

マイクロ波電力増幅器開発に必要な アクティブロードプル(ALP)測定システム

龍谷大学 先端理工学部 電子情報通信課程
教授 石崎 俊雄

2025年 3月 13日

研究の背景1

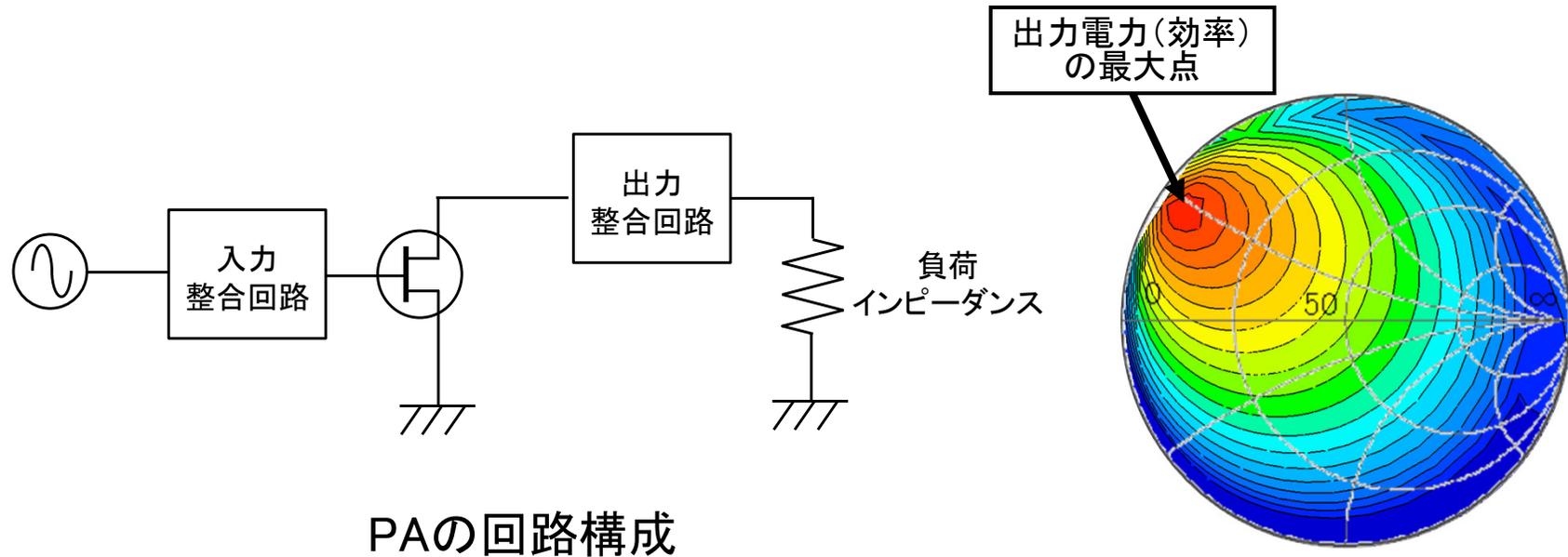
マイクロ波デバイスの「固体化(半導体)」が進み、
マイクロ波技術を応用した加熱器や無線給電装置等
多くの機器設計で電力増幅器の設計が必要



マイクロ波電力増幅器の設計時に重要な測定方法
『開ループ型のアクティブロードプル測定システム』
の実現で、小型化・低コスト化を実現する

研究の背景2

携帯基地局やマイクロ波加熱装置で使用される
マイクロ波パワーアンプ(PA)は高効率化が要求される



出力電力(または効率)の
負荷インピーダンス依存性

負荷インピーダンスを変化させて特性を測定(ロードプル)し、
最適負荷インピーダンス(反射係数)を測定する

新技術の特徴・従来技術との比較

- ・ 2つの新技術を実現
『開・閉ループ合成した複合ループ』
『PLL を用いた発振抑制』
- ・ 高効率な電力増幅器の設計に向け、測定できる反射係数の領域が限定されない。
- ・ 大きな反射領域でループ利得が1を超えないよう、安定的に測定できる。
- ・ 本技術の適用により、システムとして簡素化及び低コスト化が可能なアクティブロードプル測定システムを提供でき、コストや回路規模(大きさ)が1/10程度まで削減されることが期待される。

従来技術とその問題点

マイクロ波を活用した無線充電等の機器に利用される「開ループ型のアクティブロードプル測定システム」では、システムの制御が複雑なため活用が難しい。

具体的には、スミスチャート全域を測定するには、振幅と位相を細かなステップに設定して、その組み合わせ点で測定を行わなければならない。

一方、閉ループ型ではループ利得が1を超えないようにする必要がある。

従来技術とその問題点(具体内容)

(1)開ループ型ALPシステム

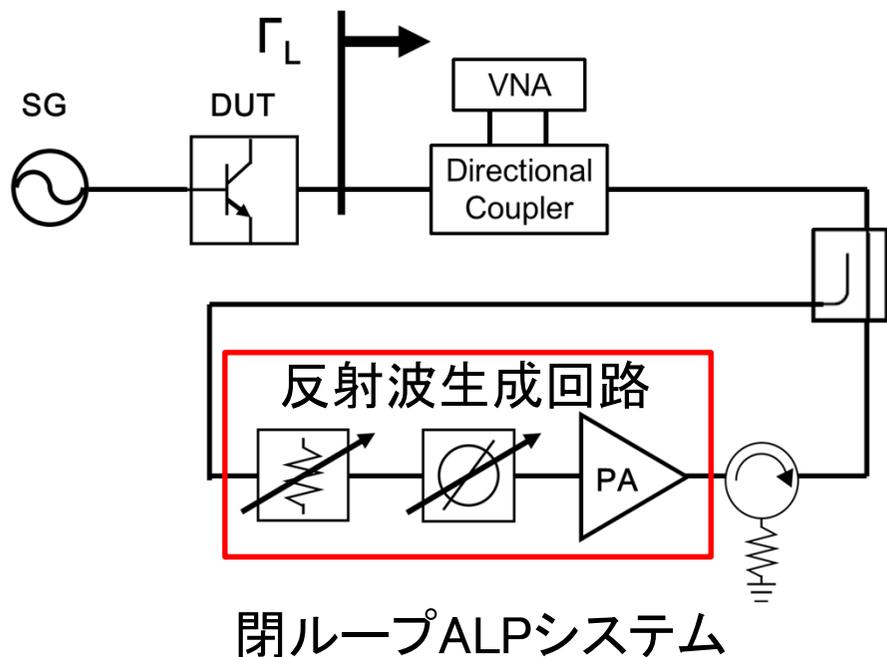
DUT からの信号を出力波成分と注入波成分に分離する際、減衰器の設定値に対して注入波振幅は出力波振幅と無関係に注入されるため、位相角を回転させた場合、反射係数が大きく変化する課題がある。部品点数が少ないメリットあり。

(2)閉ループ型ALPシステム

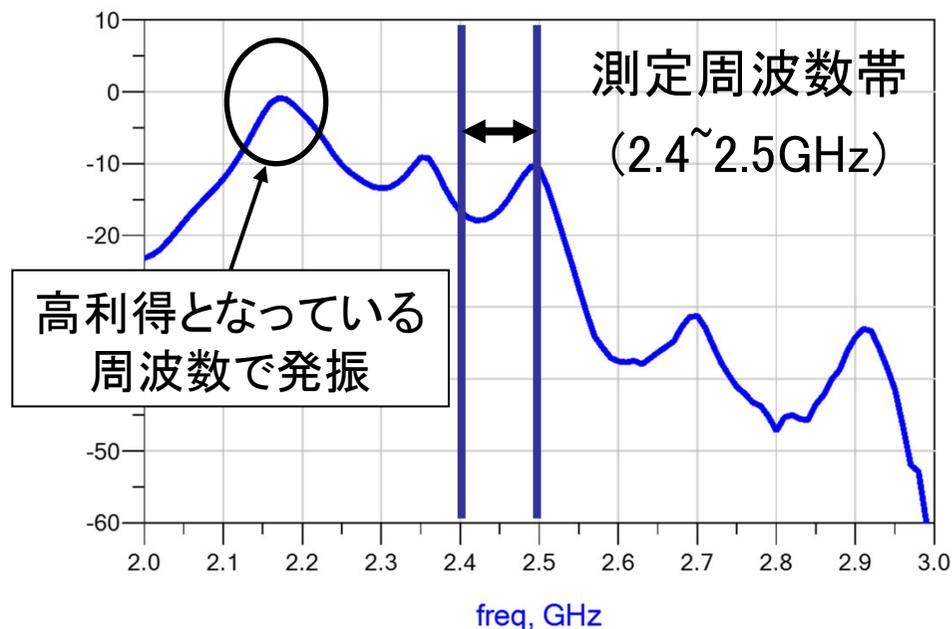
閉ループ型はDUT の出力波レベルに比例した信号をPAに入力することができるため、出力電力の変化に対し注入波レベルを追従させることがハードウェアのみで実現可能である。

但し、可変減衰器の減衰量により、ループを構成する系が発振する場合がある。

従来技術とその問題点(閉ループ)



DUT(被測定物)出力の一部を取り出し、
振幅・位相を調整して反射波として注入する

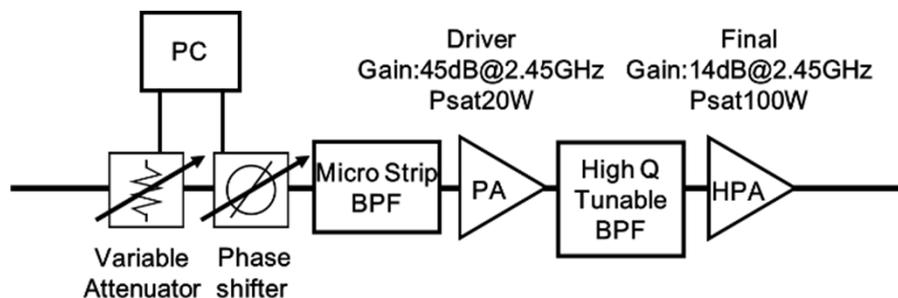


反射波生成回路の周波数特性

反射係数=1に近づくと、測定周波数以外で
ループ利得が1以上になり、発振し測定できない。

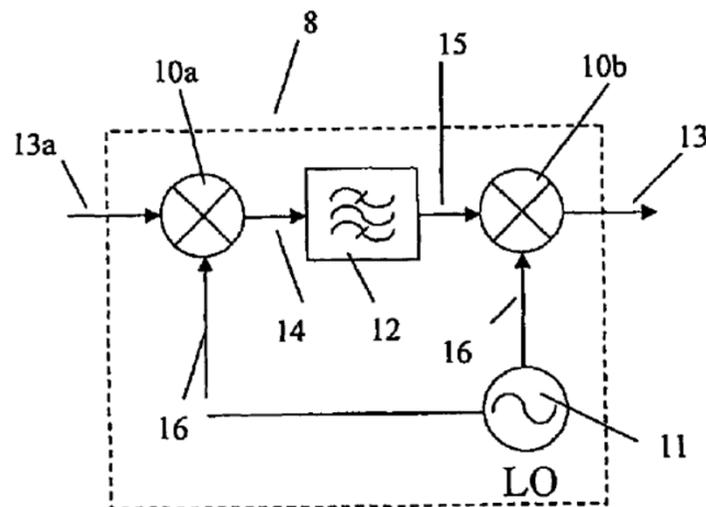
従来技術でのアプローチ

狭帯域フィルタ方式



狭帯域のチューナブル
フィルタが必要

周波数変換方式

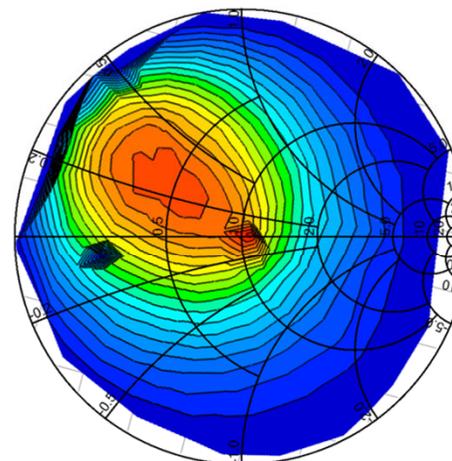
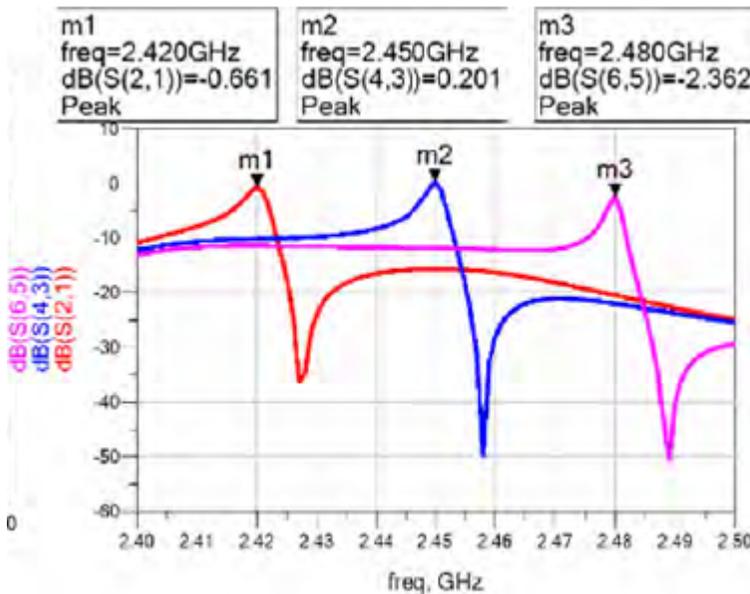


周波数変換回路が必要

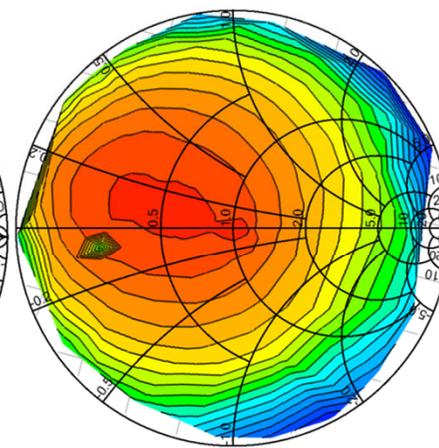
実現が困難であったり、回路が複雑になるという課題があった。

従来技術でのアプローチ 狭帯域帯域通過フィルタの例

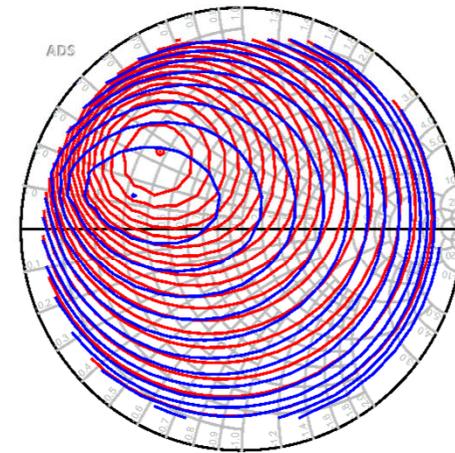
ループ利得の周波数特性が平坦でないことが発振原因のため、
ループ内に狭帯域チューナブル帯域通過フィルタを装荷する。



PAE等高線実測



Pout等高線実測



青線:Pout 赤線:PAE
シミュレーション

狭帯域フィルタ装荷後の
ループ利得

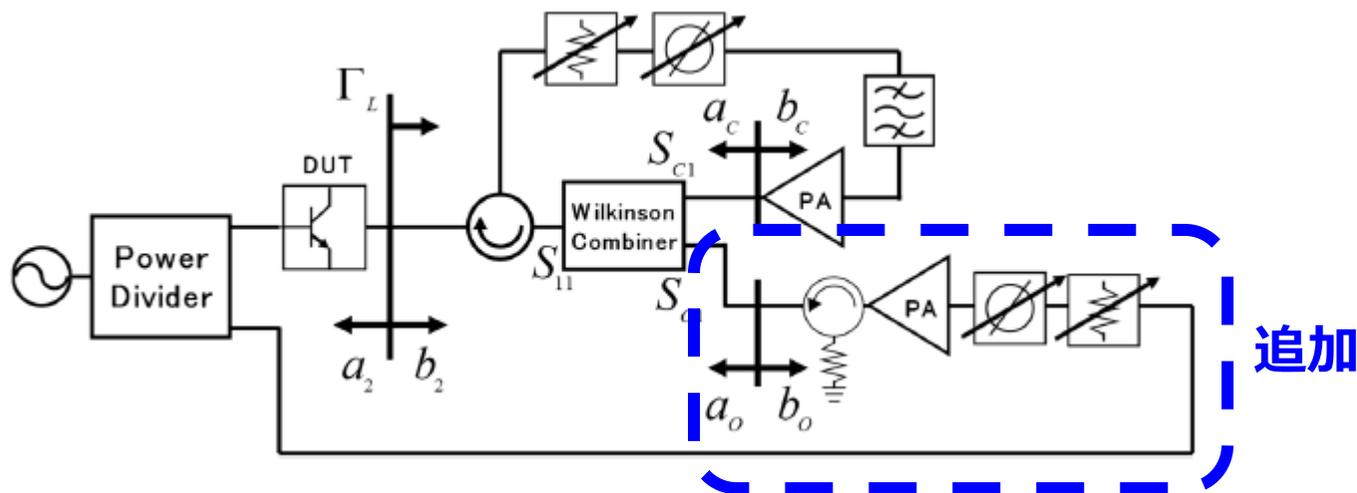
実験と非線形モデルによるシミュレーションから
得られた等高線図

新技術の特徴

①複合ループによる動作安定化1

注入波を生成するための注入電力増幅器、可変減衰器、可変移相器で構成された閉ループと開ループの2つのループを有する。

開ループから出力電圧 a_o が注入されるため Γ_L に必要な閉ループ利得が低下する。これにより利得余裕度が増加する。



複合ループ型ALPシステム

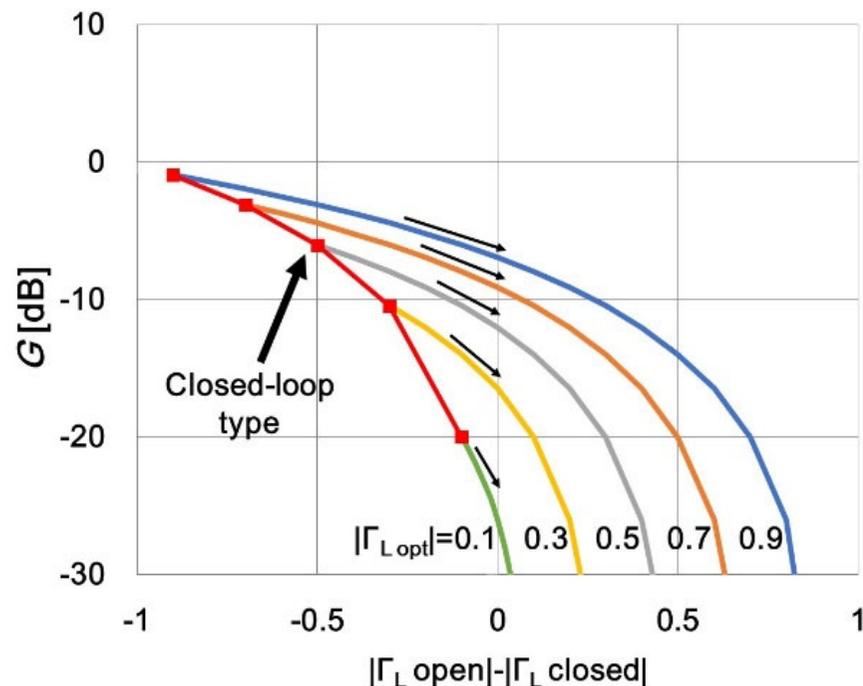
新技術の特徴

①複合ループによる動作安定化2

反射係数 Γ_L を実現するループ利得 G は $G = \Gamma_L - \Gamma_{open}$

したがって、ループ利得 G を Γ_{open} により小さく出来る

開ループ信号は発振に寄与しないためループ利得に余裕が出来る

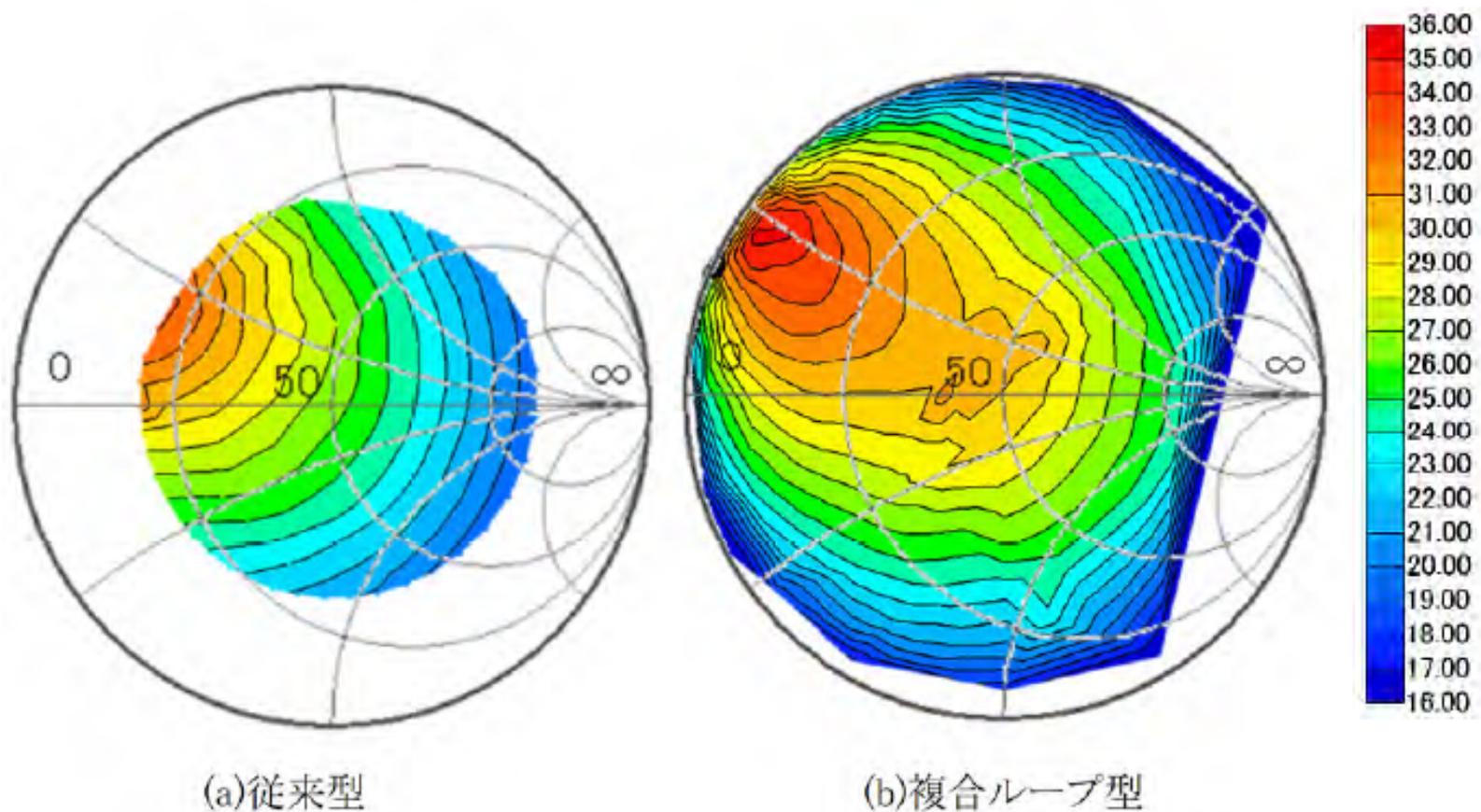


注入差が0の時、ループ利得が
6dB減少し利得余裕が生まれる

閉ループ ← → 開ループ

新技術の特徴

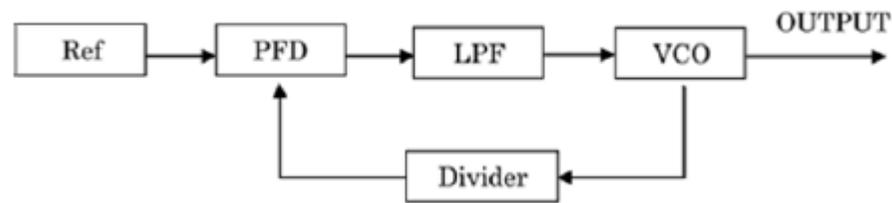
①複合ループによる動作安定化3



出力電力等高線の比較

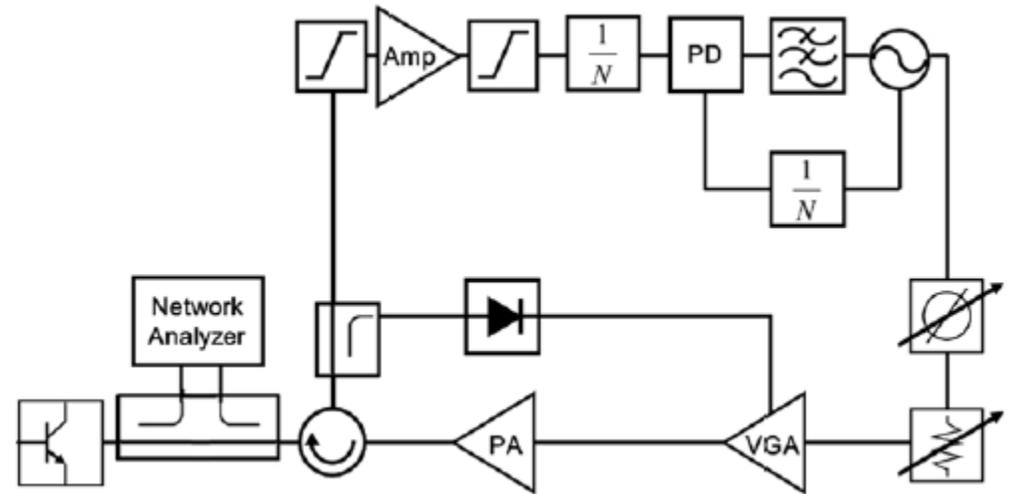
新技術の特徴

②位相同期ループによる動作安定化1



Divider : 分周器
PFD : Phase Frequency Detector
VCO : Voltage Control Oscillator
LPF : Low Pass Filter

PLL回路基本構成



位相同期ループを備えたALPシステム

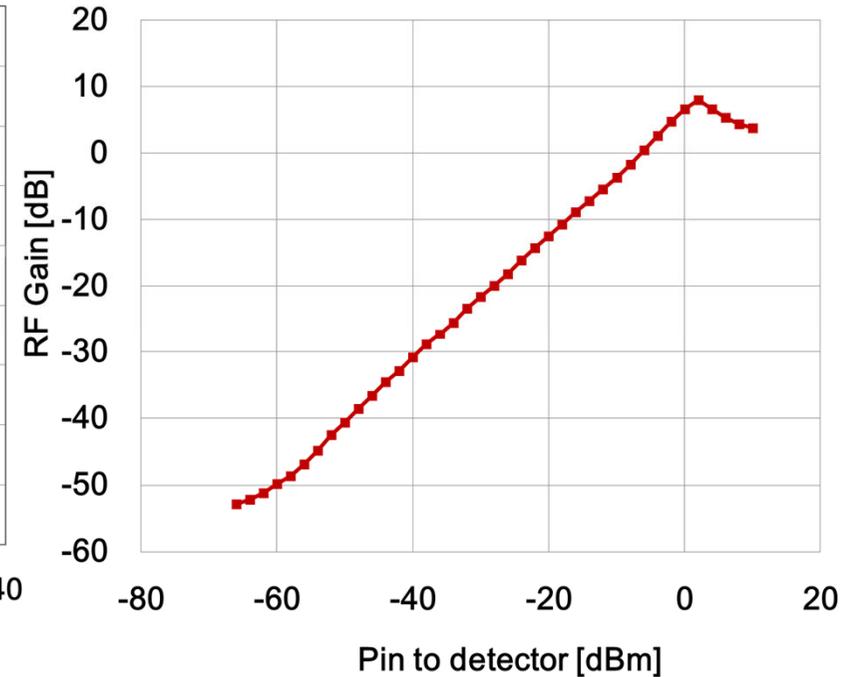
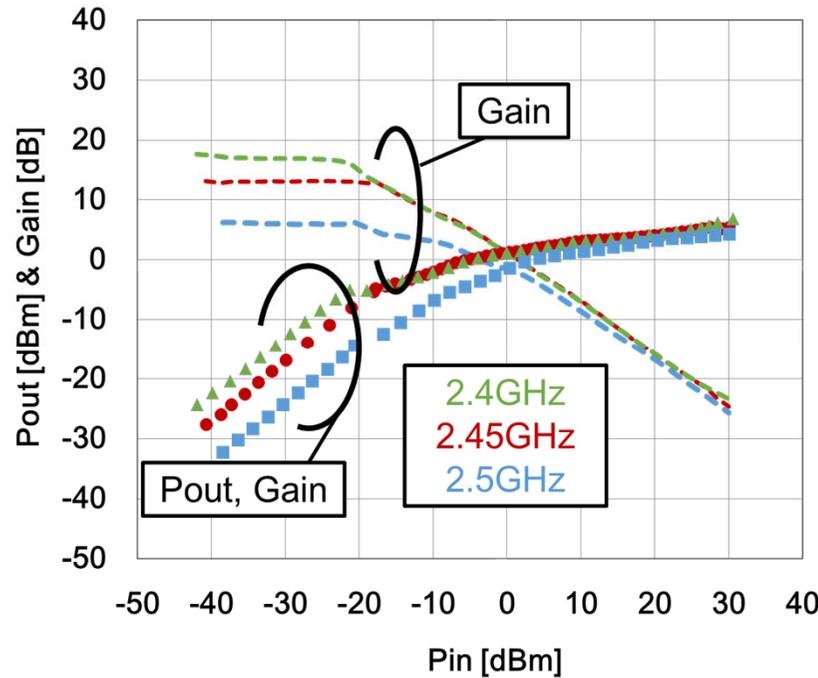
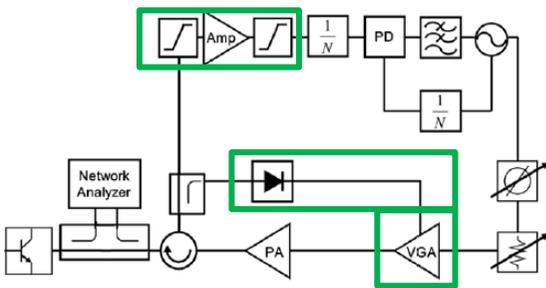
PLL の出力信号は入力された基準信号の位相変化のみに追従し、振幅については基準信号を参照していない。

そのため等価的にVCO の発振周波数しか透過しない超狭帯域フィルタとして扱うことができるため、ループが発振することはない。

新技術の特徴

②位相同期ループによる動作安定化2

レベル変動圧縮回路とVGAの特性



レベル変動圧縮回路の特性

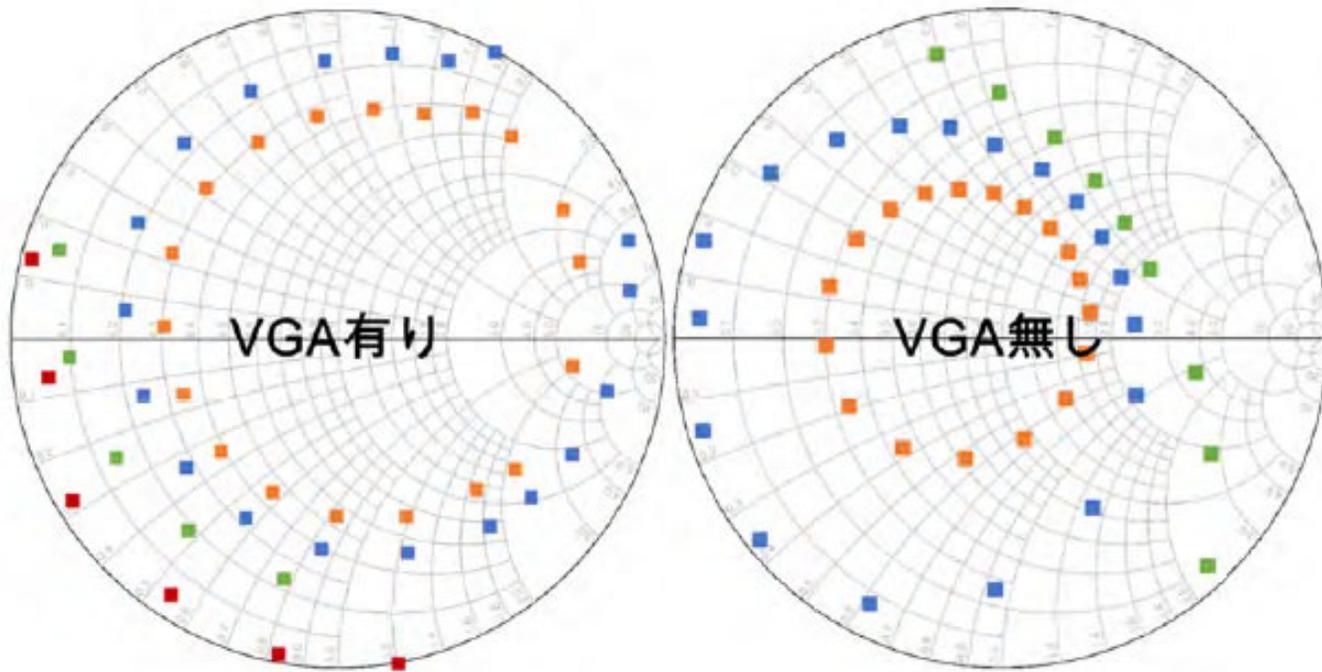
変動幅を圧縮し、同期可能な
振幅の信号をPLLに供給

VGAと検波器の特性

VGAによりPLL出力振幅をDUTの
出力変化に追従させる

新技術の特徴

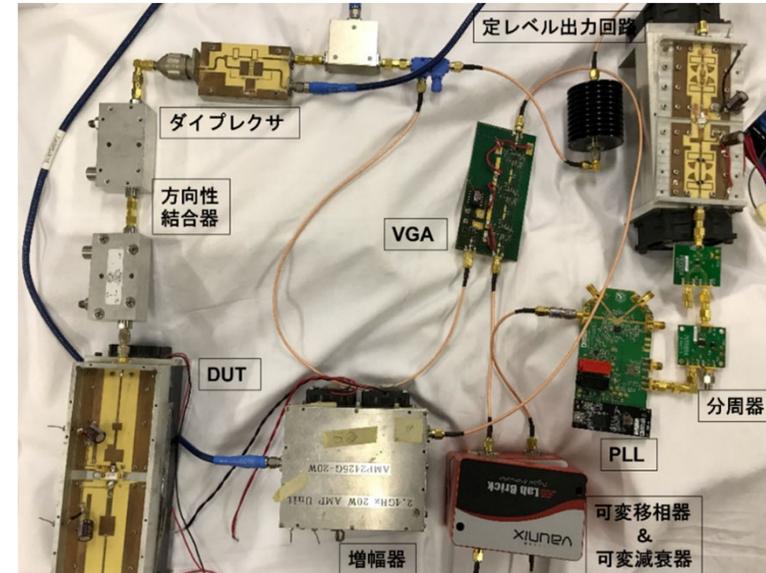
②位相同期ループによる動作安定化3



(a)VGA 有り

(b)VGA 無し

VGA の有無による反射係数 Γ_L の変化



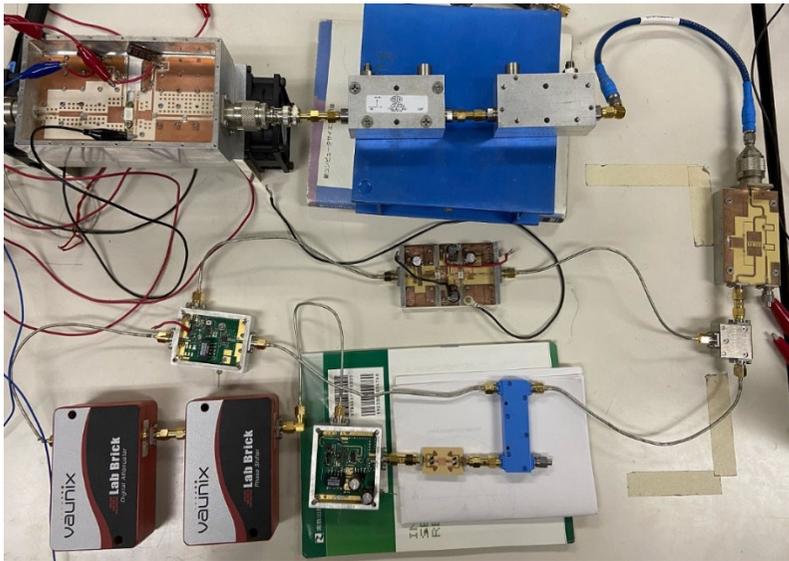
同心円上を掃引できるため、容易に
スミスチャート全域をカバーできる。

新技術の特徴

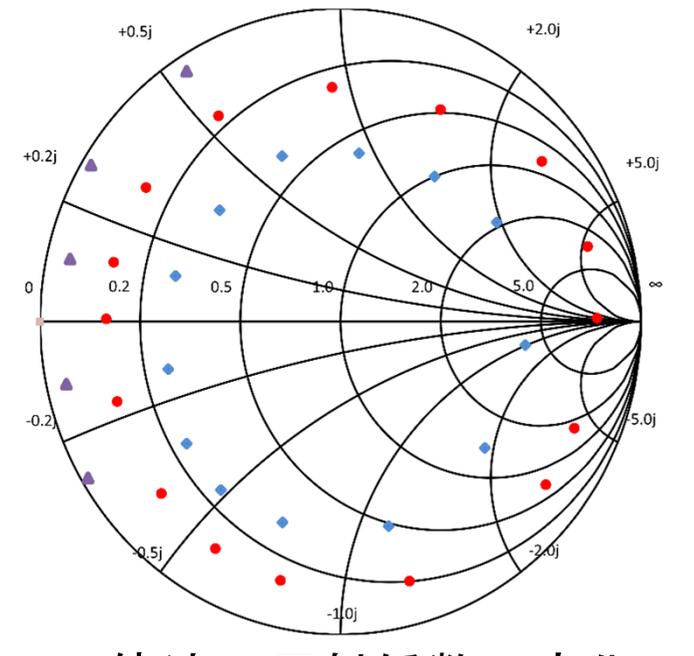
②位相同期ループによる動作安定化5

減衰器で振幅を設定し、移相器で
0~360度位相を変化させ円を描く

二倍波のみのALP実験



実際の測定系



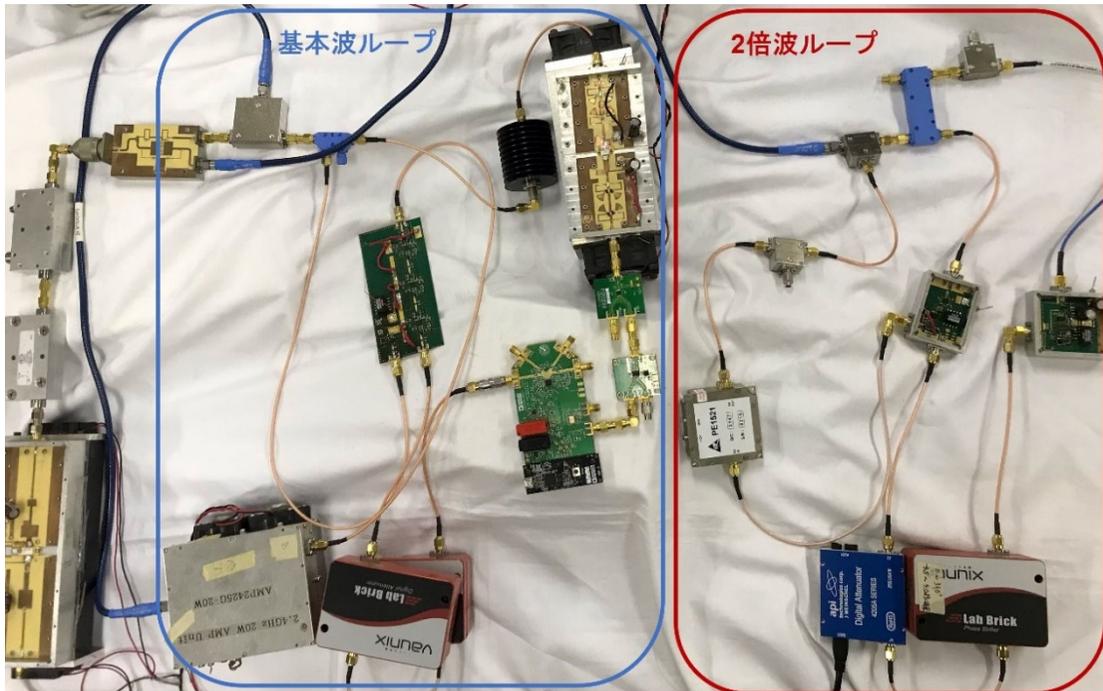
二倍波の反射係数の変化
(色ごとに減衰器の設定を示す)

PLLにより、反射係数が1に近い点まで測定可能であった。
VGAにより、広いレンジで利得を変化することが可能となった。

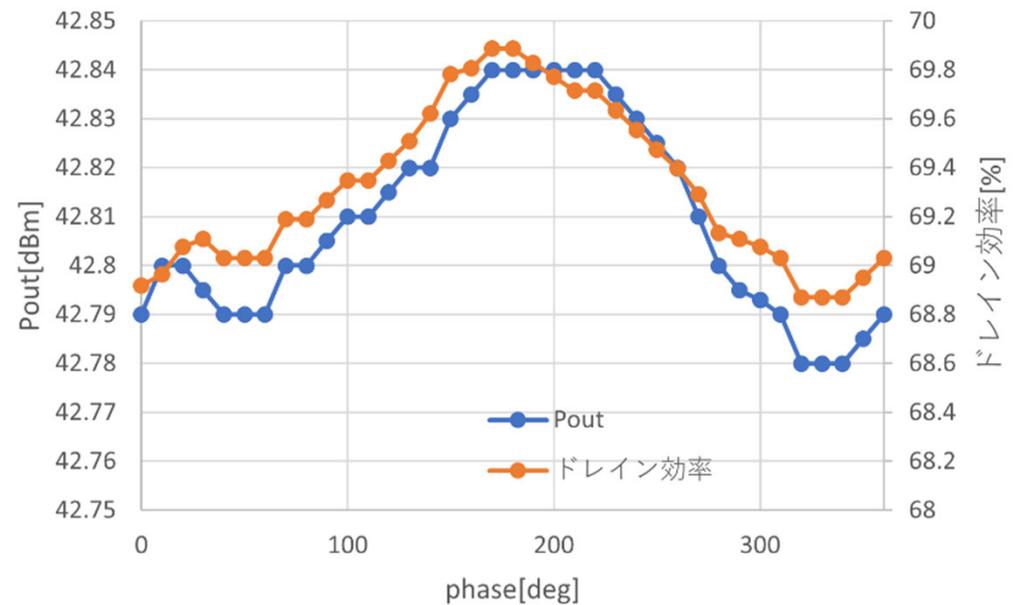
新技術の特徴

②位相同期ループによる動作安定化6

測定条件:入力電力32dBm、基本波ALPで最適負荷に固定、
2倍波反射係数 $\Gamma=0.9$ の円で位相掃引



実際の実験系



位相掃引による出力電力と
ドレイン効率の変化(二倍波)

提案システムにより、2倍波までのALP測定が出来た。

想定される用途

- マイクロ波加熱装置の開発
- 無線電力伝送応用高周波電源の開発
- 無線通信装置の開発
- パワーアンプ開発用測定器の開発

実用化に向けた課題

- 現在、測定システムについてサンプル基板等もあり、共同で実験が可能なところまで開発済み。
- 今後、具体的なアプリケーションについて実験を行えるよう、企業様からの要望に適用していく場合の条件設定を行っていく。
- 実用化に向けて、サンプル基板の汎用性を向上できるように技術を確立する必要もあり。

企業への期待

- 各企業様のアプリケーション適用については、サンプル基板の汎用化により克服できると考えている。
- マイクロ波電力増幅器を開発する企業もしくは開発装置を開発する企業との共同研究を希望。
- マイクロ波応用製品を開発中の企業、マイクロ波応用分野への展開を考えている企業には、本技術の導入が有効と思われる。

企業への貢献、PRポイント

- 本技術はマイクロ波電力増幅器開発の多くの場面で必要な測定技術であるため、共同研究等連携することでより企業に貢献できると考えている。
- 本技術の導入にあたりご要望のアプリケーションに必要な追加実験を行うことで科学的な裏付けを行うことが可能。
- 本格導入にあたっての技術指導等

本技術に関する知的財産権

- ・ 発明の名称 : アクティブロードプル測定システム
- ・ 出願番号 : 特願2019-026262
: 特願2018-230466
- ・ 出願人 : 龍谷大学
- ・ 発明者 : 石崎 俊雄

産学連携の経歴

- ・ 2024年度 5社(新規・継続)と共同研究等実施
- ・ 2011年度 JST A-STEP事業に採択(探索タイプ)
- ・ 2012年度 JST A-STEP事業に採択(探索・顕在化タイプ)
- ・ 2014年-2016年 NEDOクリーンデバイス社会実装推進事業採択

お問い合わせ先

龍谷大学

龍谷エクステンションセンター

URA(産学連携担当) 田代 信一

TEL 077-543-7743

FAX 077-543-7771

e-mail rec@ad.ryukoku.ac.jp