## RFパワーアンプ設計のテスト

### 研究開発-特性評価-製造

eGuide | Version 01.00

ROHDE&SCHWARZ

Make ideas real



無線周波数パワーアンプの設計は、一般的に、研究開発(R&D)、 特性評価、製造の3つのフェーズをたどります。



### 研究開発

研究開発は通常、設計のシミュ レーションとエミュレーションか ら始まります。設計の最適化は、 多くの場合、シミュレーションと、 最初のデバイスに対する測定を 利用したアプローチの組み合わ せによって行われます。そのため には、一般的に、設計プロセス全 体できわめて高いRF性能が要求 されます。

### 特性評価

初回の製造による実際のハード ウェアが得られたら、設計の特 性評価を行う必要があります。 そのために使用するテストソリ ューションは、きわめて正確で 柔軟なだけでなく、測定が高速 である必要もあります。小さい ロットのデバイスを、すべての動 作条件で検証する必要がある からです。

### 製造

 製造フェーズでは、顧客への出 荷のために、デバイスがすべて の仕様を満たしている必要が あります。

このeGuideでは、代表的な測定と、ローデ・シュワルツのテストツールがこれら3つのフェーズでエンジニアにどのように役立つかを紹介します。



#### 研究開発 ▶4ページ

シミュレーションと最適化のための実証 済みのツール ▶4ページ

主要性能指標 ▶5ページ

圧縮ポイントと電力付加効率▶6ページ

#### 相互変調 ▶7ページ

インターセプトポイントと高調波 ▶8ページ

雑音指数/ノイズファクター ▶ 9ページ

ウエハー検証とデバイスモデリング ▶ 11ページ

ロードプル測定 ▶ 12ページ

デバイスモデリング ▶ 13ページ

変調測定を行う理由 ▶14ページ

EVMの導出 ▶ 15ページ 歪み ▶ 17ページ

最適化のオプション ▶ 18ページ

異なるアンプトポロジーの使用 ▶19ページ

エンベロープトラッキング ▶ 20ページ

ドハティアンプ ▶21ページ

デジタルドハティアンプ ▶ 22ページ

従来型/デジタルドハティの動作 ▶23ページ

負荷変調平衡アンプ(LMBA) ▶ 24ページ

線形化 ▶ 25ページ

デジタルプリディストーションによる最適化 ▶ 26ページ

プリディストーションの例 ▶ 27ページ 特性評価 ▶ 30ページ

製造 ▶ 32ページ

製造向けに最適化された変調テスト ▶32ページ

まとめ ▶34ページ

略語/頭字語 ▶35ページ

### エレクトロニック・デザイン・オートメーション (EDA) ツールを使用した設計プロセス

#### シミュレーションと最適化のための実証済みの ツール

R&S®WinIQSIM2 シミュレーション・ソフトウェアは、5G からWi-Fi®までのさまざまなデジタル規格に準拠した信 号を作成できます。これらの信号は、Cadence® AWR® Visual System Simulator™ (VSS) に転送できます。

VSSを使うことで、デザイナーは、事前構成済みのテスト ベンチを使用して、パワーアンプなどのRFフロントエンド コンポーネントの性能のシミュレーションと最適化を、ピ ーク対アベレージパワー比(PAPR)、隣接チャネル漏洩 電力比(ACLR)、およびその他多数の重要なアンプ性能 指標に基づいて行うことができます。また、開発者がスプ リアス成分やその他のシステム障害の原因を特定するた めにも役立ちます。システムレベルのロードプル解析を使 えば、デザイナーは、無線通信システムで用いられるリニ アパワーアンプのインピーダンス整合回路を最適化でき ます。

シミュレートされた回路を通った信号は、R&S®VSE ベクトル信号解析ソフトウェアに送られます。これはPCベースの信号解析ソフトウェアツールで、変調性能やエラーベクトル振幅(EVM)を調べるために使用できます。このテストレイアウトの回路図を図1に示します。

### 図1:Cadence VSSソフトウェアを使用した設計/シミュレーション環境の設計フローと、最初のサンプルに対するハードウェア測定の比較



www.cadence.com/go/trademarksに掲載のCadence、Cadenceロゴ、そ の他のCadenceのマークは、Cadence Design Systems, Inc.の商標または 登録商標です。その他すべての商標は、それぞれの所有者に帰属します。

### 連続波信号を使用したデバイス検証

### 主要性能指標

最初のハードウェアサンプルが製造されたら、さまざまな特性を測定する必要があります。テストプロセスを簡素化するには、1つのツールでできるだけ多くの特性を測定できることが必要です。そのようなツールの1つが、図2に示すR&S®ZNA ベクトル・ネットワーク・アナライザ(VNA)です。これを使えば、周波数カバレッジから消費電力まで、増幅特性から雑音指数までのあらゆる特性を1台で検証できます。

VNAは以下のような広範囲の特性を検証できます。

- ▶ 周波数カバレッジ
- ▶ 利得、利得圧縮、振幅歪み(AM/AM)、 圧縮ポイント、飽和パワー
- ▶ 位相歪み(AM/PM)
- ▶ 消費電力
- ▶ 効率、電力付加効率(PAE)
- ▶ インピーダンス整合
- ▶ 小信号/パルスドSパラメータ
- ▶ 雑音指数
- ▶ 高調波、相互変調、インターセプトポイント

図2: R&S®ZNA ベクトル・ネットワーク・アナライザ



### 連続波信号を使用したデバイス検証

#### 圧縮ポイントと電力付加効率

評価が必要な重要な特性の1つとして、対応周波数レンジ内の圧縮ポイントと電力付加 効率 (PAE) があります。最大出力パワーと有効パワー範囲の違いを理解することはきわ めて重要です。最大出力パワーは飽和領域にかなり入っており、きわめて大きいノンリニ ア効果がすでに生じているからです。一般的に、アンプが圧縮領域に入る前にどこまでリ ニアに使用できるかを知るには、1 dB/3 dB圧縮ポイントを調べます。どちらのモードを 使用するかはアプリケーションによります。

図3では1 dB圧縮がしきい値として示されています。VNAでは、入力パワーを掃引し、出 力側の結果を測定することで、この測定を簡単に行うことができます。

効率を評価するには、テストデバイスに供給される電源の消費電力を測定します。出力 信号bと入力信号aの関係が、アンプに供給されるパワーを基準として評価されます。こ れをPAEと呼びます。この関係を図4に示します。

#### 図3:圧縮ポイントおよび利得測定



#### 図4:電力付加効率の解析

$$PAE = \frac{|b_m|^2 - |a_n|^2}{P_{DC}}$$



### 連続波信号を使用したデバイス検証

#### 相互変調

アンプのもう1つの重要なポイントとして、相互変調があります。アンプは非線形性を示し、そこから相互変調が生じます。相互変調テストでは一般的に、図5に示すように、周波数レンジ内で掃引される2トーン信号を使用します。

もう1つのテストとして、図6に示すように、1つのトーンを固定し、もう1つのトーンを左右 に動かして、オフセット(可変間隔)を変化させることもできます。

3つめのテストとしては、図7に示すように、周波数レンジ内での位置を一定にし、1つのト ーンは固定して、もう1つのパワーレベルを上下させることで、変調全体での非線形性の 影響を判定します。 VNAの専用アプリケーションを使えば、ごく短時間でこれを実行して、変調をリニアに 処理する能力を評価できます。

VNAは2トーン信号を発生する必要がありますが、理想的には、R&S®ZNAのような内部コンバイナーを使用して和信号を供給することで、追加の校正が必要な外部コンバイナーを不要にすることができます。

#### 図5:一定間隔の周波数掃引



#### 図6:トーン2の掃引による可変オフセット



#### 図7:パワー比を変えることによる相互変調テスト



### 連続波信号を使用したデバイス検証

#### インターセプトポイントと高調波

アンプのリニアリティーを理解するためにもう1つ重要なのが、インターセプトポイント測定です。これは3次インターセプトポイント(IP3)と呼ばれることもあります。これは、リニア動作と3次高調波の増加速度の比較を、数学的に近似したものです。これは、図8に青で示した理想的な利得変換の曲線と、3次高調波が入力パワーに対してどのように増加するかを示す赤の曲線の交点に基づく理論的なポイントです。インターセプトポイントが大きいほど、アンプの特性は優れています。

高調波を測定するには、パワーアンプに連続波を入力し、その出力を測定します。

VNAを使えばこれは簡単です。高調波は元の入力周波数f<sub>0</sub>の2倍、3倍、4倍などなので、VNAの周波数変換測定が使用できます(図9を参照)。VNAのスペクトラム・アナライザ・モードを使えば、スペクトラム全体を表示して、他のスプリアス信号を検出できます。

図8:3次インターセプトポイント





### 連続波信号を使用したデバイス検証

#### 雑音指数/ノイズファクター

ー部のアンプのアプリケーションでは、雑音指数(ノイズファクターとも呼ばれる)が重要 な特性です。雑音指数は基本的に、アンプ自体によって付加されるノイズを表します。図 10に例を示します。

#### 図10:アンプによって導入されるノイズレベルによるアンプ出力でのS/N 比の低下



左側は、特定の信号強度を持つ入力信号(S<sub>in</sub>)と、バックグランドノイズ(N<sub>in</sub>)の重ね合わせです。この信号がアンプを通ると、必要信号とホワイトバンドノイズの両方がアンプの利得によって増幅されます。

問題は、アンプ自体からもいくらかのホワイトノイズが付加されることです。その結果、ダ イナミックレンジとS/N比が低下します。図10の右側のプロットでは、入力信号と比べて S/N比が低下しているのがわかります。濃い青の矢印は元のS/N比を表し、赤の矢印はS/ N比がどれだけ低下したかを示します。アンプから付加されるノイズはなるべく小さい方 がよく、特にレシーバーで用いられるローノイズアンプではそれが重要です。

雑音指数を測定するには、出力ノイズ ( $N_{out}$ ) と入力ノイズ ( $N_{in}$ )の関係を、デバイスの利得 ( $G_{nur}$ )と組み合わせて考慮します (図11を参照)。

#### 図11:出力ノイズと入力ノイズの比較



### 連続波信号を使用したデバイス検証

雑音指数の測定には、2つの異なる方法があります。1つはYファクター法と呼ばれ、通常 はスペクトラム・アナライザを使用します(図12を参照)。ノイズを入力した状態で、デバイ 号源および測定レシーバーとして使用し、信号源をオフにした状態でノイズを、信号源を スから来るノイズを測定します。測定は2回行われます。1回はノイズソースをオンにして、 もう1回はノイズソースをオフにして行います。

2つの結果をプロットし、測定されたポイントの間にラインを引くことで、アンプ自体から 付加されたノイズNnurを導出できます。

2つめの方法はコールドソース法と呼ばれます(図13を参照)。この方法では、VNAを信 オンにした状態で利得を測定します。

計算は、雑音温度表現に基づいて行われます。この方法では、各コンポーネントから付 加されるノイズではなく、ノイズに対応する効果である温度に注目します。

#### 図13:コールドソース法によるノイズファクター(F)測定







#### 凡例:

T<sub>amb</sub> 周囲温度 信号源の雑音温度

- T<sup>ON</sup> Source T<sup>OFF</sup> source 信号源がオンのときの雑音温度 信号源がオフのときの雑音温度
- レシーバーの雑音温度
- IEEEによって定義された標準基準温度:290 K(16.85 ℃)
- システムの帯域幅 В
- ボルツマン定数 (1.38×10<sup>-23</sup> J/K)
- G<sub>nut</sub> DUTの利得
- F<sub>DUT</sub> DUTのノイズファクター(リニア)

#### 図12:Yファクター法によるノイズファクター測定

### 連続波信号を使用したデバイス検証

#### ウエハー検証とデバイスモデリング

ウエハーテストやウエハー検証を行う場合、最初に必要 なのは、ウエハーランが成功したかどうかを知ることで す。そのためには通常、DCパラメトリックテストと、いくつ かの基本的なRFパラメータが用いられます。

アンプのRF測定を行う場合、パワーアンプは使用時に発 熱します。したがって、デバイスの自己加熱を制限するた め、標準的なSパラメータではなく、パルスドパラメータに 注目する必要があります。また、ウエハー上のデバイスを 考慮する場合、その周囲に整合回路は存在しないのが普 通です。このため、ロードプル法を使用して、入力と出力に 特定のインピーダンスを印加する必要があります。

ウエハーと接続するため、ローデ・シュワルツは、ウエハー プロービングの分野をリードするMPI Corporationおよび FormFactorと協力しています(図14を参照)。

#### 図14:プロービングを使用したウエハー検証



### 連続波信号を使用したデバイス検証

#### ロードプル測定

すでに述べたように、被試験デバイス (DUT) の周囲には整合回路が必要です。ロードプル法では、ベアボーンテスト状況で必要なインピーダンス変換を追加します (図15を参照)。

#### 図15:ロードプルインピーダンス制御によるさまざま な整合でのDUTの非線形特性の評価



ロードプル法には、パッシブとアクティブの2種類があります。ロードプルは正確なデバイ ス特性評価に必須です。アンプのコアであるトランジスタは、負荷インピーダンスの影響 をきわめて受けやすいからです。入力側と出力側でソース/ロードプルを使用すること で、DUTに異なるインピーダンスを印加できます。

パワーアンプは、圧縮が始まるノンリニアレンジで使用されるのが普通です。その方が大きい出力パワーと高い効率が得られるからです。ただしこの領域では、パワーアンプの小信号特性評価が非線形効果のために使えなくなります。

動作は変化しますが、VNAを使えば、デバイスの性能と特性を表すベクトル波形測定値 を引き続き得ることができます。ロードプル法を使うことで、入力と出力に印加されるイ ンピーダンスの範囲内で、DUTの最適な動作ポイントを導出できます。これらは通常スミ スチャートにプロットされます(図16を参照)。

### 図16:負荷インピーダンスを示すスミスチャート上にマッピングされたDUTの電気パラメータ



### 連続波信号を使用したデバイス検証

#### デバイスモデリング

パワーアンプを環境内でシミュレートするには、アンプの優れたモデルが必要です。これには2つの方法があります。

#### 方法1

これはコンパクトモデリング法と呼ばれ、小信号効果を測定することでリニア動作を調べます。

この方法は特定のキャパシタンスと抵抗の効果に基づいて記述され、それらを使用して モデルが作成されます。例として、電界効果トランジスタ(FET)によるコンパクトモデル を図17に示します。

#### 方法2

この方法は、ビヘイビアモデルあるいはブラックボックス法と呼ばれます(図18を参照)。 この方法では、入力から出力への伝達関数だけが記述され、トランジスタ内部の各種効 果の詳細は記述されません。

この方法では、高調波と各種のインピーダンス効果も考慮されます。これらは通常、VNAの非線形手法で得られる波形測定値を使用して測定されます。この方法は、DUTのリニアレンジだけでなくノンリニアレンジに対しても使用できます。

#### 図17:トランジスタの等価電気回路を示すFETコンパクトモデル



#### 図18:ブラックボックスモデルでは高調波や 各種インピーダンス効果も考慮される



### 変調を使用したデバイス検証

#### 変調測定を行う理由

VNAを使用して連続波測定を行う従来の方法では、さまざまな情報や特性をデバイスから得ることができます(図19を参照)。ただし、最近の5Gや最新のWi-Fi®追加機能に見られる超広帯域の変調方式では、数百MHzにわたる広い帯域幅が用いられることがあります。このような場合、CWテストだけではアンプの動作を容易に検証することはできません。



理想的な方法は、対象の信号波形を含むターゲットシナリオを使ってデバイスの動作を 把握することです。この場合の代表的なテストセットアップを図20に示します。ここでは、 ベクトル信号発生器を使って広帯域変調信号をデバイスに供給し、反対側に接続された スペクトラム・アナライザで信号を復調することで、現実的なターゲット条件でデバイス の特性を調べます。きわめて正確な利得および整合情報を得るために、パワーセンサが 追加される場合もあります。

#### 図20:ターゲット信号波形を使用したテストセットアップによるデバイス 動作の解析



このセットアップでは、以下の項目が測定されます。

- ▶ チャネルパワーおよび利得と入力整合
- ▶ 隣接チャネル漏洩電力比(ACLR)/隣接チャネル電力(ACP)
- ▶ 変調性能:EVM
- ▶ 歪み:AM/AMおよびAM/PM

隣接チャネル漏洩電力比(ACLR)測定では、チャネルパワーと隣接チャネル電力(ACP) が測定されます。アンプによって隣接チャネルにスペクトラムリグロースが発生する場合 があるため、アンプから隣接チャネルにもたらされるパワーの大きさを評価することが 重要です。

EVMは、広帯域変調信号の増幅のリニアリティーを表すもので、ターゲットアプリケーションで低いビットエラーレートと高いデータスループットを確保するために役立ちます。

### 研究開発 変調を使用したデバイス検証

#### **EVM**の導出

EVMの導出には2種類の方法があります。

#### 方法1

RMS EVM (生のEVMとも呼ばれる) は、出力信号と入力信号の違いをサンプル単位で 調べることによって得られます(図21を参照)。

#### 図21:RMS法によるEVMの導出



#### 方法2

もう1つの方法は復調EVMと呼ばれ、5GやWi-Fi®といった規格に基づく復調手順を使用 します(図22を参照)。この場合、変調の方式が予めわかっているので、ベースラインI/Q ファイルを入手する必要はありません。この方法では、受信サンプルポイントを最も近い コンスタレーションポイントと比較します。

#### 図22:復調EVM法



これはきわめて高速な測定であり、エラーベクトルの大きさにかかわらず、ワーストケースのEVM値を最も効率的かつ最も正確に計算できます。ただし、この方法では元の入力 I/Qデータにアクセスできることが必要です。

復調法の利点は、規格で明確に定義されていることです。これらの定義では、測定方法 や使用するフィルタリングなどについても定められています。これにより、異なるシナリオ や異なるベンダーの間の比較が可能になります。

### 変調を使用したデバイス検証

ただし、デバイスの正確な特性評価を行うには、EVMが入力と出力のレベルに応じて異 なることを考慮する必要があります。EVMは入力パワーと利得の関数であり、その結果 として出力パワーにも依存します。これに対処するため、研究開発や特性評価では「バス タブ曲線」と呼ばれるプロットが作成されることがあります。

デバイスのパワーレベルが高いと、圧縮が起きる飽和ポイントに近づくため、性能が低下し、EVMが増加します。トレース範囲の中央付近は最適な領域であり、EVM性能が最高になります。この範囲をできるだけ広くする必要があります。

低いレベルでは、入力が小さいためS/N比が低下します。この場合もEVMが増加します。 「バスタブ」という名前はこの曲線の形から来ています(図23を参照)。

この曲線は、システムの最適化目標(利得、最大パワー、EVM、低ノイズなど)に応じて、 さまざまな温度や動作ポイントでプロットされる場合があります。

#### 図23:「バスタブ」曲線を使ったエラーベクトル振幅プロット



## 研究開発 変調を使用したデバイス検証

#### 歪み

変調環境で振幅または位相ひずみを測定する場合、入力パワーを掃引する必要はあり ませんが、一定の時間捕捉するだけで変調されるため、信号再現性には意味がありま す。このため、パワーレベルと望ましい分布には通常大きな差異があり、AM/AMおよび AM/PM曲線は図24に示すように直接導出できます。

#### 図24:AM/AM曲線およびAM/PM曲線



4 Phas	e Devi	ation vs In	low	high	1 Clrw	r 🔍 2 Mc	od • Ide	alLine	
16.0									
10	1.1	1.	Call Cart 1						
0.0				Section	5.1				
ο.				的生活的		a straight		Sec. 1	
0.0					1. A.		A REAL PROPERTY		
0					ALL SEA		inter and interested		
-8 °				121.231	15 (0 San 19	AN A COMPANY			
16.0		[5] A. P. Maria	1993年1月1日	10 C - 10					
-10 -									
-40.0 dBm			5.2 dBm/				12.0 dBm		

#### 最適化のオプション

アンプの最適化にはさまざまなオプションがありますが、どの方法を選ぶかは常にター ゲットアプリケーションに依存します。例えば、変調なしのCW信号やパルスド信号だけ を主に扱う場合、重要なのは最大出力パワーと効率で、変調のリニアリティーを考慮す る必要はありません。このため、アンプを飽和点のすぐ近くで使用して、最大限の出力パ ワーを供給できます。

これに対して、変調環境では、信号忠実度を確保し、線形増幅を可能にするため、レベル を下げる必要があります。理想的な方法は、最適化の方法とシミュレーションを設計の 最初期から考慮し、その後に測定を利用してハードウェアに対する最適化を行うことで す。

そのためにはいくつかのオプションが利用できます。1つの方法は波形エンジニアリングと呼ばれ、クラスA、クラスBといった異なるアンプのクラスを使用します。

もう1つの方法は、ユーザー定義クレストファクター減少と呼ばれ、アンプが処理しやす いように一部のピークをカットします。

もう1つの一般的なシナリオとしては、異なるトポロジーの使用が挙げられます。例としては、エンベロープトラッキング、ドハティアンプ、負荷変調平衡アンプなどがあります。

それに加えて、デジタルプリディストーションによる線形化が用いられることもあります。

#### クレストファクター減少(CFR)

クレストファクターは、信号のピークパワーと平均パワーの比を表します(図25を参照) 。ピークはまれにしか発生しませんが、信号全体をリニアに伝送するには、ピークがアン プのリニアレンジ内に収まる必要があります。

#### 図25:信号の最高のピークの発生確率が小さいことを示すクレストファ クター曲線



アンプの入力信号を変更して、頻度の少ないピークの一部をカットしても、信号内容への影響はわずかです。このような圧縮からは、相互変調が生じます。すなわち、信号スペクトラムが拡大します。このような高いピークから生じるもう1つの問題は、アンプだけでなくデジタル側でも、まれなピークに対応する余裕(ヘッドルーム)を設ける必要があることです。CFRを効果的に実行して副作用を減らすため、フィルタリングによってスペクトラムの拡張を打ち消すこともできます。



#### 異なるアンプトポロジーの使用

もう1つの重要な方法として、異なるトポロジーの使用が挙げられます。その目的は、入 力信号を変更することではなく、アンプの構成を変えることにあります(図26を参照)。一 般的な方法の1つは、効率的に組み合わせられた複数のアンプブロックから信号を構成 することです。これには主に3つの種類があり、ハイブリッド型もあります。

3つの主な種類とその機能は、以下のとおりです。

- ▶ エンベロープ=乗算
- ▶ アウトフェージング=加算
- ▶ ドハティ=基準

また、新しい種類として、負荷変調平衡アンプ(LMBA)もあります。

#### 図26:パワーアンプのトポロジーの基本的な種類(ハイブリッド型を含む)





#### エンベロープトラッキング

この方法は、携帯電話などのバッテリー動作デバイスの設計に非常に多く用いられます (図27を参照)。この方法の特徴は、アンプに電源から一定のパワーを供給するのでは なく、電源がRF信号のエンベロープに追随することにあります。

図28に示すように大量のエネルギーが熱として消費されることを避け、アンプに供給するパワーを信号エンベロープに追随させることで、効率を大幅に高めることができます。 この方法の課題は、高速な信号トラッキングの実現方法にあります。これは一般的に、信号帯域幅の3倍にも及びます。



#### 図28:アンプに供給されるパワーが信 号エンベロープに追随する



#### ドハティアンプ

ドハティアンプは、インフラアプリケーションに多く用いられ、よく知られている効率改善 方法です。

この方法では、2種類のアンプの組み合わせが用いられます。1つのアームはRMSパワー、もう1つは信号ピークを処理します(図29を参照)。RMS部分を処理するメイン経路は、飽和点付近で使用して高い効率を達成し、補助アンプではピークのための大きなヘッドルームを確保します。

ドハティ設計には、クラシックとデジタルの2種類があります。クラシック型は、図30に示 すように入力の数が1つです。入力には固定スプリッターがあり、信号を一定の方式で補 助PAとメインPAに分割します。その後、信号はドハティコンバイナーに通されます。通常 は、異なるバイアスのデバイスが、異なる動作のパワーアンプとして用いられます。

#### 図29:ドハティアンプの2つの経路



#### 図30:クラシックドハティアンプ



#### デジタルドハティアンプ

もう1つの極端は、デジタルドハティアンプ(図31)です。この方式では、アンプに2つの入 カチャネルがあります。すなわち、信号は固定のアナログスプリッターで分割されるので はなく、デジタルドメインで分割されます。それによって、メインアンプと補助アンプに異 なる2つの信号が供給されます。

この方法では、信号動作の高度な最適化が可能なので、アンプを最適な動作点で動作 させるのが容易になります。これにより、高効率のドハティアンプを開発できます。ロー デ・シュワルツでは、従来のスプリッター型とデジタルドハティ型の両方の実装に対し て、2つの経路の協調動作により目標とする設計を達成する方法を理解するための、測 定を利用したデザインプロセスを提案しています。

この提案で用いられる2つの信号生成経路は、2チャネルのベクトル信号発生器からメイン用と補助用のパワーアンプ向けの信号を供給することで、容易に実現できます(図32を参照)。これにより、例えば飽和出力パワーに対して、2つの信号の間の振幅/位相関係の等高線プロットを作成することで、2つのアンプの間の最適な条件を見つけることができます。これは飽和パワーだけでなく、効率、ACLR、その他任意の必要な指標に対して行うことができます。

#### 図31:デジタル (デュアル入力) ドハティアンプ



#### 図32:デュアルパスのベクトル信号発生器によりデジタルドハティパワーアン プの詳細な解析が可能



#### 従来型/デジタルドハティの動作

残念ながら、効率の点で最適な動作ポイントは、飽和パワーやACLRに関しては最適と は言えません。ただし、測定を利用した方法を使えば、すべての指標に関する動作を調 べることで、設計に関する意思決定のための情報が得られます。

従来の動作モードによるドハティ設計の結果の例を図33に示します。その下に、最良の 方法によるデジタルドハティ設計を示します。2つのプロットでは、上側に利得圧縮、下側 に位相変動が示されています。位相変動はできるだけ平坦で、利得圧縮はできるだけ高 いレベルにあるのが理想です。

アンプはできる限り線形に動作する必要があり、デジタルドハティ動作では最大出力パワーが1 dB以上増加しています。これにより、デバイスの仕様を改善したり、同じセットアップで異なるデバイスを実現したり、低いパワークラスのデバイスを使用してエネルギーを節約し、コストを削減したりできます。

#### 図33:ドハティアンプの結果の例

#### 従来型動作



#### デジタルドハティ動作



#### 負荷変調平衡アンプ(LMBA)

特定の性能を実現できる帯域幅を拡大する方法として、LMBAはますます注目を集めています(図34を参照)。

2つの平衡アンプに加えて、制御信号パワードライバーがあり、これが出力の1つに注入 されることで、負荷変調が起こります。この方法では、最大100%に及ぶきわめて大きい 帯域幅カバレッジが得られます。

コンポーネントの数を減らすため、直交LMBAと呼ばれる新しい方式が開発されました (図35を参照)。この方式では、制御信号として、負荷側でなく入力側の異なる入力が使 用され、出力には固定またはチューニング可能な負荷が追加されます。

すぐわかるように、出力側のチューニングされる負荷は、測定キャンペーンで大きな変動 を導入して、ターゲットアプリケーションで使用する負荷変調を決定するためにも利用で きます。

#### 図34:負荷変調平衡アンプ









#### 線形化

線形化の目的は、出力をできるだけ線形に保つことです。AM/AM歪みプロットでは、理想的な出力は直線が最後に壁に突き当たったような形であり、AM/PM歪みは理想的には0になります(図36を参照)。

線形化の方法としては、直交型、極座標フィードバック、アナログ/デジタルプリディスト ーション、フィードフォワードなどがあります。

#### 図36:目標の歪みプロット

AM/AM歪みプロット







#### デジタルプリディストーションによる最適化

デジタルプリディストーション(DPD)は、トポロジーの柔軟性を高める効果があるため、 最近ますます多く用いられるようになっています。これが重要なのは、LMBAなどの一部 のトポロジーの特定の動作に対しては、線形化が必須となるからです(図37を参照)。

目標は、図38のオレンジ色の線で示されるような、入力信号と出力信号の最適な関係 を実現することです。そのために、青のDUT曲線の逆関数 (グレーで表示)を使用して、入 力信号にプリディストーションを施します。結果は、黒の点線で示すような理想的なブリ ックウォール特性を示します。

#### 図37:DUT特性を補正するための信号のプリディストーション



### 図38:測定されたAM/AM、理想的な出力信号、プリディストーションされた入力信号、ハードクリップされた出力信号を示す概要プロット



#### プリディストーションの例

効率が最大となる圧縮点付近でアンプを使用すると、非線形性も最大になります。その ため、線形化による補正が必要となります。パワーアンプを設計する際に知りたいのは、 その動作をどの程度線形化できるか、すなわち、適切なプリディストーションを使用する ことで、EVMやACLRをどの程度改善できるかです。

ローデ・シュワルツでは、理想的なプリディストーションを使用することでアンプの動作 がどれだけ改善されるかを簡単に知る方法を提供しています。入力信号を反復プロセ スで処理することで、与えられた動作点での最良の結果を達成できます。

これにはどのような効果があるでしょうか。図39に、プリディストーションなしの場合( 黒)と比較したプリディストーションありのアンプ(青)のACLR特性の改善の例を示しま す。

#### 図39: プリディストーションなしの場合(黒)と比較したプリディストーションあり のアンプ(青)のACLR特性の改善を示すプロット





### 研究/設計フェーズのまとめ

研究開発フェーズにおいて、設計の最適化は、多 くの場合、シミュレーションと、最初のデバイスに 対する測定を利用したアプローチの組み合わせ によって行われます。そのためには、一般的に、設 計プロセス全体できわめて高いRF性能が要求さ れます。

研究開発の重要なフェーズの1つとして、デバイ スの検証と最適化があります。測定が必要な特 性はたくさんあるので、1つのツールでできるだけ 多くの特性を測定できることが重要です。そのよ うなツールの1つがVNAです。 連続波信号または変調信号を使用して、デバイスを 検証できます。連続波を使用するとデバイスに関し て多くの情報が得られる一方で、変調を使用すれば 5GやWi-Fi®などのアプリケーションでのデバイスの 動作を知ることができます。

最適化も重要なトピックであり、波形エンジニアリン グ、CFR、ドハティアンプなどの異なるアンプトポロジ ーの使用といった方法が使用できます。線形化とプ リディストーションも、特性評価フェーズの前に設計 を最適化するための重要な技法です。

## 特性評価

特性評価の目的は、1個のデバイスや小さいサンプルがデザインゴールを満たすことを 確認するだけでなく、製品を製造にリリースする前にもっと大きいサンプルサイズをチェ ックすることです。

このフェーズでは、仕様と性能指標も導出して検証する必要があります。

特性評価のもう1つの重要なポイントは、デバイスの特性を、さまざまな周波数、レベル、 温度でより詳しく理解することです。

特性評価で調べられるRF指標は研究開発の場合と共通なので、必要なテストセットアップもほぼ同じです。図40では、ベクトル・ネットワーク・アナライザ (VNA)を、CW測定とインピーダンスマッチング測定に使用しています。反対側には、変調測定用のベクトル信号発生器 (VSG)とベクトル・シグナル・アナライザ (VSA)に加えて、電源があり、これを使ってテストデバイスの消費電力を測定することで効率測定を行えます。

アクティブデバイスには、CWテストと変調テストを使ったさまざまな特性評価が必要です。これらは通常、図40に示すように、1つのテストステーションまたは、CWテスト用と変調テスト用の2つの別々のテストステーションを使って実行されます。

ただし、DUTに対する1つの接続ですべてのテストを実行できれば、配線の変更なしでテ ストを高速かつスムーズに行えます。 図40:パワーアンプ用テストスタンド一式



## 特性評価

CWとEVMなどの変調測定に対してベクトル補正された結果を得るには、図41に示す ようなシステムが使用できます。図の左側には信号発生器、右側にはシグナル・アナライ ザ、下側にはベクトル・ネットワーク・アナライザが置かれています。デバイスの相互接続 にはカップラーが用いられます。校正がすべて終わったら、さまざまな測定をすべて自動 セットアップで実行できます。

通常は、定義済みの高加速寿命試験(HALT)手法によるストレステストも行われます。ストレステストには、振動、温度、湿度の他に、過大な入力パワーも用いられます。

テストでは、ストレスを徐々に増やして、結果の性能をチェックします。これにより、DUTの 限界を知ることができます。また、これにより、デバイスの故障前の動作を把握して、製品 の予測寿命を判断することもできます。

#### 図41:CWとEVMのベクトル補正測定のテストセットアップ





製造段階のテストの目的は、各コンポーネントを正確に測定し、正しく機能して目標の 仕様を満たすかどうかを判定することです。もう1つ重要なこととして、測定のスループッ トと速度を上げることによるコストの削減があります。このため、絶対的な測定確度より は、サンプル間の再現性のほうが重要とみなされます。

製造テストは、一般的に2つの異なるフェーズで行われます。最初に、ウエハーレベルでテストを実行して、最終テストのためのパッケージングの前にウエハーランが成功したことを確認します。その後、パッケージデバイスの完全なテストが行われます。

テスト手順は多くの場合、特性評価テストに基づいており、重要な性能ポイントを調べま す。デバイスのパラレルテストは、スループットの向上に役立ちます。これにはマルチポー トVNAなどの測定器を使用します。 テストステーションは通常、CWまたは変調のどちらか一方だけを対象としています。これは、テストセットアップを簡素化し、コストを削減するためです。図42のテストセットアップは、CWに最適化されています。

製造テストでは、ロードボードによって1つまたは複数のテストデバイスへの接続が実現 されます。これは、テストを正しく実行するために必要なRF、DC、制御の各信号に対応し ています。ロードボードには、さまざまなテストデバイスに必要な電圧や整合を提供する ための追加回路が含まれることもあります。

このため、DUTポートまでの校正が重要であり、コンポーネントのデイエンベディングが 必要になります。絶対的な確度は、純粋にシステム全体の校正に基づきます。この場合 の問題の1つは、長いケーブルと信号ラインの使用によるパワーの損失と、それに伴う感 度の低下です。

このため、高い測定の再現性と、必要な測定確度を満たすのに十分なS/N比が重要になります。一方、もう1つの目的として、コストの最小化も挙げられます。そのために、研究開発や特性評価のためのテスト方法の低価格バージョンが使用されます。

#### 図42:CW用に最適化されたテストセットアップ



電源シリーズ



#### 製造向けに最適化された変調テスト

特性評価および製造フェーズでは、信号発生や解析といった必要なすべての機能を統合し、特性評価のためのRF性能基準を満たす、使いやすいワンボックストランシーバーソリューションが、テストオペレーターにとって便利です(図43と図44を比べてください)。

ここで重視されるのは、スループット改善のための速度の最適化、小さい設置面積、テストあたりのコストの最小化を、製造に適したレベルのRF性能を維持しながら実現することです。

重要なのは、バリューチェーン内で使用される各セットアップの間の相関です。研究開発フェーズから製造ステーションまで、リファレンスステーションでの信号の作成と解析に同じアルゴリズムを使用することで、相関を維持できます。このようなラボ用リファレンステストステーションの例として、R&S®SMW200A ベクトル信号発生器とR&S®FSW シグナル・スペクトラム・アナライザから構成されるものを、図45に示します。

この統合型トランシーバー方式では、トランシーバー内部でVSGとVSAの機能を直接同 期させることで、テストを高速化できます。理想的には、テストスクリプトをトランシーバ ー上で直接実行できれば、速度とスループットが上がります。

ローデ・シュワルツでは、このような要求に応えるため、PVT360A 高性能ベクトルテスタ ーを開発しました(図46を参照)。

RFコンポーネントテストに最適化されたこの製品は、コンパクトなラックサイズの筐体で、あらゆる製造ラインに容易に適合します。オプションの第2トランシーバーを内蔵することで、2台のデバイスに対する完全なパラレルテストに対応します。

#### 図43:性能に最適化された変調テストセットアップ



#### 図44:速度とサイズに最適化された変調テストセットアップ





製造環境での複雑なRFコンポーネントの特性評価を簡素化するため、PVT360Aは、製造アプリケーション向けに最適化されたEVM測定、周波数レンジ、変調帯域幅などの機能と性能を備えています。テストのサイクルタイムを最小化するように設計されているため、製造スループットを改善できます。ベクトル信号発生/解析機能を備えているため、同期方式によってテストを高速化すると同時に、最大限の性能を確保できます。

自動テスト手順をサポートし、高精度の測定を可能にする機能により、製造プロセスを 簡素化し、一貫したテストプロトコルを実現できます。あらかじめ決められた仕様に従っ

図45:R&S®SMW200AとR&S®FSWに基づくラボテストに適したリファレンステストステーション

てコンポーネントを評価することで、テストの統計的なバラツキを減らし、製造するコン ポーネントの信頼性と品質を上げることができます。

2台の内蔵トランシーバーに統合された最大16ポートのスイッチマトリクスにより、2台の デバイスのパラレルテストだけでなく、デバイスの異なるポートの間の高速スイッチング や、1つのロードボード上の複数のDUTへの接続が可能になります。



## まとめ

- ▶ 最も効率的で完全なテストを行うには、さまざまな方法による CWおよび変調テストの組み合わせが必要です。
- ドハティなどの個々のトポロジーに対して、専用のシナリオを 使用する必要があります。
- ▶ 線形化の急速な発展により、性能が向上し、パワーアンプ設計の自由度が高まりつつあります。
- ラボ用のリファレンステストステーションを製造に最適化された1台のボックスに再現することで、製造ユニットのテストの容易さ、速度、効率が向上し、信頼できる結果が得られます。



- ACLR Adjacent channel leakage ratio:隣接チャネル漏洩電力比
- ACP Adjacent channel power:隣接チャネルパワー
- BPA Balanced power amplifier: 平衡パワーアンプ
- CFR Crest factor reduction: クレストファクター減少
- CSP Control signal power:制御信号パワー
- CW Continuous wave:連続波
- DAC D/A converter:D/Aコンバーター
- DPD Digital predestortion:デジタルプリディストーション
- DUT Device under test: 被試験デバイス
- EDA Electronic design automation:エレクトロニック・デザイン・ オートメーション
- ER Envelope restoration:エンベロープ回復
- EER Envelope elimination and restoration:エンベロープ除去お よび回復

- ET Envelope tracking:エンベロープトラッキング
- EVM Error vector magnitude:エラーベクトル振幅
- FET Field effect transistor: 電界効果トランジスタ
- HALT Highly accelerated lifecycle tests:加速寿命試験
- LINC ノンリニアコンポーネントによるリニア増幅
- LMBA Load modulated balanced amplifier:負荷変調平衡 アンプ
- PA Power amplifier:パワーアンプ
- PAE Power added efficiency:電力付加効率
- PAPR Peak-to-average power ratio:ピーク対アベレージ パワー比
- SNR Signal to noise ratio:信号対ノイズ比
- VNA Vector network analyzer:ベクトル・ネットワーク・ アナライザ
- VSA Vector signal analyzer:ベクトル・シグナル・アナ ライザ
- VSG Vector signal generator:ベクトル信号発生器

#### ローデ・シュワルツ

ローデ・シュワルツはテクノロジーグループとして、電子計測、 テクノロジーシステム、ネットワーク/サイバーセキュリティの 分野の最先端ソリューションを提供することで、安全でつなが り合った世界の実現を先導する役割を果たしています。創業か ら90年を超えるこのグループは、全世界の産業界と政府機関 のお客様にとっての信頼できるパートナーです。本社をドイツの ミュンヘンに構え、独立した企業として、70か国以上で独自の 販売/サービスネットワークを展開しています。

www.rohde-schwarz.com/jp

#### ローデ・シュワルツカスタマーサポート www.rohde-schwarz.com/support



8608.0391.96 01.00 PDP/PDW 1 ja

R&S<sup>®</sup>は、ドイツRohde&Schwarz の商標または登録商標です。 掲載されている記事・図表などの無断転載を禁止します。 PD 3608.0391.96 | Version 01.00 | 2月 2024 (jr) RFパワーアンプ設計のテスト おことわりなしに掲載内容の一部を変更させていただくことがあります。 あらかじめご了承ください。