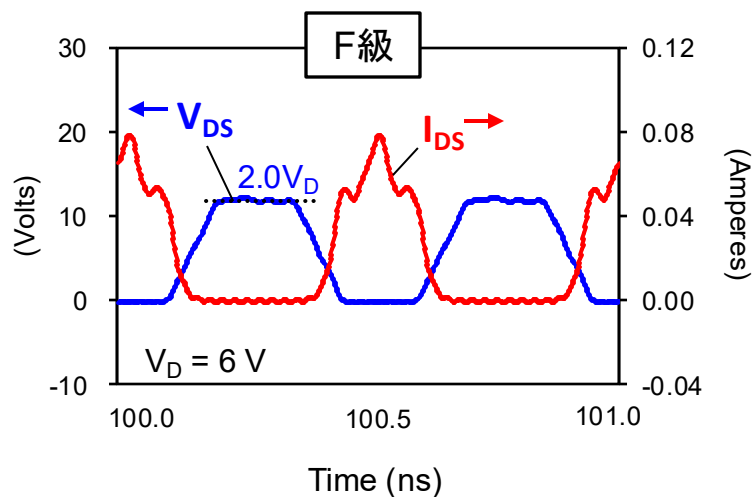
電流・電圧時間波形のシミュレーション



FETモデルのI-V特性

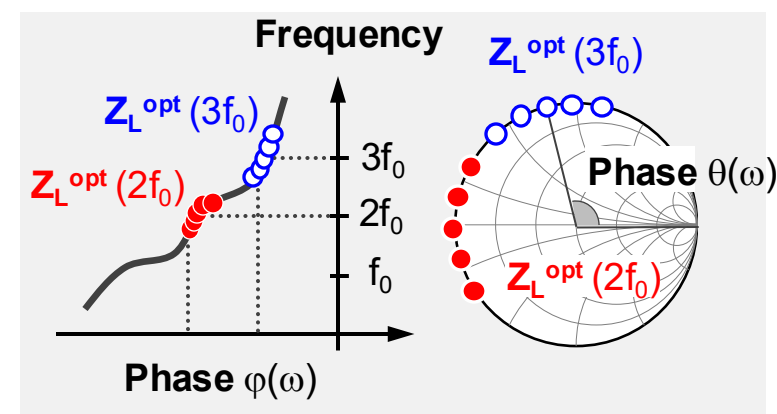
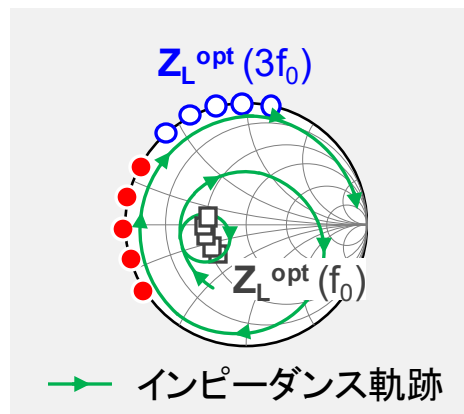
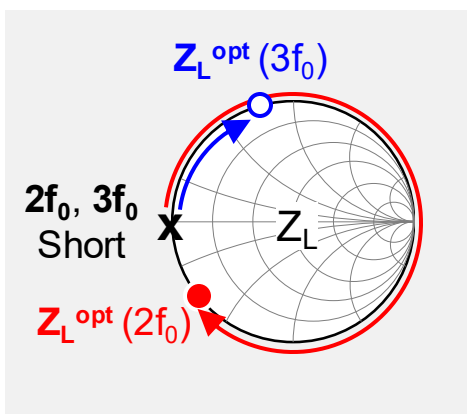
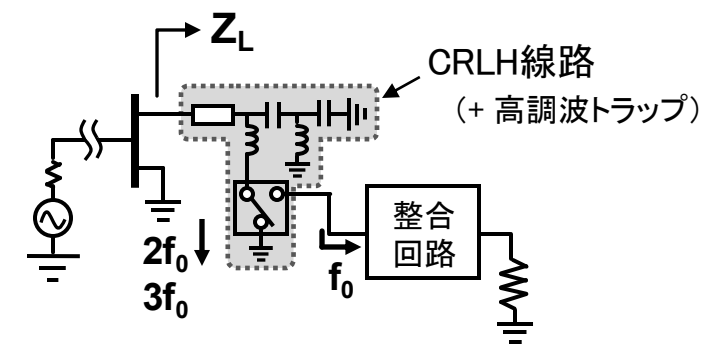
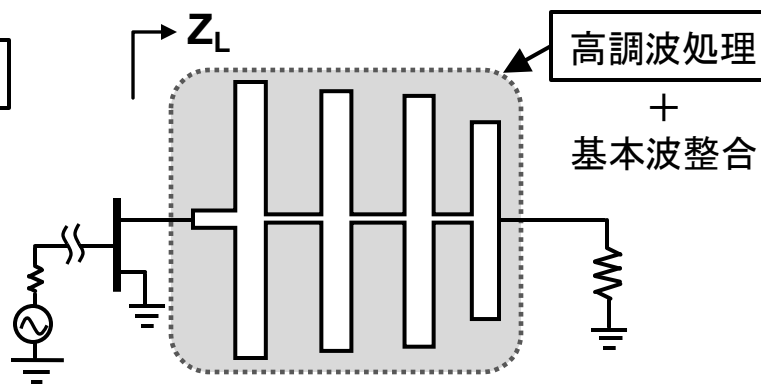
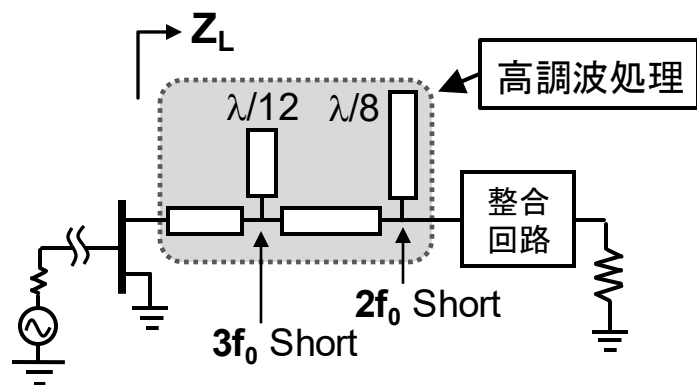
解析条件

- Harmonic Balance解析
- Angelov FETモデル(ADS)
寄生成分ゼロ
Knee電圧ゼロ
- $f = 2 \text{ GHz}$, $V_D = 6 \text{ V}$
- 8次の高調波まで考慮



シミュレーション結果

高調波処理回路 ～回路構成の違い～



広帯域化
 回路サイズ

☆

☆☆

マイクロストリップ線路
 (スタブ型)

☆☆☆

☆

マイクロストリップ線路
 (LPF型)

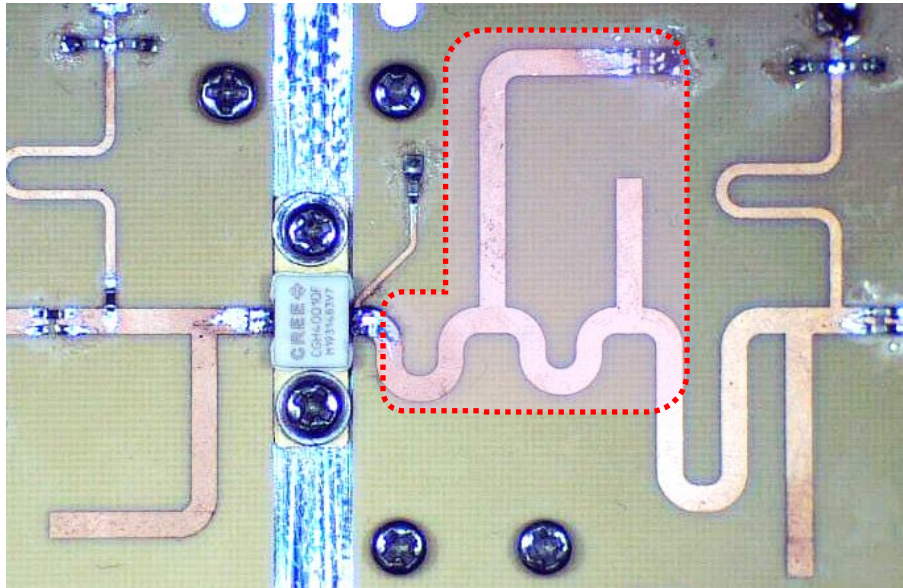
☆☆☆

☆☆☆

右手／左手系複合 (CRLH) 線路*

高調波処理回路 ～実装例と外観～

マイクロストリップ線路スタブ型 [2]

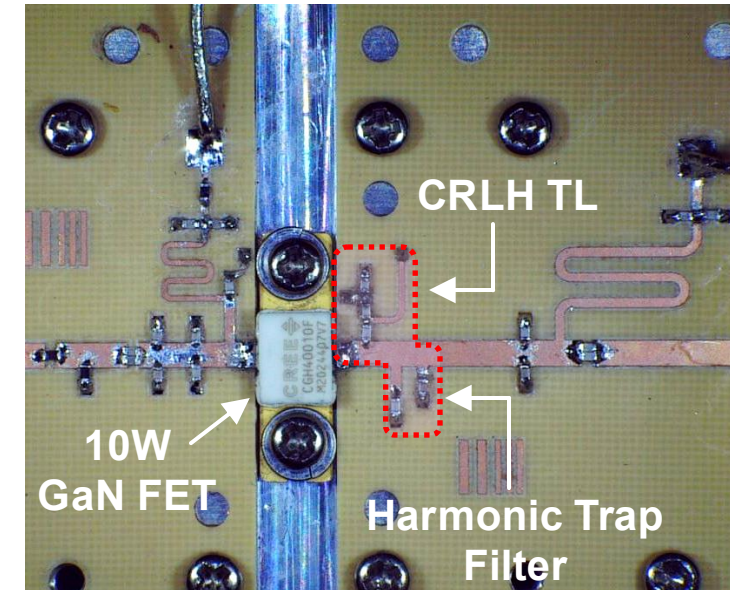


高調波処理部

- 2GHz帯 E級増幅器
- Drain Efficiency 77.1%
- PAE 72.1%

※ 同縮尺, 同一FET, 同一基板で比較

CRLH線路型 [3]



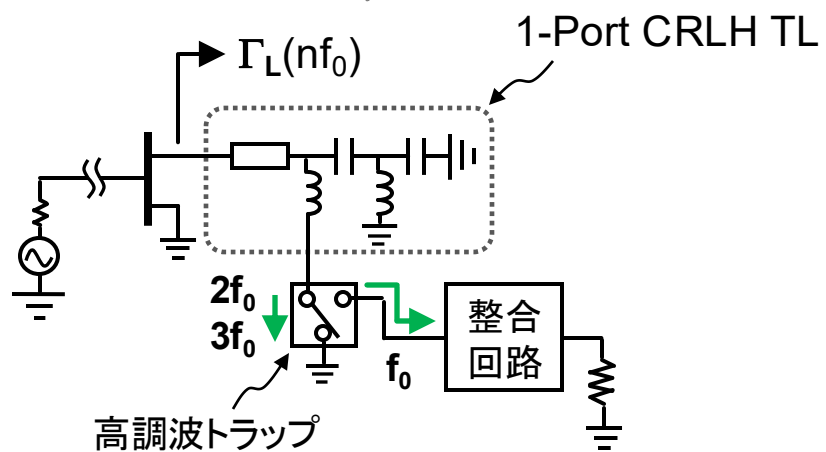
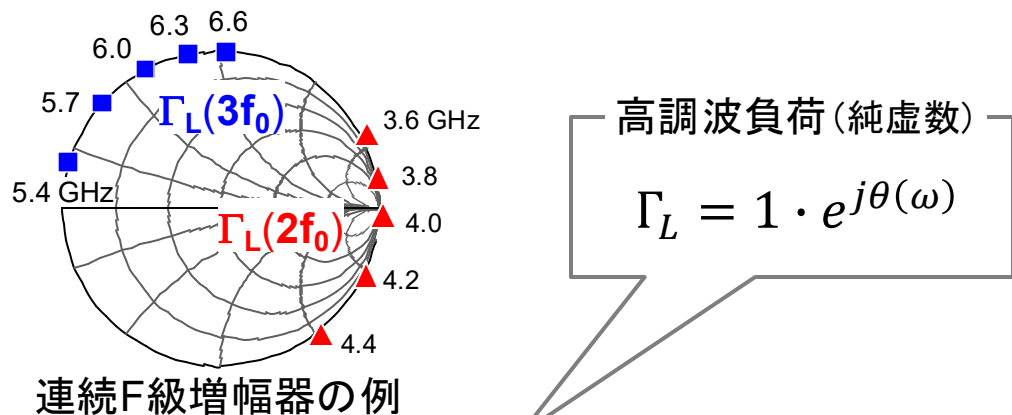
- 2GHz帯 準逆F級増幅器
- Drain Efficiency 84.6%
- PAE 78.4%

[2] R. Takahashi and S. Tanaka, Asia Pacific Microwave Conference (APMC), Nov. 2024.

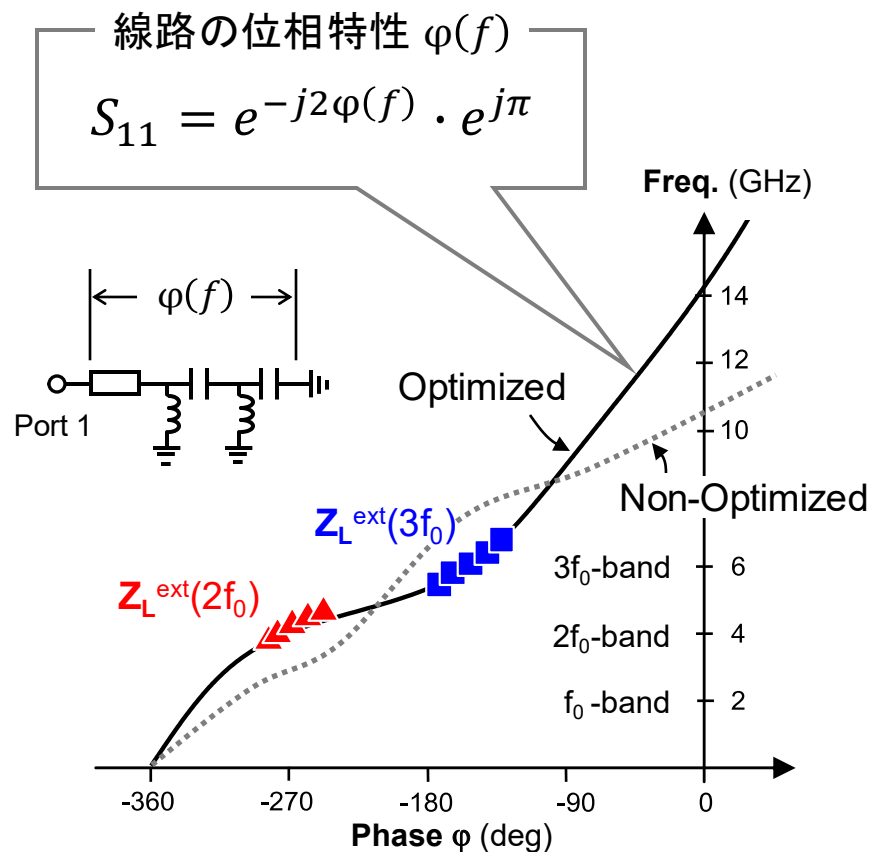
[3] S. Tanaka, R. Mogami, N. Iisaka, K. Honjo, and R. Ishikawa, IET Circuits, Devices & Systems, Vol. 2024, Article ID 2690713, 2024.

1ポートCRLH線路*の特徴

* Composite Right-/Left-Handed Transmission Line (右手/左手系複合線路)



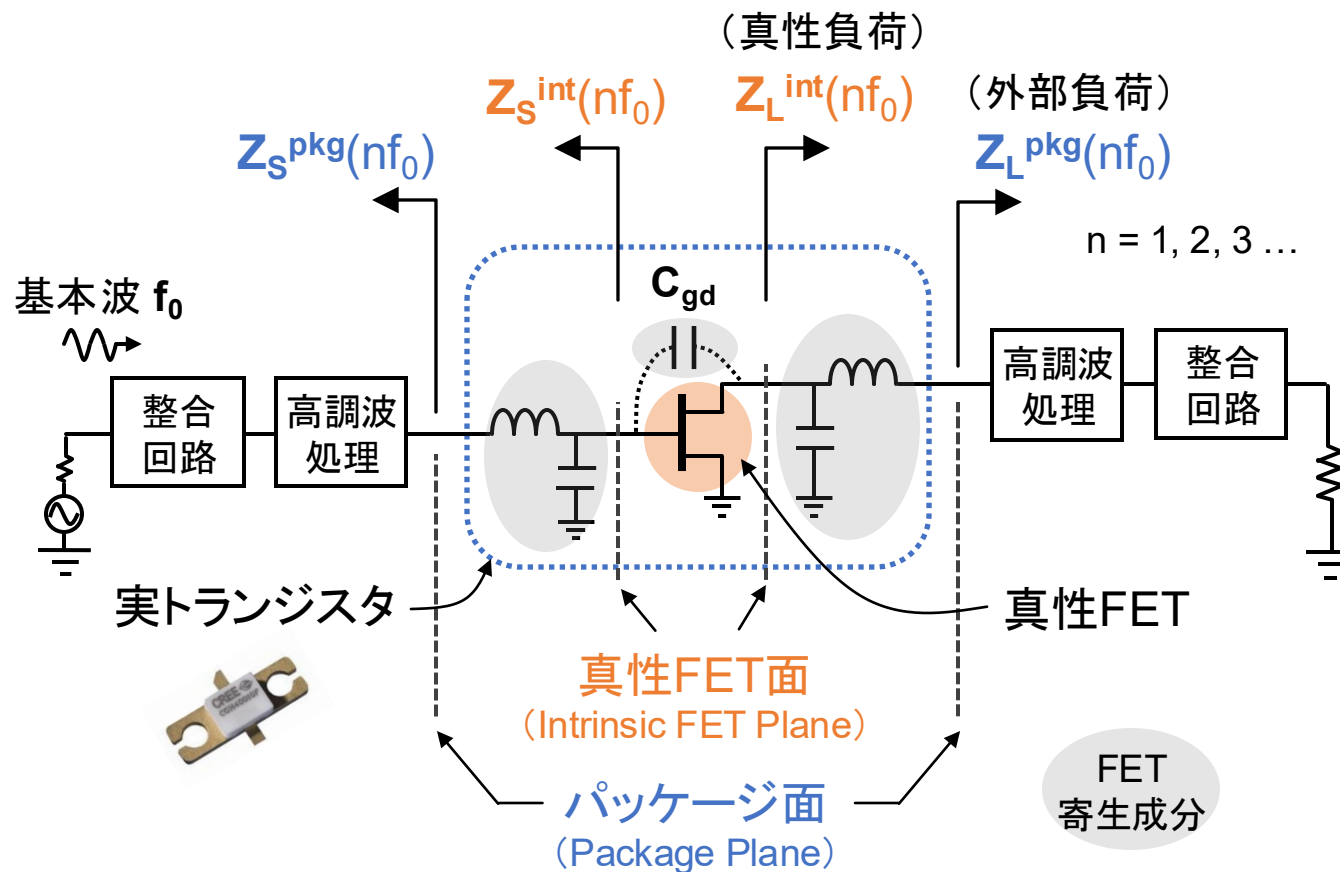
高調波処理回路としての応用例



分散特性

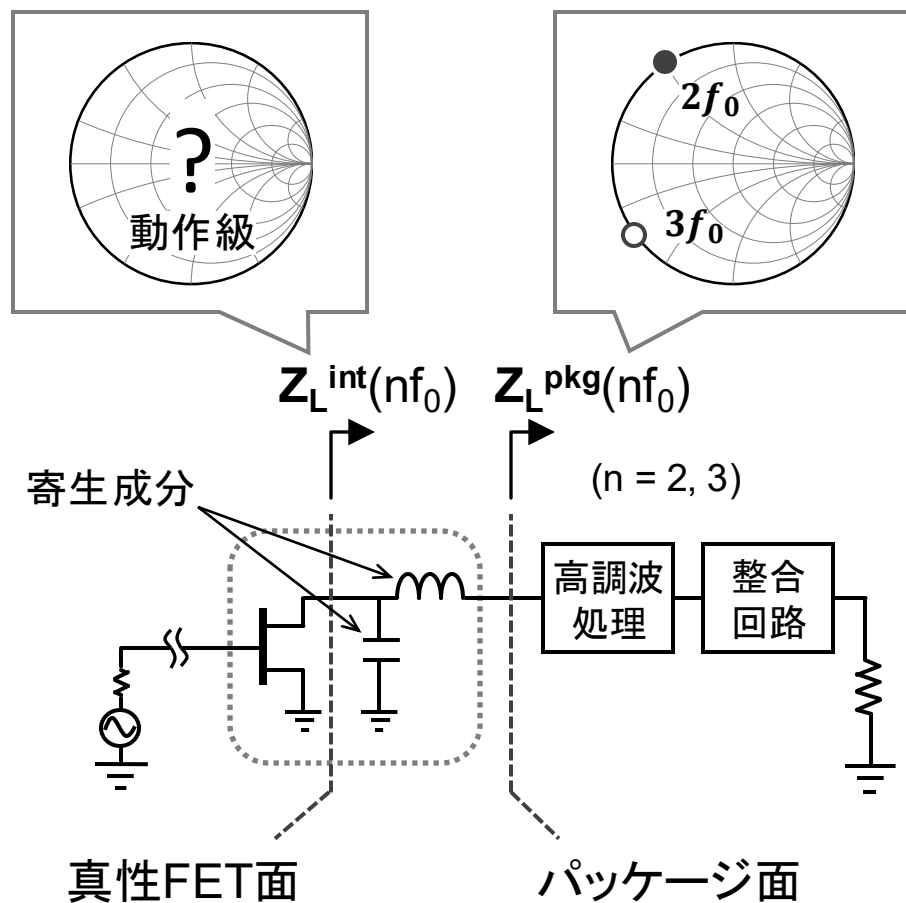
FET寄生成分を考慮したPA設計

- 高効率・広帯域設計のため、真性負荷と外部負荷の関係を把握することが肝要

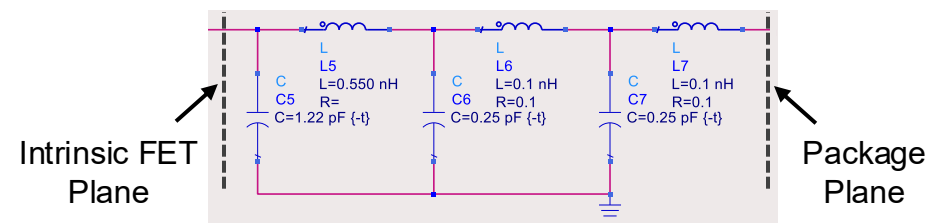


動作級の正確な把握

- 信頼性の高い高効率設計のため、真性面での高調波負荷やIV波形の情報が重要

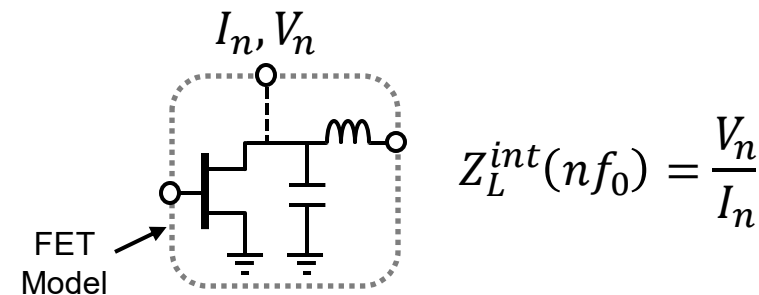


① 寄生成分の等価回路を利用 [4]



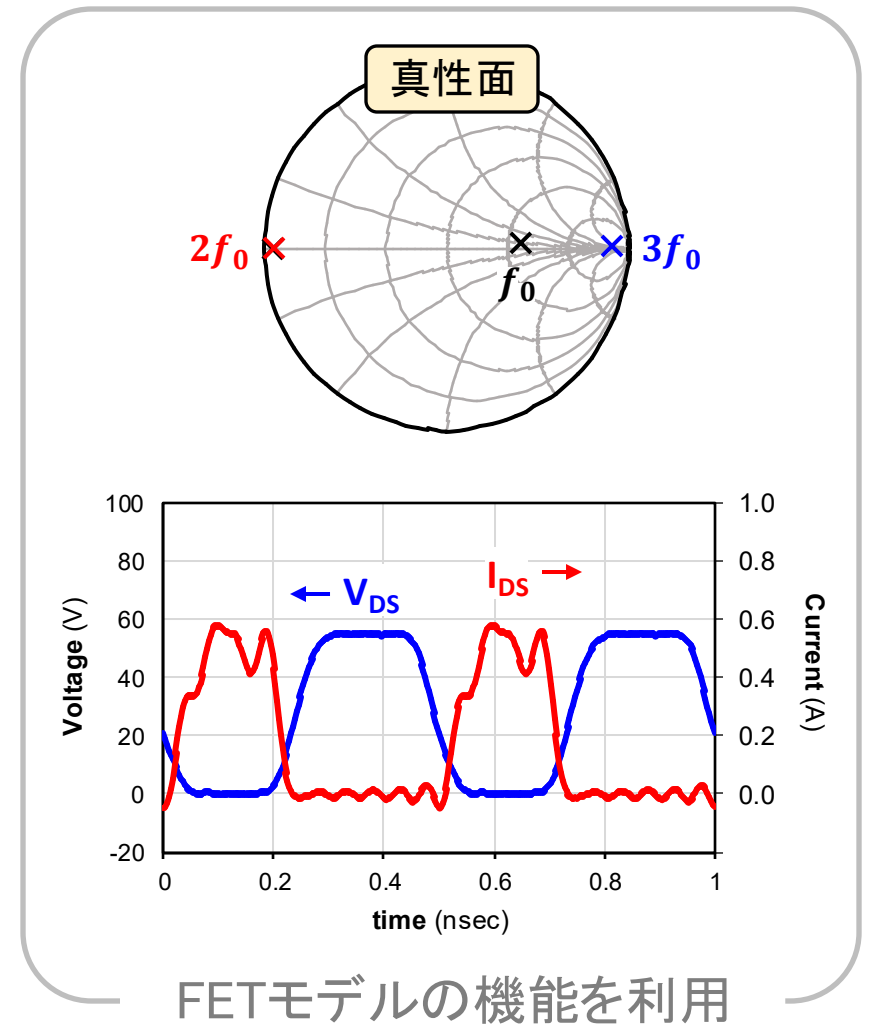
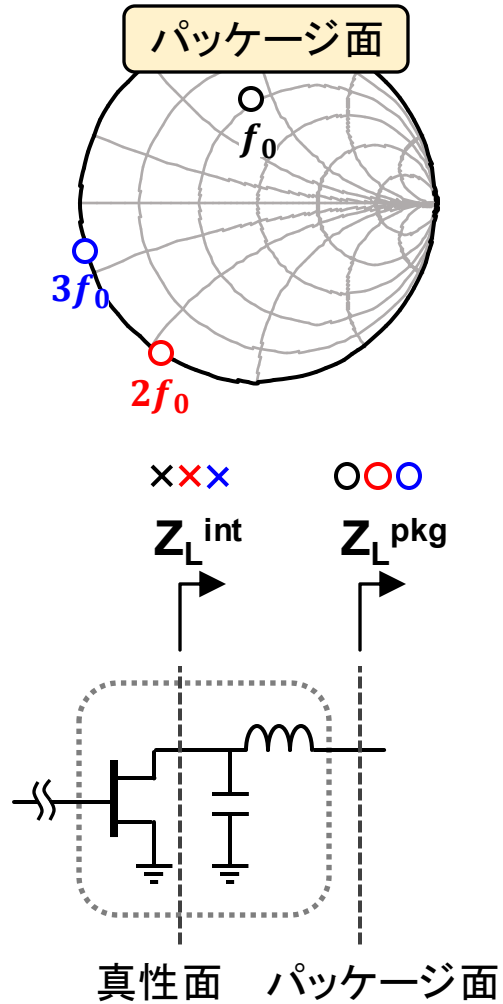
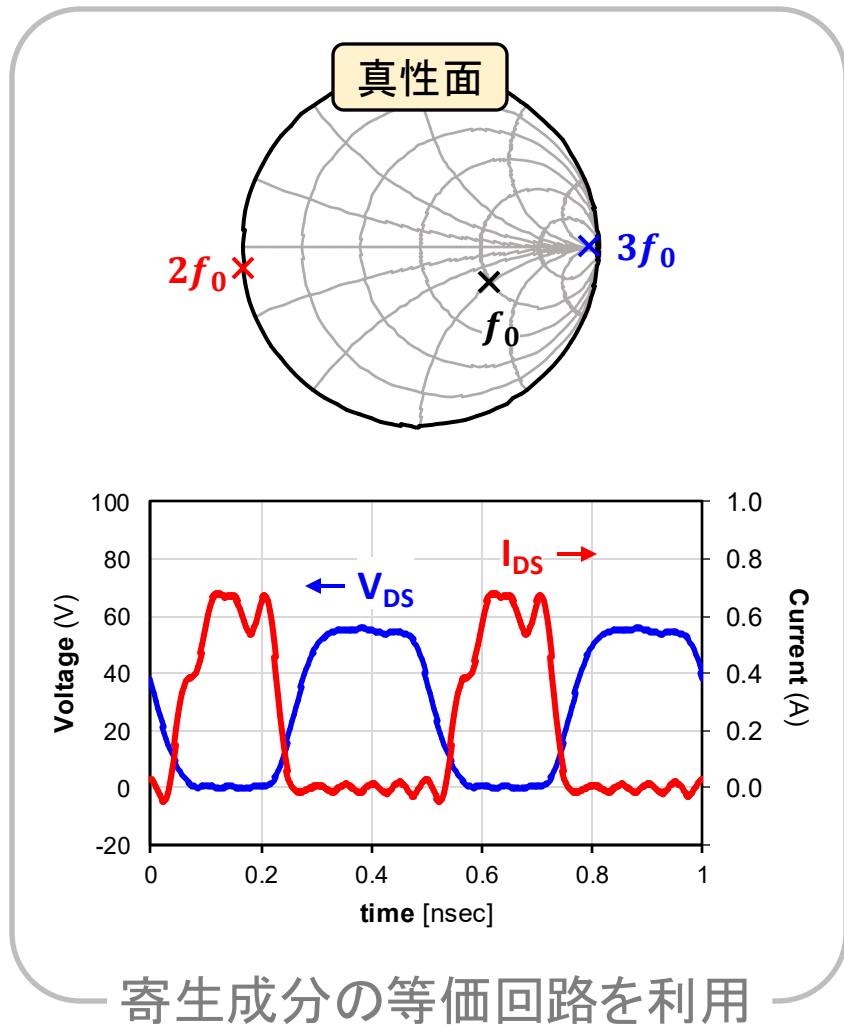
等価回路 [*]
 (FET: CGH40010F)

② FETモデルの追加機能を利用



[4] P. J. Tasker and J. Benedikt, IEEE Microwave Magazine, vol. 12(2), 2011.

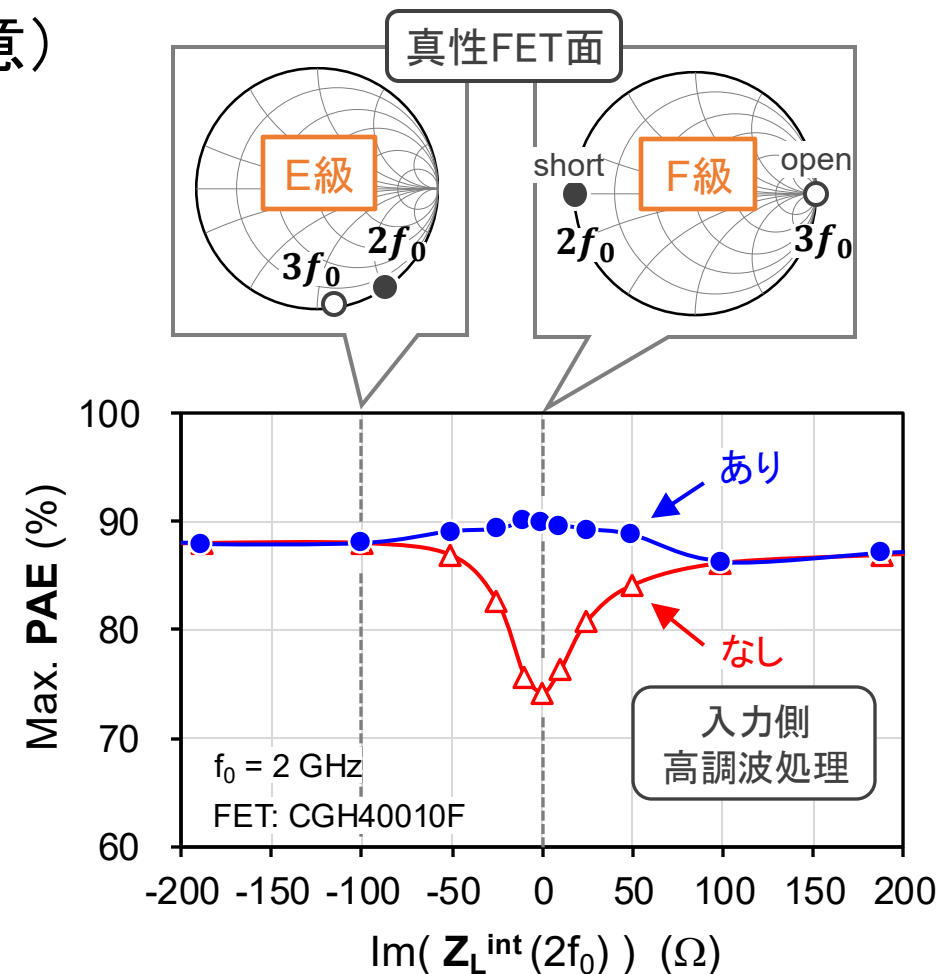
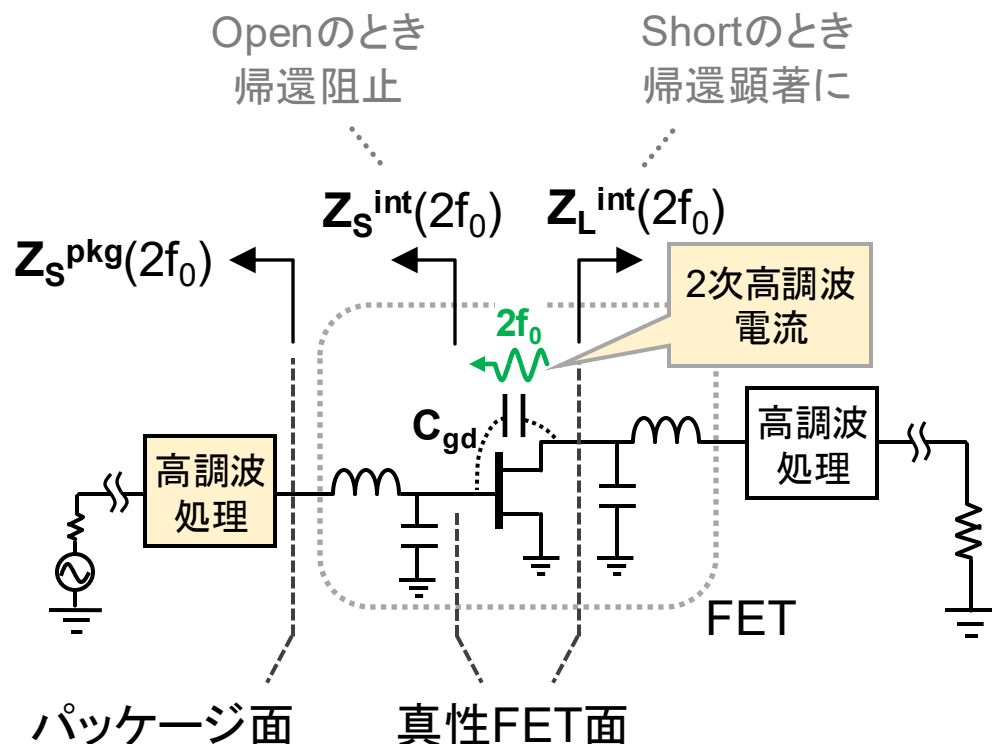
増幅器の動作級確認



シミュレーション条件: FETモデル CGH4010F, バイアス条件 $V_{gs} = -3.0V$ $V_{ds} = 28V$

帰還容量Cgdの影響

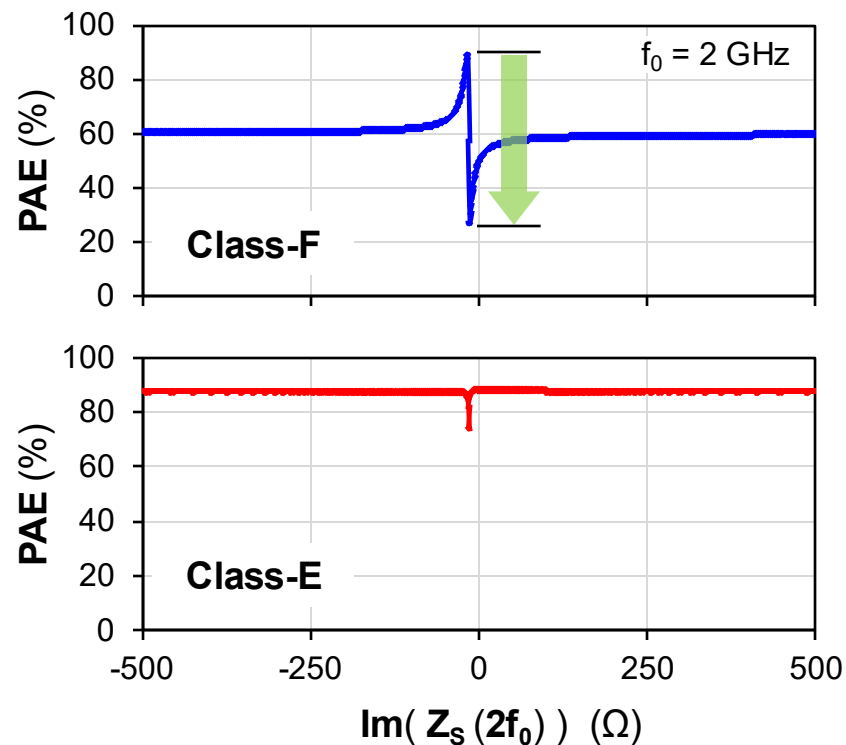
- 効率低下：動作級によって影響の程度に大きな差異 [5]
- 対策：入力側高調波処理(副作用に要注意)



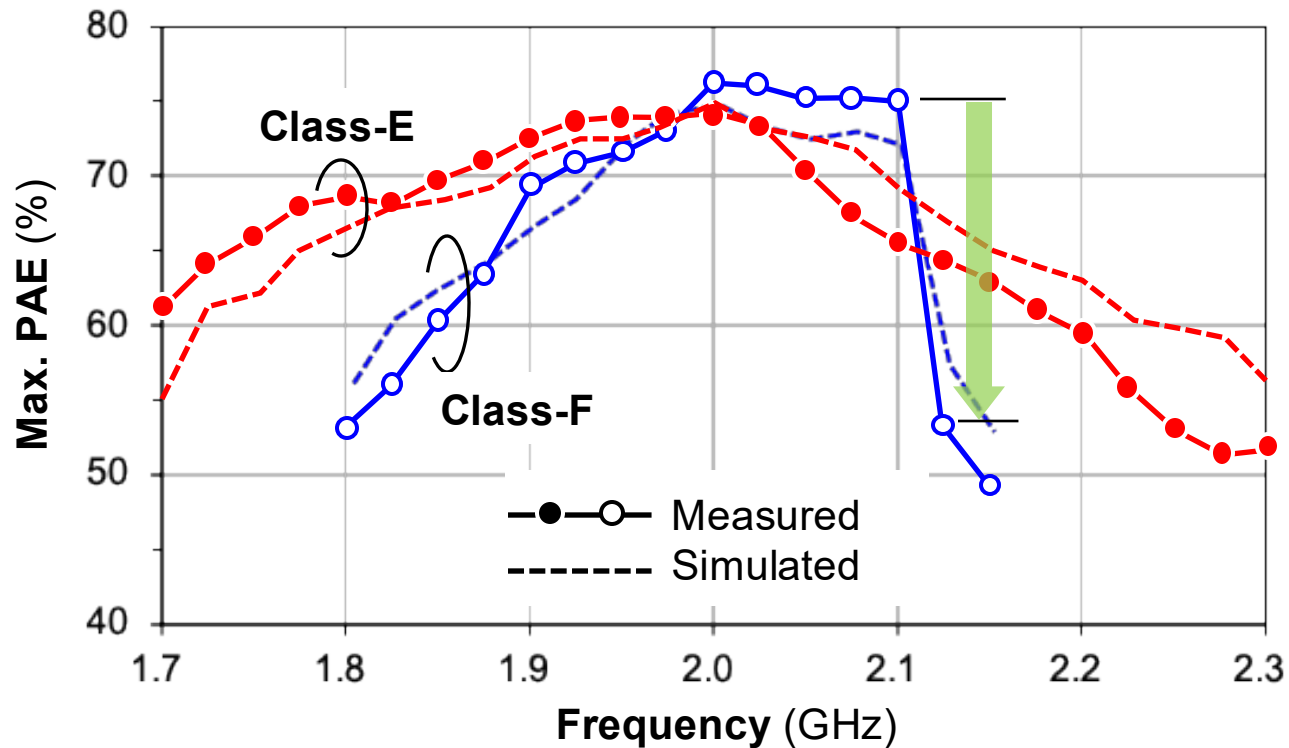
[5] S. Tanaka, H. Asami and T. Suzuki, IEICE Trans. on Electronics, vol.E105-C(10), 2022.

入力側高調波処理の留意点

- 劣化した効率の回復に有効である一方で、帯域幅を狭めるリスクがある



シミュレーション(理想条件)

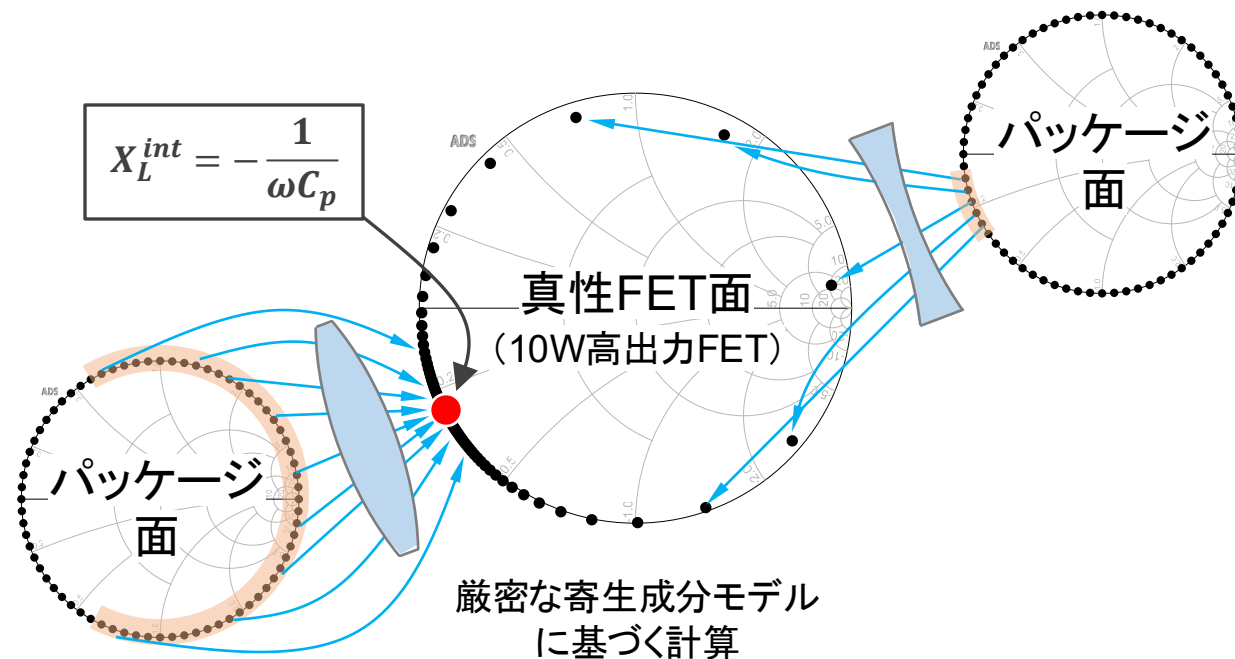


実験結果

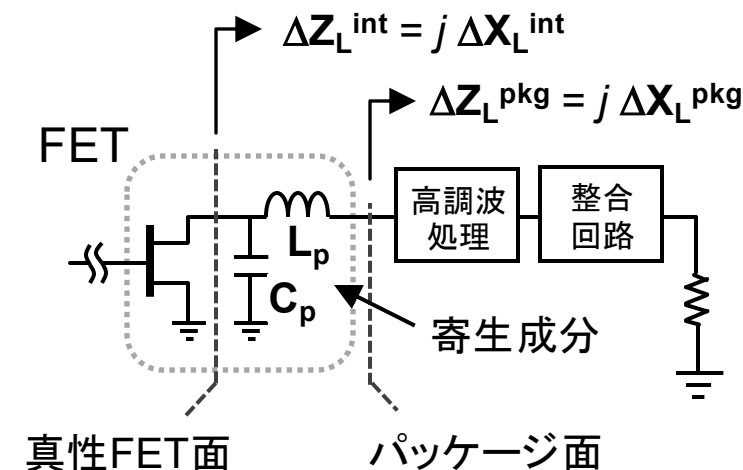
[5] S. Tanaka, H. Asami and T. Suzuki, IEICE Trans. on Electronics, vol.E105-C(10), 2022.

高調波負荷の変動耐性 ～寄生成分の影響～

- 真性FET面のOpenに近い負荷は, PKG面での負荷の変動に対して不安定 [6]
- FETサイズと周波数の増大と共に顕著に



寄生成分を介した高調波負荷の変換



$$\frac{\Delta X_L^{int}}{\Delta X_L^{pkg}} = (1 + \omega C_p X_L^{int})^2$$

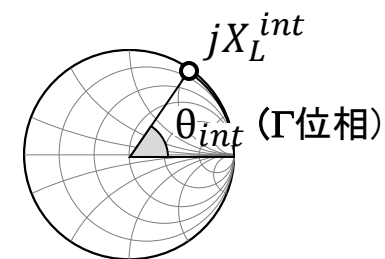
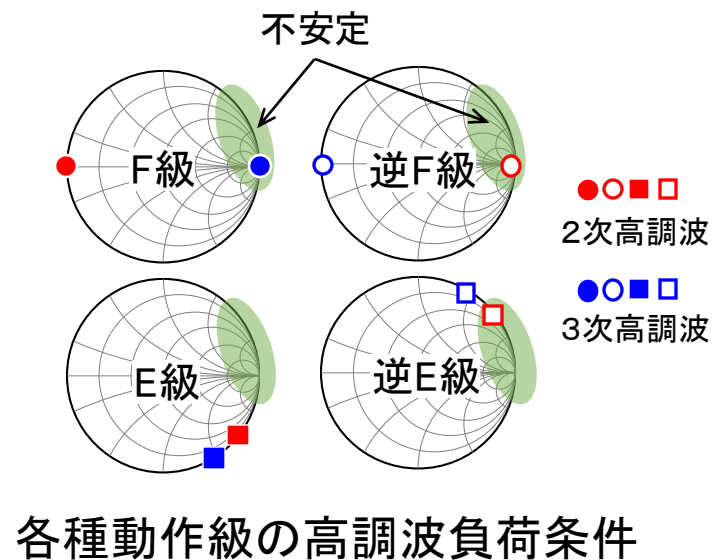
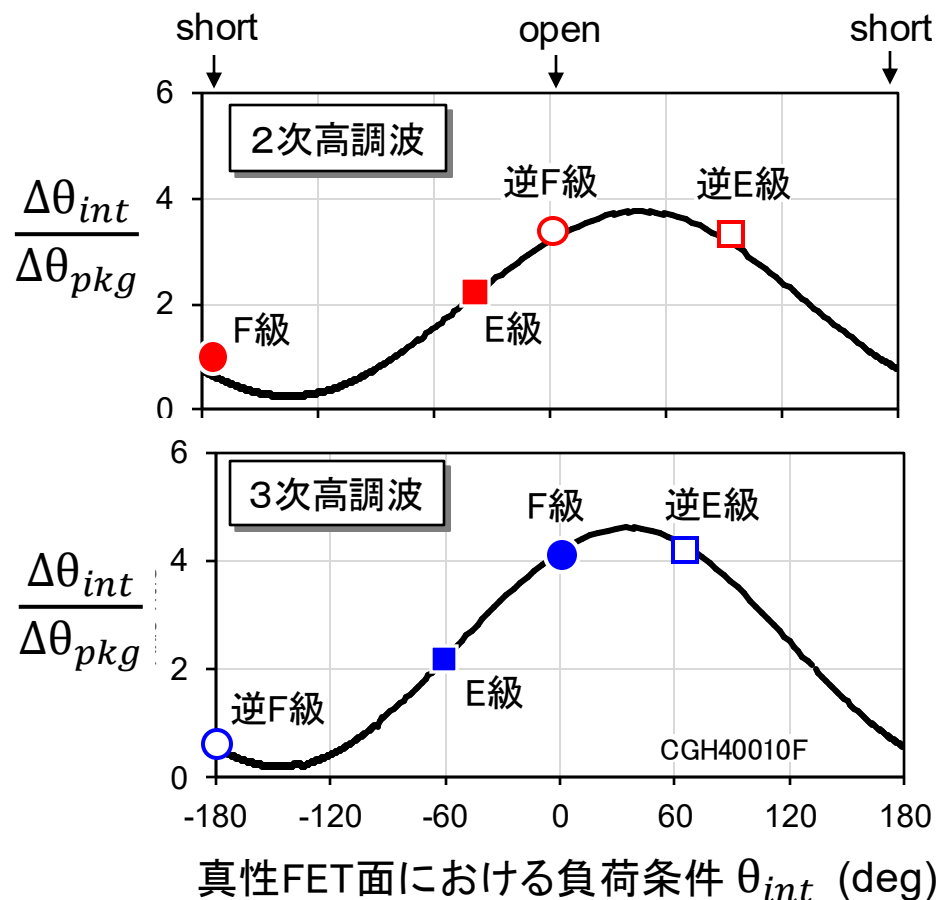
簡易モデルによる解析

[6] 畑幸太郎, 田中慎一, 電子情報通信学会 マイクロ波研究会 (11月鹿児島), 2025年.

代表的な動作級の比較 (10W GaN FET)

■ 動作級の安定性: E級 > F級 > 逆F級 > 逆E級

変動耐性
 低 ↑
 ↓ 高



θ_{int} の定義 (θ_{pkg} も同様)

概要

1. 背景
2. 高効率化技術
 - a. 基本原理
 - b. 高調波処理回路
 - c. FET寄生成分の影響
3. 広帯域化技術
 - a. 連続モード増幅器
 - b. 基本波／高調波回路の一体設計
4. 応用事例
 - a. 負荷変調増幅器
 - b. 広帯域SLMBA
5. まとめ

高調波の連続処理 [7]

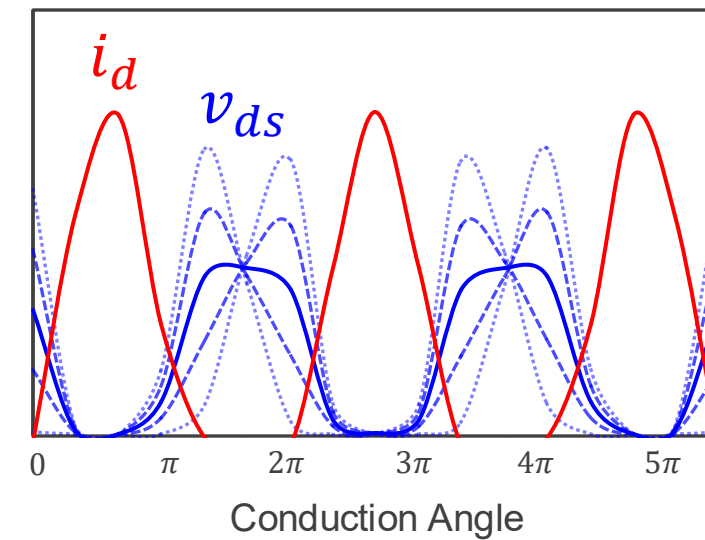
- 電流・電圧の記述式において電力効率には影響しない”不感変数”を導入 (Free Variable)

$$i_d(t) = I_m \left(\frac{1}{\pi} + \frac{1}{2} \cos \omega_0 t + \frac{2}{3\pi} \cos 2\omega_0 t - \dots \right)$$

$$v_{ds}(t) = V_m \left(1 - \frac{2}{\sqrt{3}} \cos \omega_0 t + \frac{1}{3\sqrt{3}} \cos 3\omega_0 t \right) \cdot (1 - \gamma \sin \omega_0 t)$$

— $\gamma = 0$ (F級動作)
 - - - $\gamma = -0.5, +0.5$
 ····· $\gamma = -1.0, +1.0$

連続F級増幅器

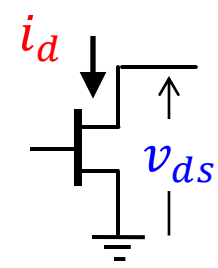


F級動作

ドレイン効率

$$\frac{\text{RF出力}}{\text{DC投入電力}} = \frac{\left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right)^2 \frac{I_m V_m}{\sqrt{3}}}{\frac{I_m V_m}{\pi}} = 90.7\%$$

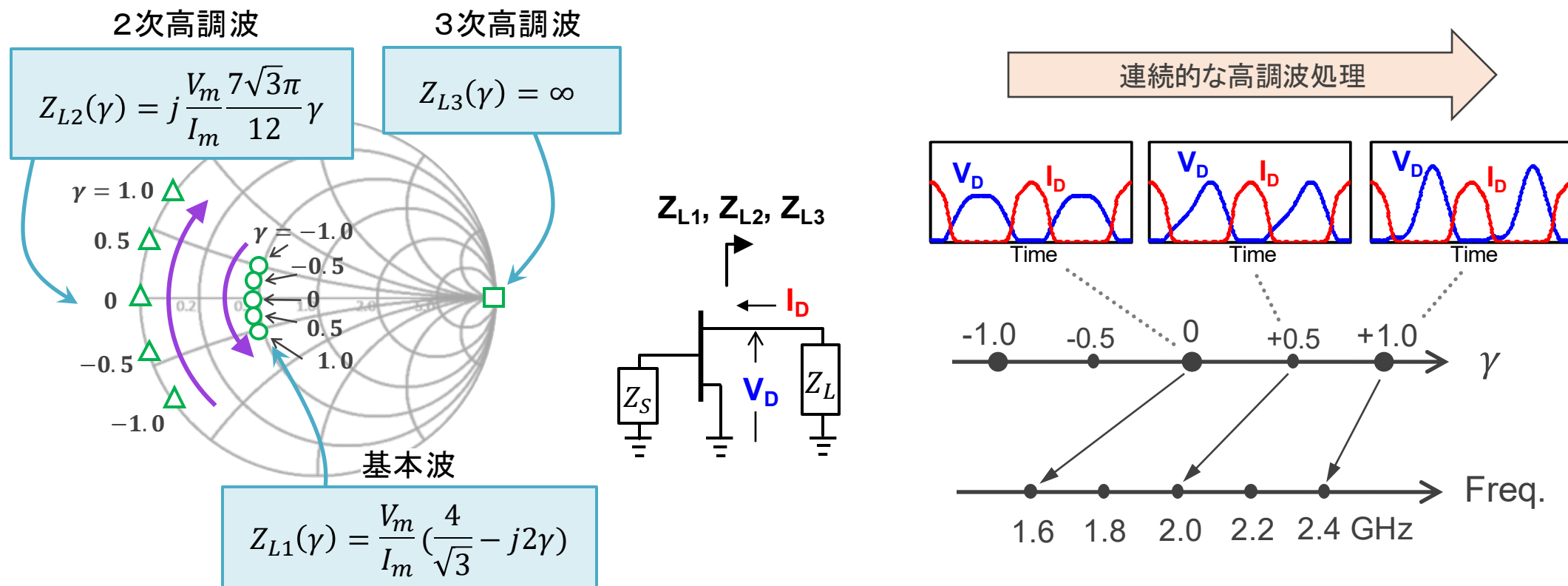
(γ に依らず一定)



[7] S. C. Cripps et al., IEEE Microw. and Wireless Comp. Lett., vol.19(10), 2009.

連続モード増幅器の設計方法

- 寄生成分を考慮しつつ，基本思想に対していかに忠実に設計できるかが課題 [8]



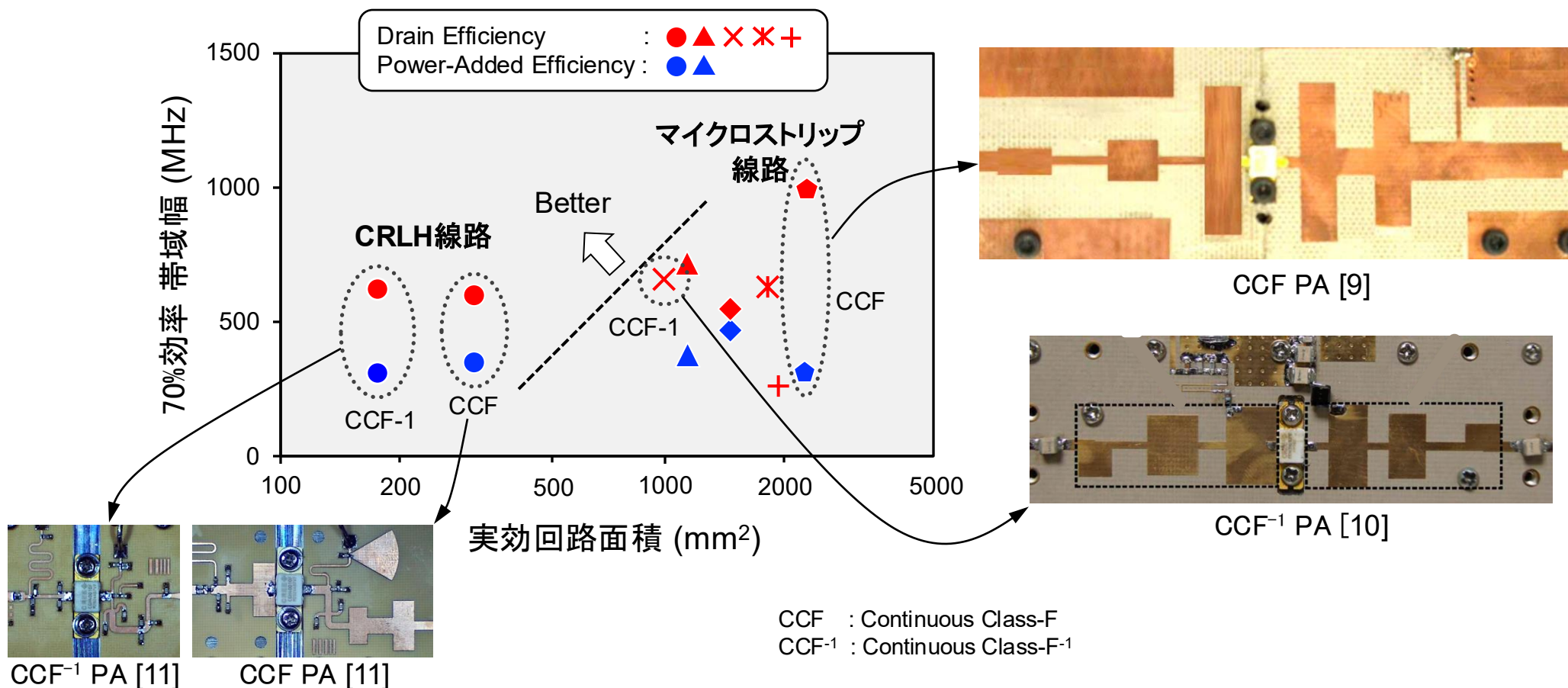
負荷インピーダンス条件 (連続F級)

γ の周波数への割り当て

[8] 田中慎一, 「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」, MWE Workshop Digest, TH6B-1, 2023.

連続モード増幅器の課題：回路サイズ

- 基本波から高調波まで広い帯域をカバーする整合回路は大型化する傾向



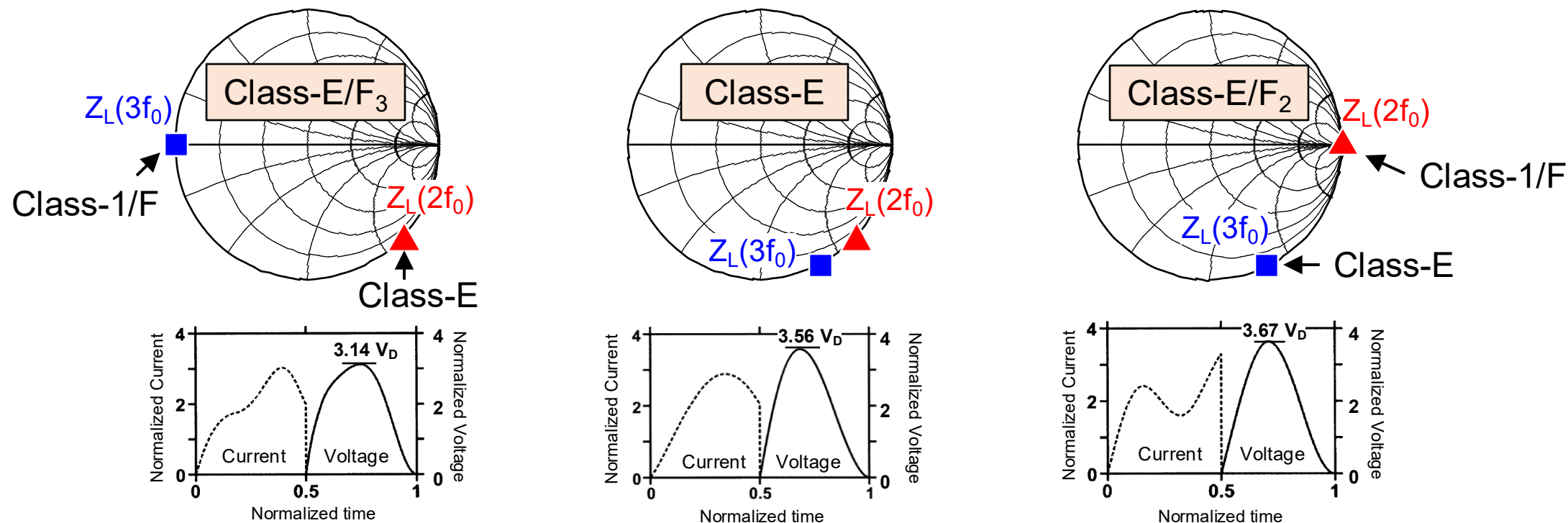
[9] Y. Sun and X. Zhu, IEEE Wireless Comp. Lett., vol. 25(4), 2015.

[10] Y. Tuffy, L. Guan, A. Zhu, and T. J. Brazil, IEEE Trans. Microwave Theory and Tech., vol. 60(6), 2012.

[11] E. Tsuji, S. Aonuma, and S. Tanaka, International Journal of Microwave and Wireless Technologies, vol. 17(1), 2025.

E級動作とその派生モード

- 狭帯域設計のE級PAにおいても, E/F級へ自然に遷移して帯域が拡大^[2]
- E/F級動作は, E級のメリットを保持しつつデメリットを緩和することが可能^[12]

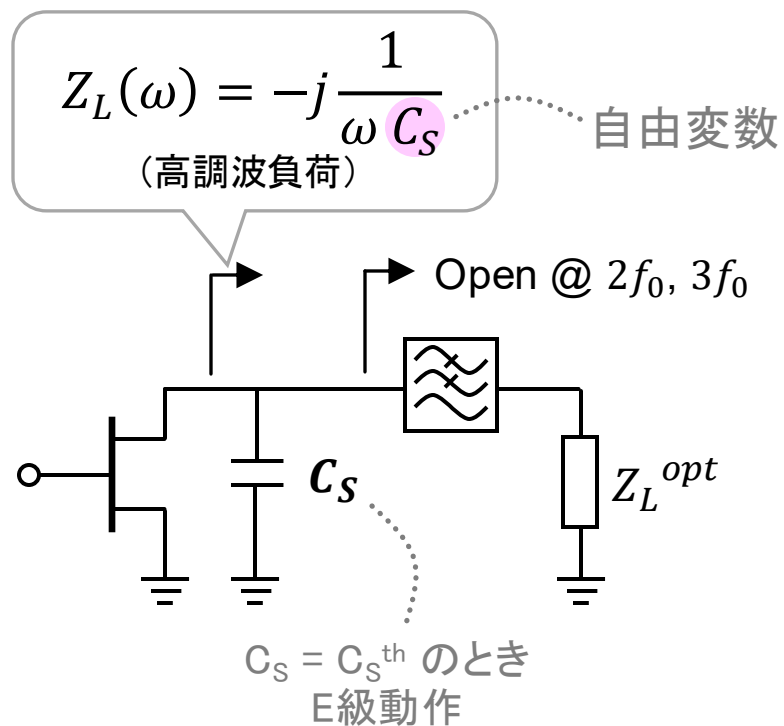


[2] R. Takahashi and S. Tanaka, Asia Pacific Microwave Conference (APMC), Nov. 2024.

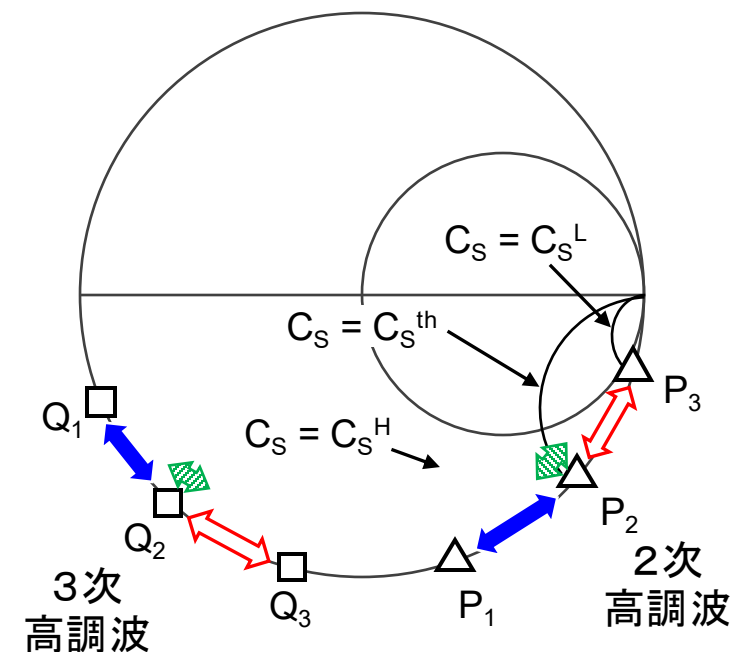
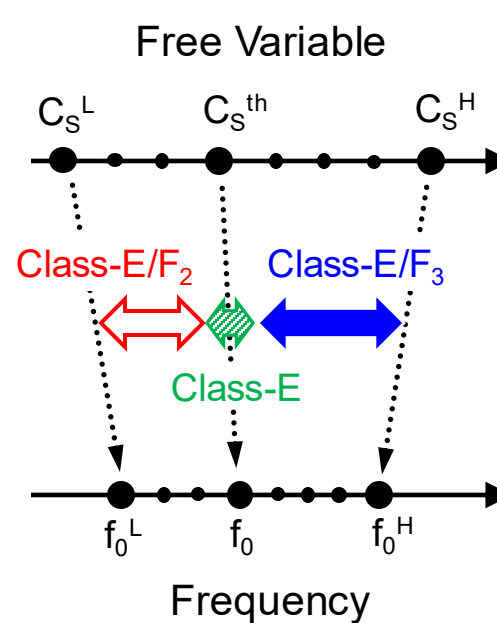
[12] S. D. Kee, I. Aoki, A. hajimiri, and D. Rutledge, IEEE Trans. Microwave Theory and Tech., vol. 51(6), 2003.

E級をベースにした連続モード増幅器

- E級派生モード群を使うことでシームレスなモード遷移を実現



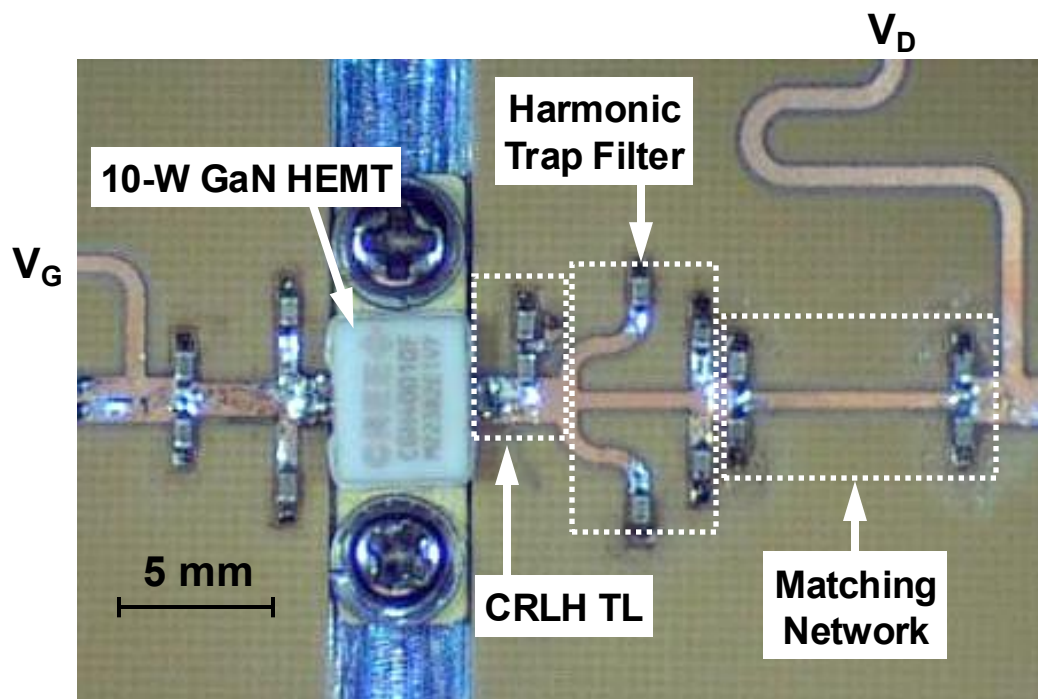
C_S と高調波負荷の関係



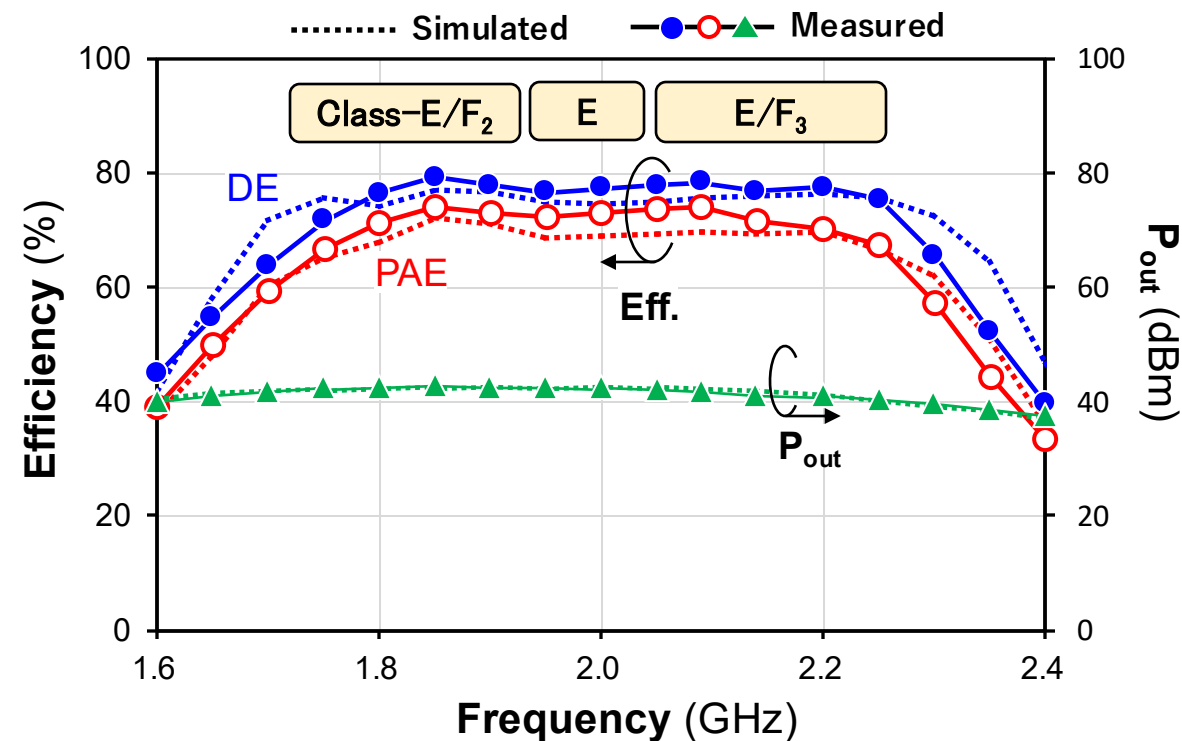
E/F級動作を利用するモード遷移

連続E級・E/F級GaN FET増幅器 [13]

- 1.7-2.3GHzの帯域で高効率動作 ($DE \geq 70\%$) を実現
- 基本波整合の改善(後述)により, 帯域はさらに拡大可能



外観写真

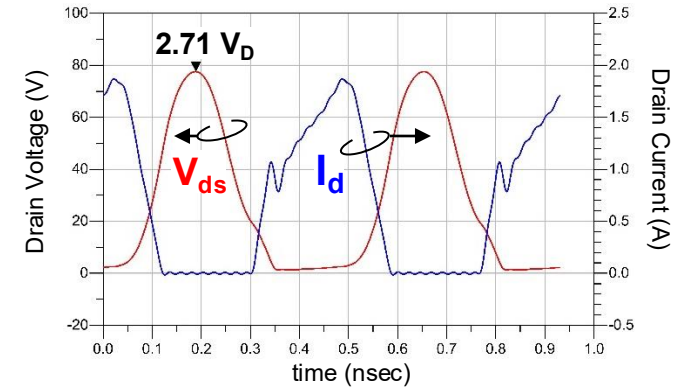
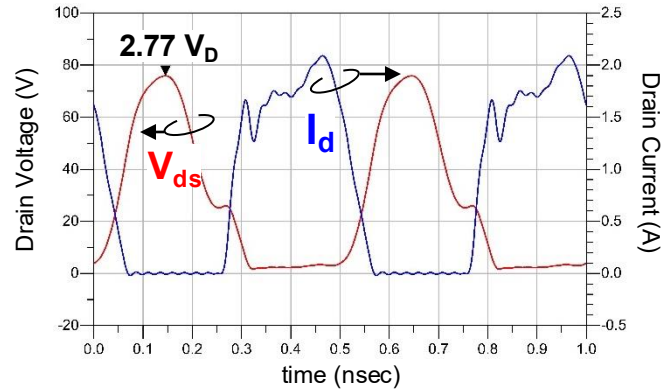
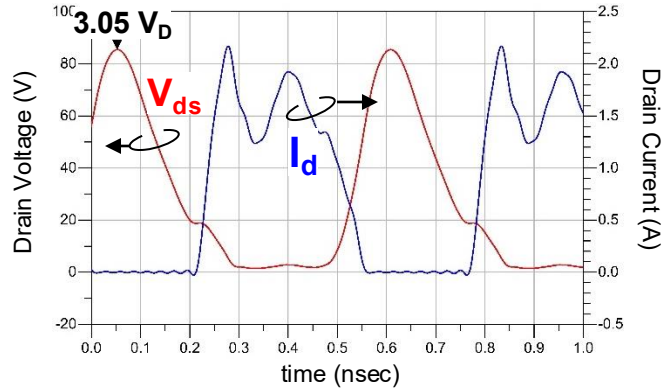


増幅器特性

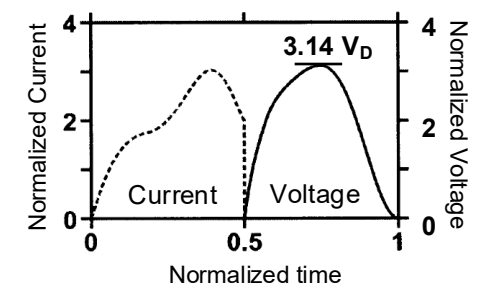
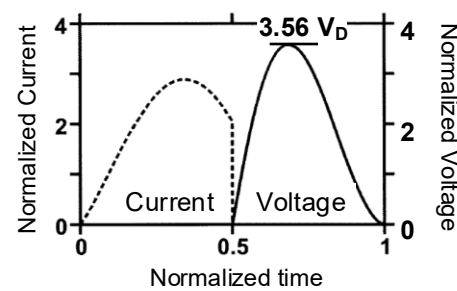
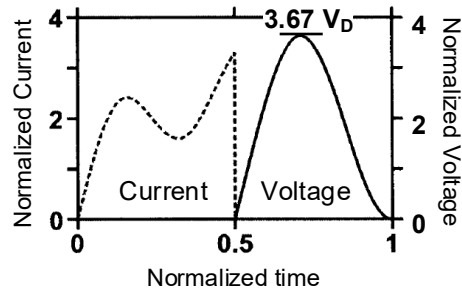
[13] 高橋律樹, 田中慎一 電子情報通信学会マイクロ波研究会 2025年3月 (技術研究報告 MW2024-170)

連続E級・E/F級動作の確認

解析波形
 (真性FET面)



(理論波形)



動作級

Class-E/F₂

Class-E

Class-E/F₃

周波数

1.8 GHz

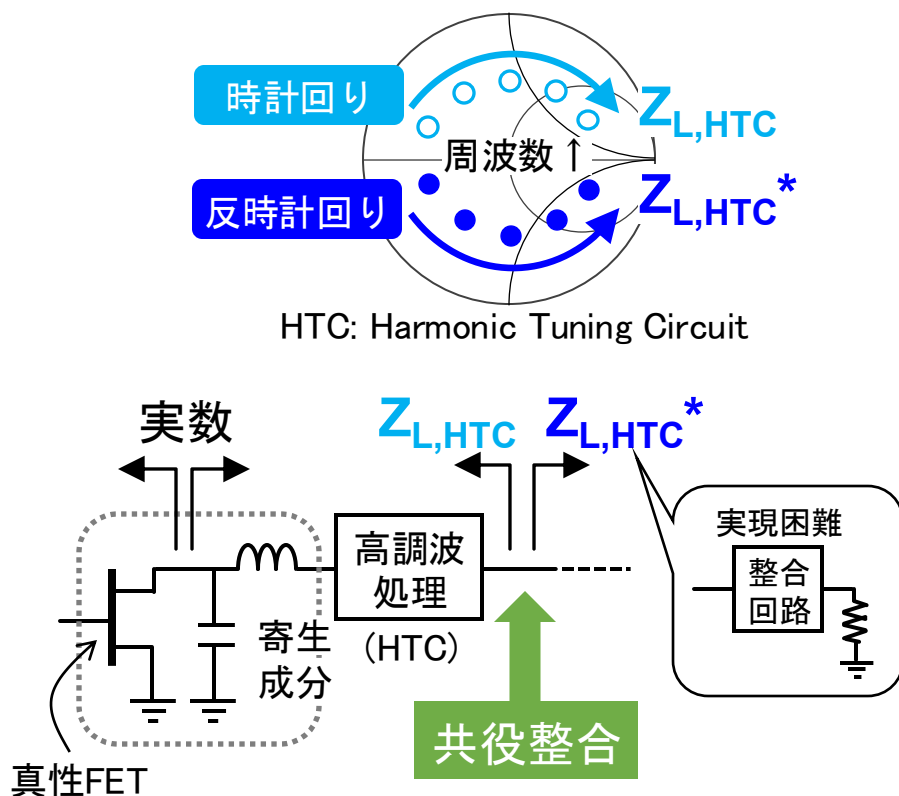
2.0 GHz

2.2 GHz

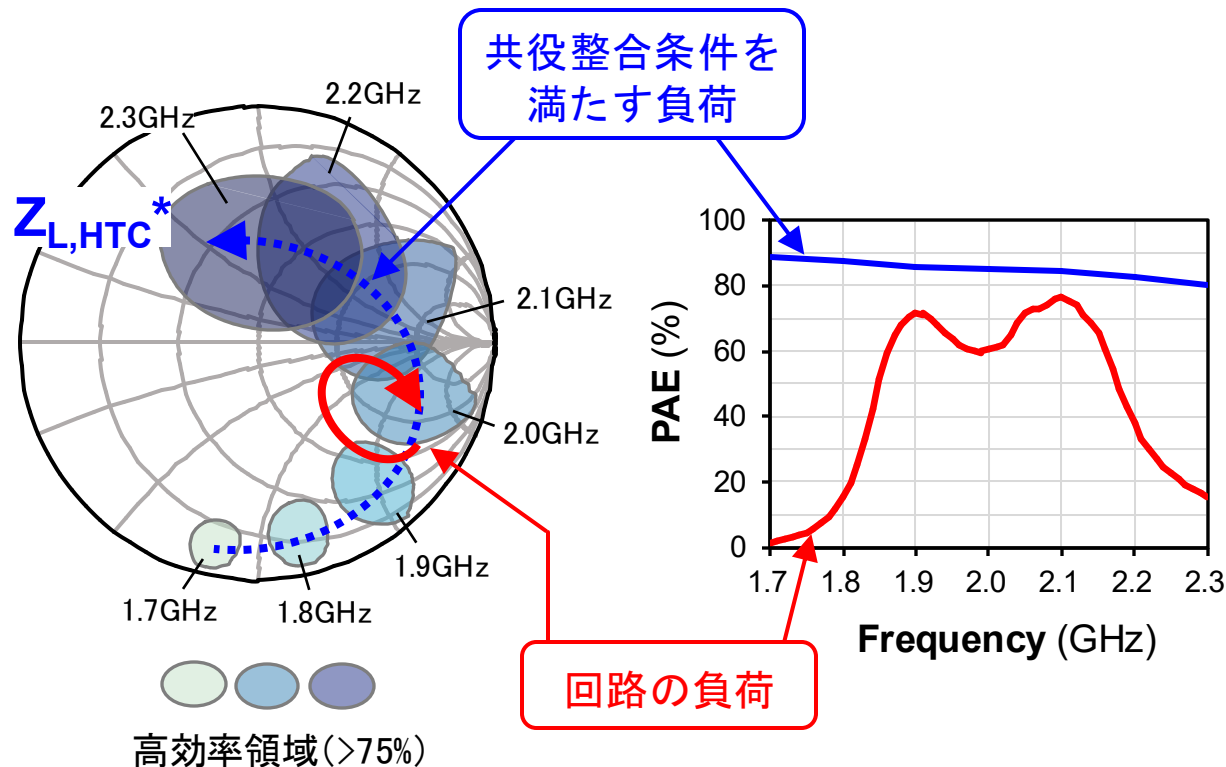
[13] 高橋律樹, 田中慎一 電子情報通信学会マイクロ波研究会 2025年3月 (技術研究報告 MW2024-170)

課題：広帯域での高調波と基本波の整合の両立

- 高調波回路と整合回路の境では広帯域での共役整合が困難

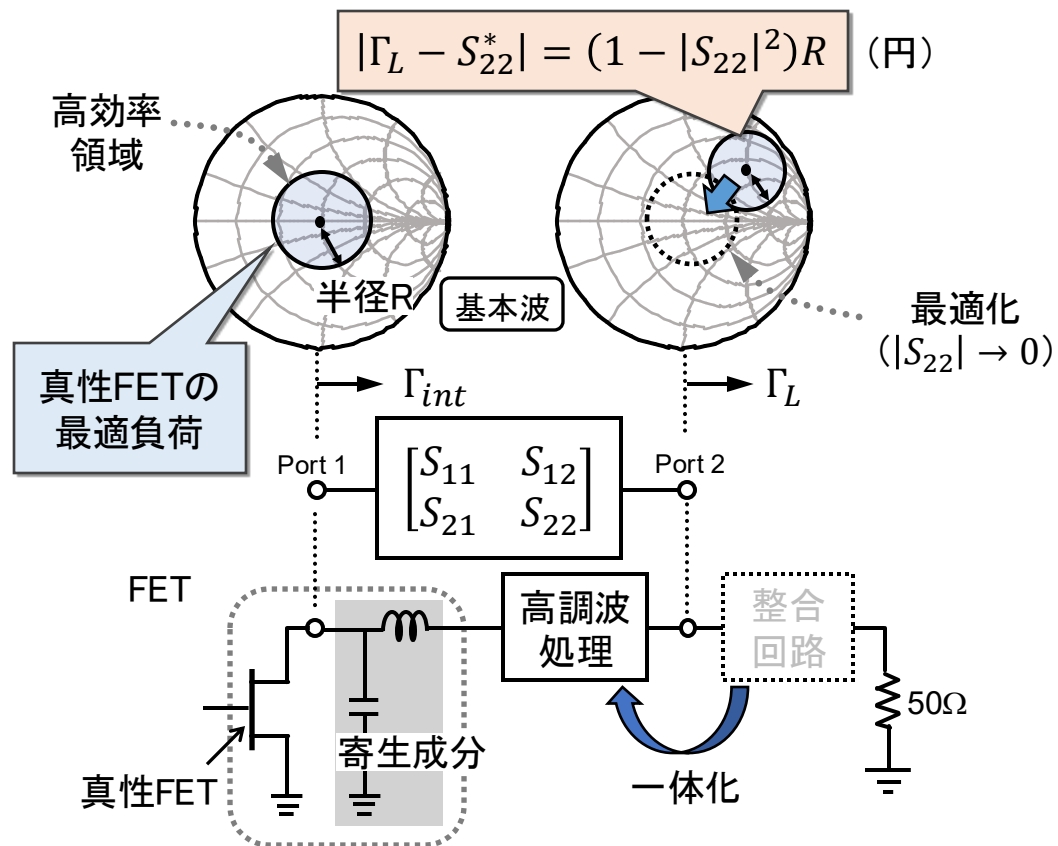


共役整合条件の周波数依存性

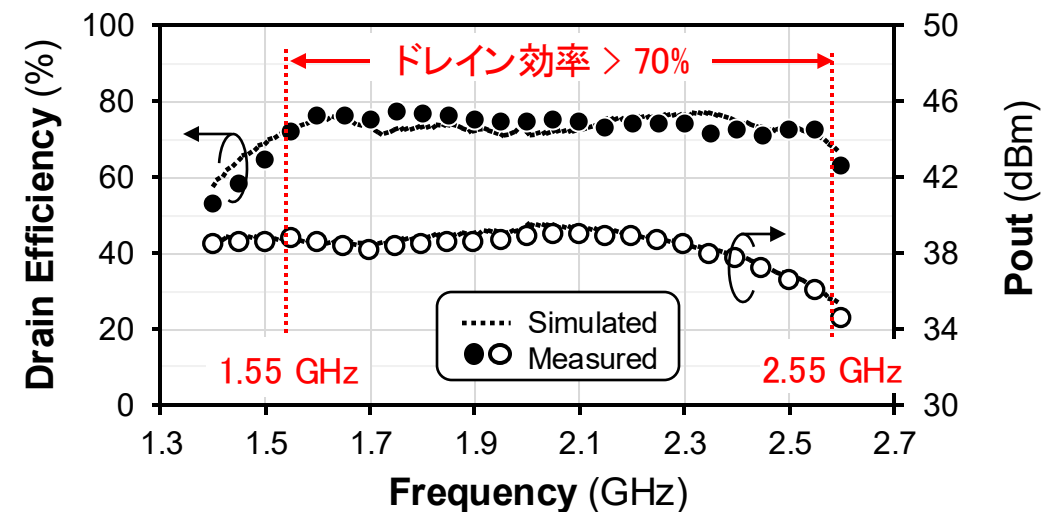
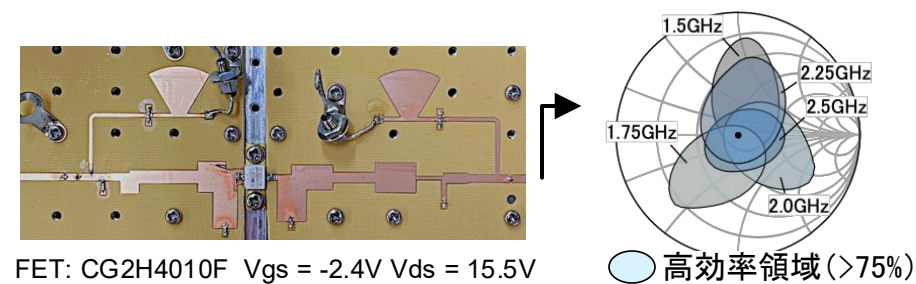


広帯域での共役整合の難しさ

- 基本波と高調波を同時処理することで無理な設計を強いられることを回避



広帯域PAの設計方法



連続B/J級GaN FET増幅器

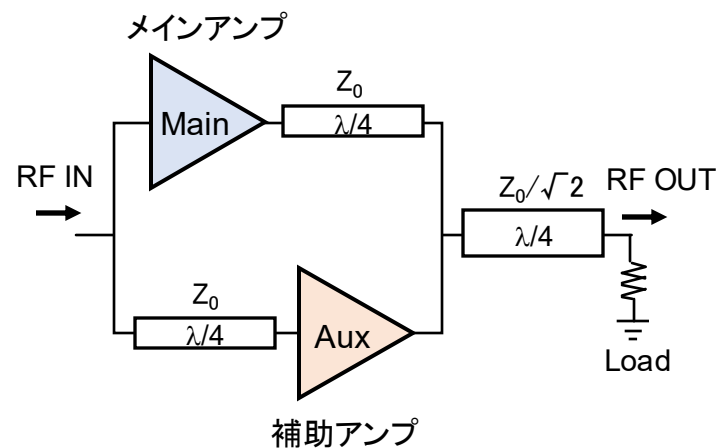
[14] 伊藤辰弥, 田中慎一 電子情報通信学会ソサイエティ大会 C-2A-7 2025年9月(岡山大学)

概要

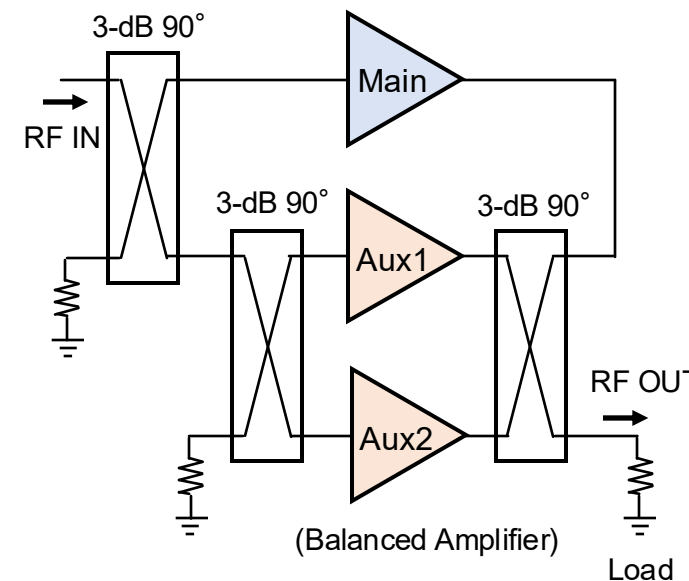
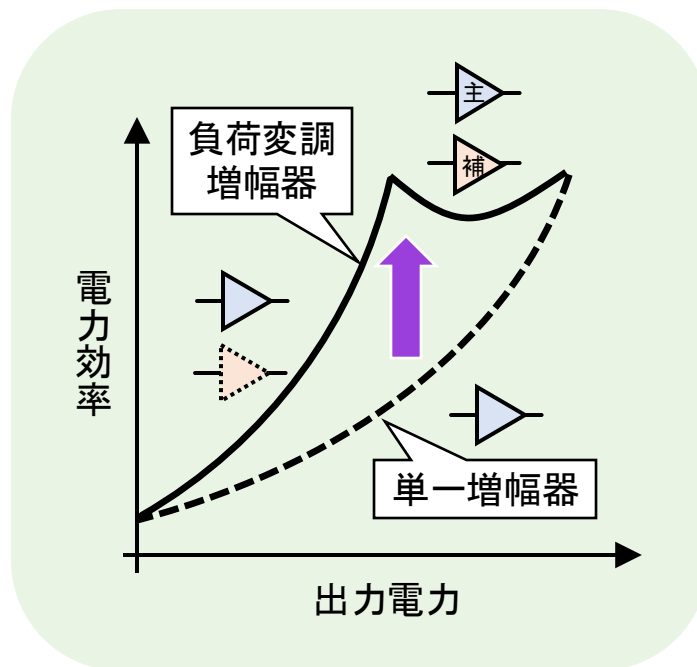
1. 背景
2. 高効率化技術
 - a. 基本原理
 - b. 高調波処理回路
 - c. FET寄生成分の影響
3. 広帯域化技術
 - a. 連続モード増幅器
 - b. 基本波／高調波回路の一体設計
4. 応用事例
 - a. 負荷変調増幅器
 - b. 広帯域SLMBA
5. まとめ

負荷変調増幅器

- 高PAPR信号に対応し、バックオフ領域の効率を大幅に改善可能
- 実績あるドハティ型に加え、広帯域化に強いLMBAも今後の有力候補



ドハティ増幅器
 (Doherty Amplifier)



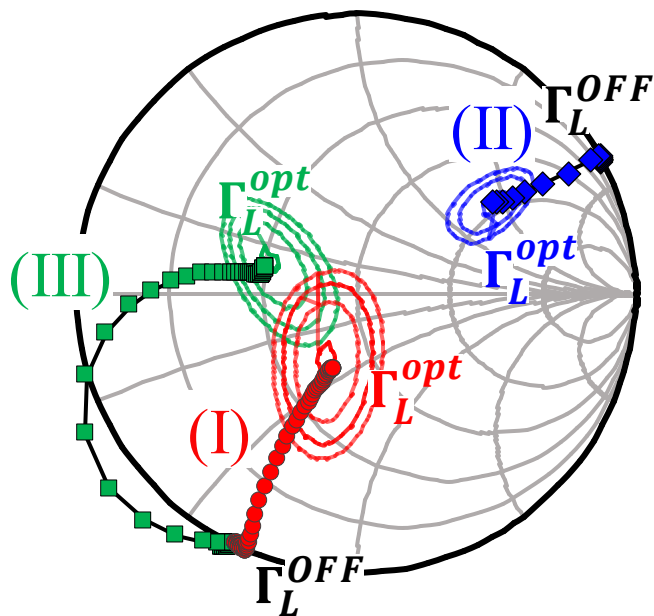
負荷変調バランス増幅器
 (Load-Modulated Balanced Amplifier)

※ 図はSequential型LMBA (SLMBA)

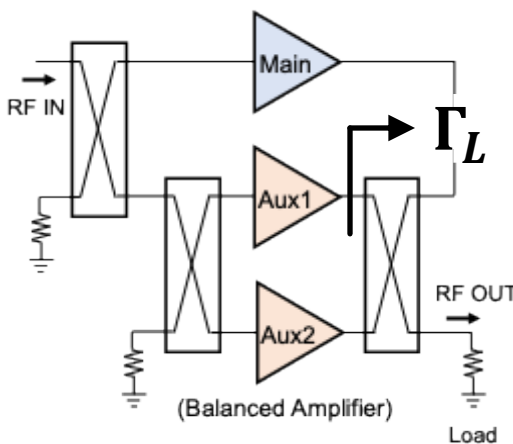
SLMBA*の設計課題

* Sequential Load-Modulated Balanced Amplifier

- 理想的なバックオフ効率を実現するためには、負荷Z軌道の最適化が必要
- 最適な負荷Z条件を、広帯域にわたって体系的に見つけることが困難

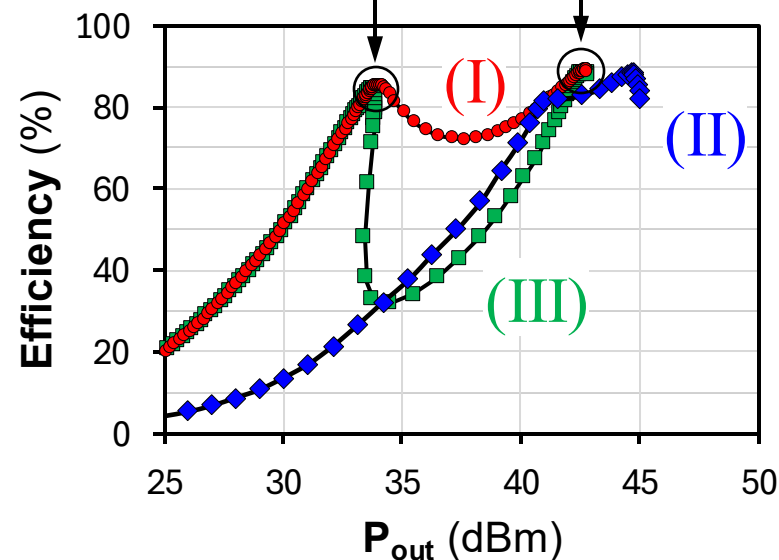


負荷インピーダンスの軌道



(補助アンプOFF時)

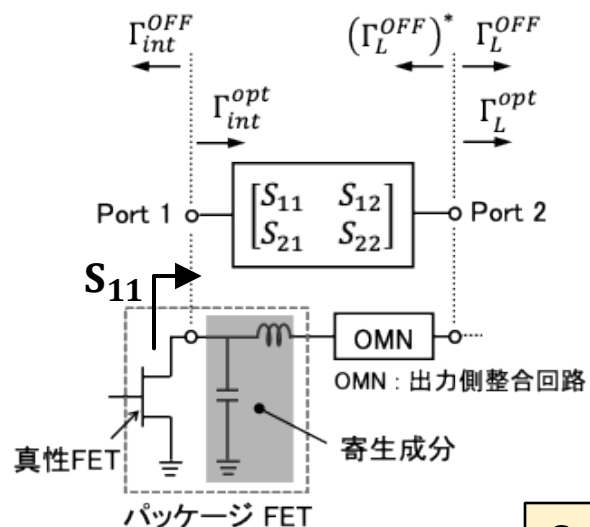
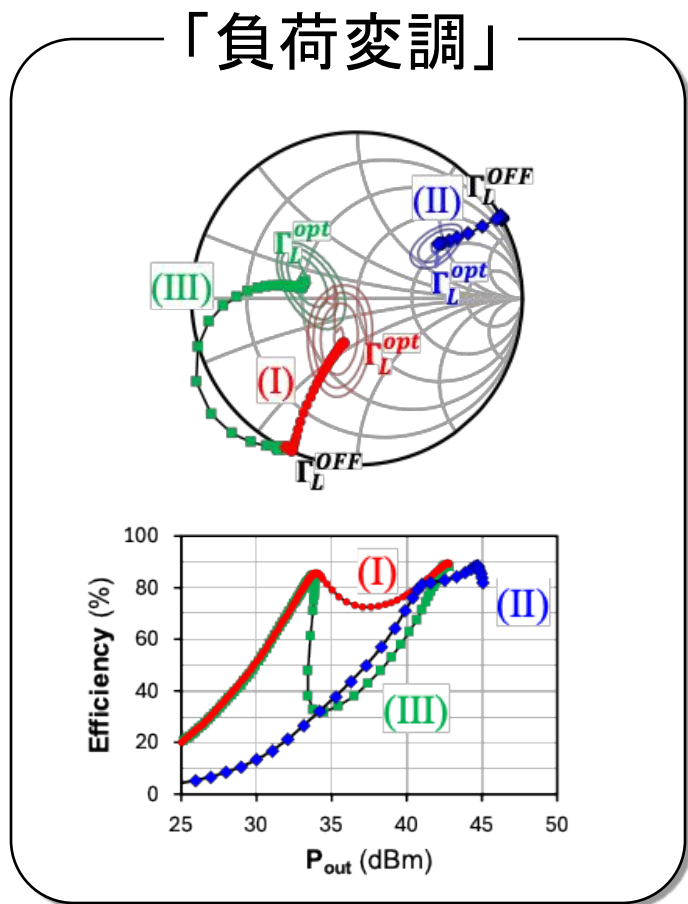
$$\Gamma_L = \Gamma_L^{OFF} \quad \Gamma_L = \Gamma_L^{opt}$$



バックオフ特性の比較

広帯域負荷変調の設計手法 [15]

- 「負荷変調」の設計課題を「広帯域整合」の課題として解決する方法を提案

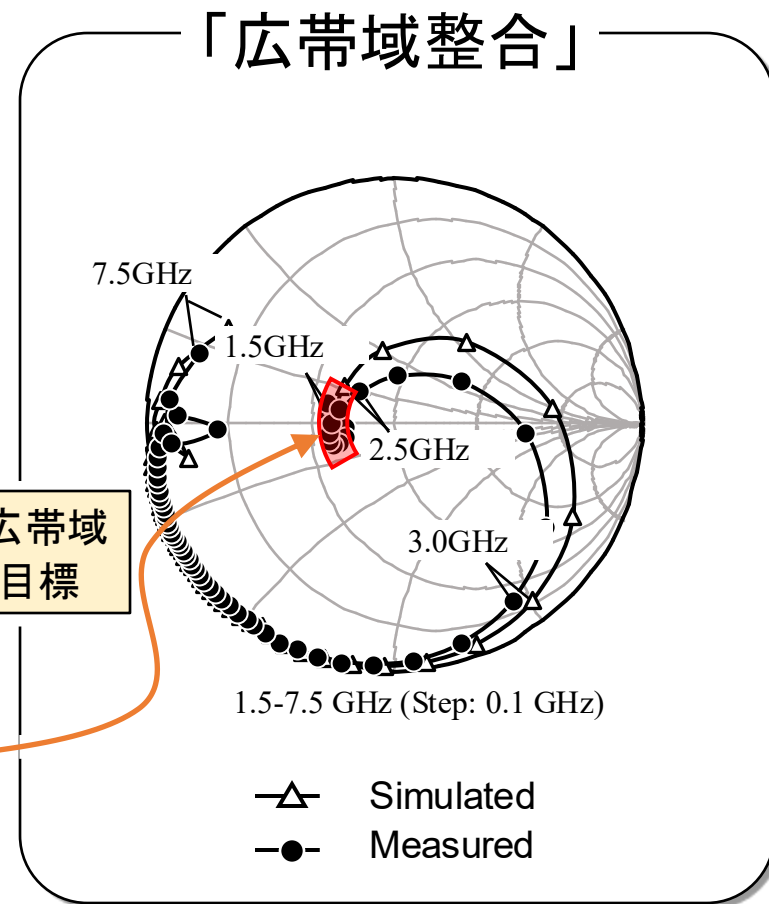


S_{11} が満たすべき条件式

$$|\Gamma_L^{opt}| = |S_{11}|$$

$$\Delta\theta = \angle \left(\frac{|S_{11}| - e^{j\angle S_{11}}}{1 - |S_{11}|e^{j\angle S_{11}}} \right)$$

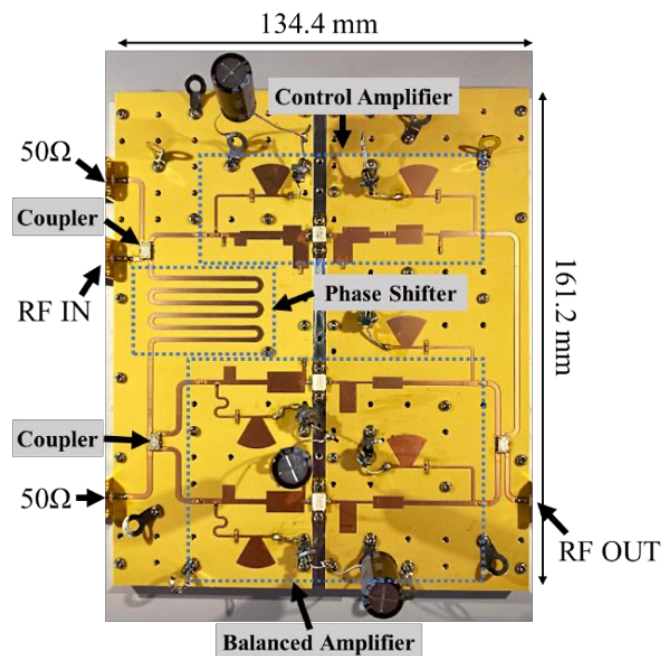
S_{11} の広帯域
整合目標



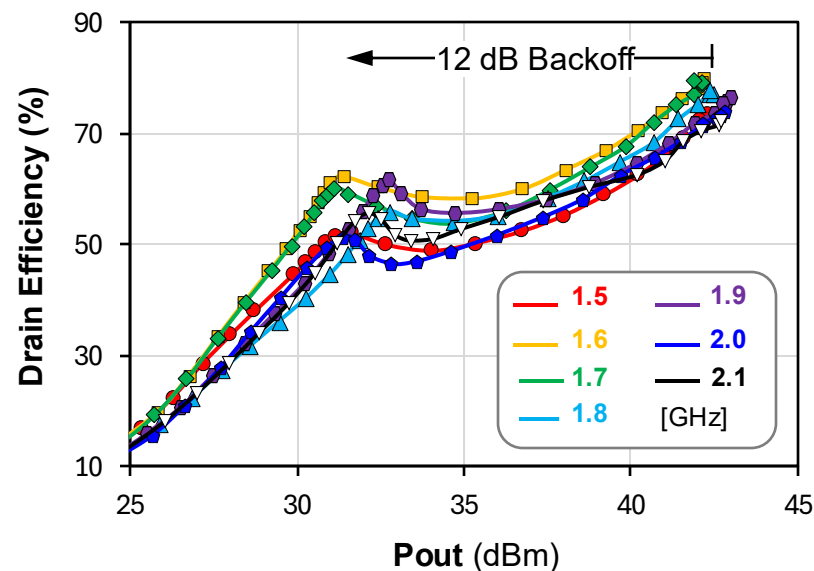
[15] T. Itoh and S. Tanaka, Asia Pacific Microwave Conference (APMC), TB1-1, Dec. 2025.

1.5–2.1GHz帯10W GaN HEMT SLMBA [15]

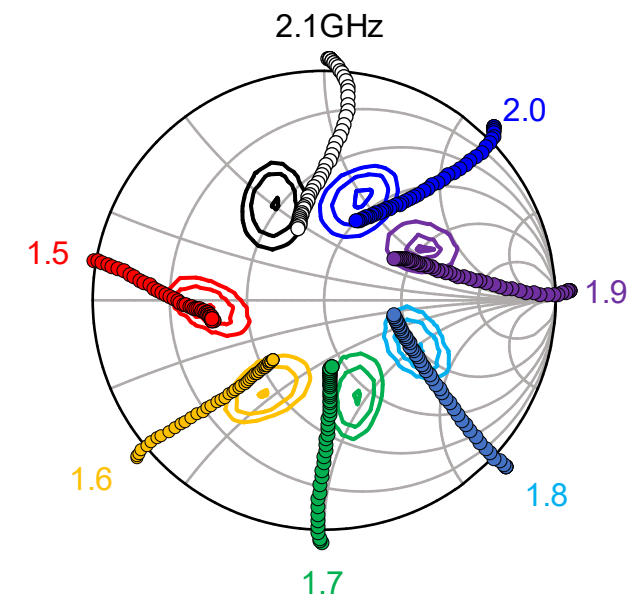
- 提案設計手法により, 広帯域にわたって安定して良好なバックオフ特性を実現



- Freq. Band : 1.5–2.1 GHz
- Max. Efficiency : 71.5%–80.1%
- Efficiency @12dB Backoff : 44%–55%



ドレイン効率 vs 出力電力



負荷インピーダンスの軌道

- FET: CG2H40010F x 3
- Bias Conditions
 $V_G = -3.8 \text{ V}$, $V_D = 24 \text{ V}$ (Aux. Amp.)
 $V_G = -2.4 \text{ V}$, $V_D = 8 \text{ V}$ (Main Amp.)

[15] T. Itoh and S. Tanaka, Asia Pacific Microwave Conference (APMC), TB1-1, Dec. 2025.

まとめ

電力増幅器の高効率と広帯域を両立させるために必要な基礎事項を、実例を交えて解説した。

- 高調波処理を用いる代表的なPA動作を説明し、各種動作級の特徴を踏まえた設計の重要性と、FET寄生成分が高調波処理に及ぼす影響の理解が重要であることを示した。
- 高効率を保持しつつ帯域を拡大する手法として、連続モード増幅器の考え方を示し、その効果を最大限に引き出すためには基本波と高調波を一体的に考える必要があることを強調した。
- 応用事例として、広帯域でバックオフ特性を改善した負荷変調バランス増幅器について最近の成果を紹介した。