

RFフロントエンドの線形化

ホワイトペーパー

5Gなどの通信リンクでより高速なデータスループットを可能にするため、これまで以上に高次の変調方式、広い信号帯域幅、高い動作周波数が広く採用されるようになり、フロントエンドへの要求はますます厳しくなっています。多くの場合、信号忠実度は線形化により向上できます。

RFチェーンの数の増加と5Gフロントエンドの信号帯域幅により、DPD(デジタルプリディストーション)がデフォルトの選択肢でなくなる可能性があります。5Gフロントエンドは4Gフロントエンドとはまったく異なるものになります。

無駄になるパワーを最小限に抑えて、十分な忠実度とパワーを備えた信号をどのようにして最適に実現するかという問題と同様に、効率性、線形性、帯域幅、出力パワーといった指標が重要であることは変わりません。ただし、この問題に対するソリューションは、これまで以上に大規模なものになります。

本書では特に、(i)線形化方式の分類、(ii)ハードリミッタの概要、(iii)DPD以外の手法を使用したミリ波PAの代表例の線形化、(iv)効率的に生成されたマルチパス成分から線形性を実現するトランスミッターについて説明します。

注記:

最新のドキュメントについては、当社ホームページをご覧ください。

<http://www.rohde-schwarz.com/apnote/1MA269>

目次

1	はじめに	3
1.1	フロントエンドとは	3
1.2	デジタルプリディストーションとRFパワーアンプの考え方	4
1.3	本書の構成	5
2	線形性と線形化	6
2.1	歪みの概要	6
2.2	線形化の分類	7
3	ハードリミッタ	9
4	3次インターセプト	10
4.1	IP3の背景	10
4.2	フロントエンドミキサーの例	10
4.3	ハードリミッタのTOI	11
4.4	まとめ	13
5	RF増幅器の線形化	14
5.1	テスト信号	14
5.2	トランスミッターの性能要件	16
5.3	基準増幅器フロントエンド	18
5.4	Blackのフィードフォワード	20
5.5	Blackのフィードバック	22
5.6	McMillanのハイブリッド	24
5.7	変調信号による性能	26
5.8	まとめ	35
6	マルチパスTxフロントエンド	37
7	参考資料	39
8	付録	40
8.1	フロントエンドでのRF線形性のテスト	40
8.2	線形性テストと測定機器の例	42

1 はじめに

1.1 フロントエンドとは

通常、デジタルデータはそのままの形では無線伝送できません。

デジタルデータの無線伝送は、アナログ信号を使用して行います。トランスミッターでデジタルデータをアナログ搬送波上に符号化し、媒体に放射し、レシーバーでデジタルドメインに復号化します。

この変換と伝送のプロセス全体を実行するのが、RFフロントエンド(OSIモデルでは物理層フロントエンドと呼ばれる)です。図1-1に、RFフロントエンドの例を示します。

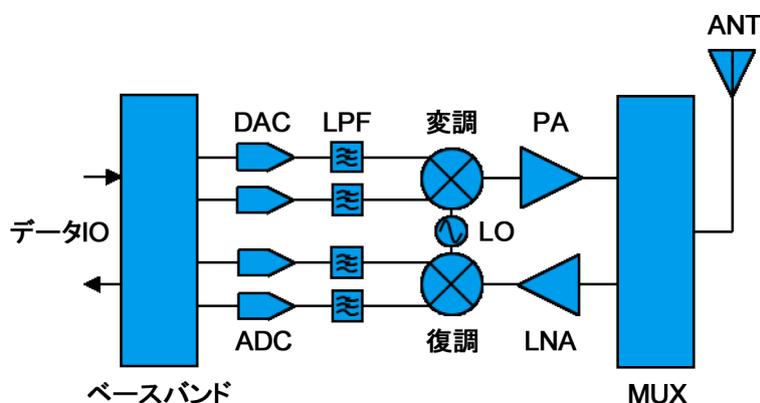


図1-1: 一般的な無線フロントエンドの物理層

このリンクは、自由媒体(図1-1に示す無線アンテナを使用)または拘束媒体(導波管や光ファイバケーブル)で形成されています。全2重または双方向通信では、送信信号と受信信号は通常多重化されます。この多重化では、表1-1に示す例のいずれかを使用するのが一般的です。

送受信の多重化: 例	
ドメイン	例
時間	半導体スイッチ、サーキュレーター
周波数	フィルター(ダイプレクサーなど)
偏波	直交モードトランスデューサー(OMT)
空間	ディスクリット送信/受信アンテナ

表1-1: ドメインおよびコンポーネントの多重化の例

フロントエンドの「デジタル」側には、トランシーバーまたはモデムが存在します。ほとんどはシリコンプロセスに組み込まれていて、デジタルデータをアナログ送信するための準備と、受信したアナログ情報をデジタル化する役割を担っています。インターフェースは、標準化されている場合も独自仕様の場合もあります。モデムにその他の機能を統合して、フロントエンドとOSIの上位階層を1つのチップやパッケージモジュールにまとめることもできます。

(アナログ)無線フロントエンドのパーツには、機能要件や性能要件に応じてさまざまなテクノロジーが使用されています。これには、多くの場合、半導体以外の材料も含まれます。

RFフロントエンドには、規制や商業上の制約があります。規制面では、フロントエンドが目的に適合し、他のユーザーやシステムと混信しないことを保証することが要求されます。商業面では、コスト、市場での入手可能性、既存企業、性能などの制約を受ける可能性があります。

すべてに対応できるフロントエンドアーキテクチャーは存在しません。1つの仕様が提示された場合、同じ組織内であってもエンジニアまたはチームによって示されるソリューションは異なるものになります。それぞれが価格と性能のバランスを独自に考慮するためです。価格と性能が競争上の差別化要因になる場合は、それぞれのケースに応じて最適なアーキテクチャーを検討する必要があります。

デジタル変調方式は、ほぼ完全にアナログに取って代わっています。適応変調(符号化)方式は、通信リンク経由で送信されるデータフォーマットの連続的な微調整に使用されることが増えています。

本書では、高性能フロントエンドのコンセプトについて説明します。コンセプトを理解することで、以下が可能になります。

- 線形化の手法と選択肢をすばやく理解して評価できる。
- 最適な手法を特定し、それぞれのケースに適した個別のソリューションの最適化や導入を行うことができる。

1.2 デジタルプリディストーションとRFパワーアンプの考え方

線形化は、トランスミッター内のRFパワーアンプ(RFPA)のデジタルプリディストーション(DPD)に限った話ではありません。

線形化を利用するために、フロントエンドをトランスミッターの一部に組み込んだり、RF増幅器を追加したりしなければならない訳ではありません。DPDは、線形化を行う唯一の方法ではありません。

実際、フロントエンドを線形化することが有用であっても、DPDがそれに適していないケースは数多く存在します。

- 最もわかりやすい例は、レシーバーに変調RF信号が入力され、これに多くの不要な干渉信号が含まれている場合です。信号を比較的高い精度でデジタル化してフィルタリングできないと、干渉源によってレシーバーのダイナミックレンジが損なわれます。
- 一部の送信アプリケーションでは、デジタルベースバンドにアクセスできない場合や、フィードバック経路のデジタル化が現実的でない場合があります。例えば、ADC(アナログ/デジタルコンバーター)のコストが高すぎる場合や消費電力が大きすぎる場合です。また、必要なサンプリングレート、帯域幅、分解能のADCが存在しないこともあります。
- フロントエンドで周波数変換が行われ、コスト面での対応が困難になり、フィードバックレシーバーを効果的に実装することができない場合があります。

最後の2つは、5Gフロントエンドと関係の深い問題です。

1.3 本書の構成

第2章では、線形化の対象、歪みの種類、および線形化方式の分類について説明します。

第3章では、ハードリミッタについて説明します。ほとんどの場合、これは最適な伝達特性を表し、リミット値の場合と同様に通信システムの信頼性と性能を理解するのによく使用されます。

第4章では、フロントエンドカスケードを設計するための従来のインターセプトポイント法を評価します。トランスミッター、リピーター、レシーバーで使用される代表的なミキサーの性能をハードリミッタの性能と比較します。

第5章では、ハードリミッタを代表的なTWTA(ミリ波フロントエンド増幅器の一種)と比較し、代表的な信号(256-APSK)を入力します。第7章の「参考資料」のページに掲載の各文献で記述されているさまざまな線形化方式を使用しTWTAを修正して、改善の可能性を示します。

本書の執筆時点では、信号帯域幅、増幅器モデル、動作周波数などの重要な5Gパラメータに関するコンセンサスが得られていません。そのため、モデルおよび変調は関連するミリ波分野に基づいたものです。

第6章では、マルチ入力を使用するトランスミッターの特別なケースについて検討します。このタイプのトランスミッターでは、信号は従来のシングルパスではありません。信号のさまざまな成分を個別に処理してから、アンテナの前で最終的な合成を行います。一般的に、これらの成分は効率的に生成する必要があります。

2 線形性と線形化

2.1 歪みの概要

歪みにはさまざまな種類が存在し、その原因もさまざまです。歪みはすべてのコンポーネント(受動素子を含む)によって生み出され、リンクのすべての部分(送信、中継、受信)に存在します。

歪みの種類と原因は、以下のように分類できます。

- 線形歪み
 - 一般にフィルターや周波数選択素子によって生じます。
 - ある周波数範囲で複素利得の変動の原因になります。

- 非線形歪み
 - 一般に半導体(ダイオードや増幅器を含む)によって生じます。
 - 異種材料の接合部分(PIMと呼ばれる)で発生します。
 - 異なるドライブレベルでの複素利得の変動の原因になります。

- メモリ効果
 - 時間および温度による複素利得の変動、または異なるチャネルまたはエンベロープ周波数での複素利得の変動を引き起します。

- ノイズ
 - すべてのコンポーネントで発生します。
 - ランダムな複素利得の変動の原因になります。

これらの歪みのレベルは、基準(線形レンジにバックオフした)ソリューションと比較する、線形化を行うことで修正できます。

線形歪みの低減はイコライゼーションとも呼ばれ、あらゆる通信システムで使用されています。これは長期にわたって(複数のシンボルまたはデータパケットに対して)まとめて、デジタルベースバンドで実行されます。これは例えば、信号の既知のトレーニングシーケンスで受信した入力の偏差を解析することにより計算できます。

イコライゼーションによって一部の通信方式は改善されますが(多くの場合、改善可能)、非線形歪みは低減できません。実際、非線形歪みによってイコライザーの性能は低下します。本書では、イコライゼーションに関する詳細な検討は行いません。

(非線形歪みの)線形化を行うと、時間および振幅ドメインで複素利得の変動を低減することにより、イコライザーの性能を改善できます。これは、チャネルの周波数応答の抽出に役立ちます。線形化を行うことで、イコライゼーションそのものを行うこともできます。

2.2 線形化の分類

第7章の「参考資料」のページに掲載の各文献では、さまざまな線形化手法が記述されています。さまざまな線形化手法の長所と短所を見極めるには、線形化手法を分類するのが便利です。分類は、個々のアプリケーションに最適な(1つまたは複数の)手法を見極めるのに役立ちます。

複数の手法を組み合わせることによりさまざまな不備に対処することができるため、複数の手法の利用が必要になる可能性もあります。複数の手法を使用する1つの例(フィードバックとフィードフォワードのハイブリッド)が、[1]の文献に示されています。本書では、これを簡素化した例について説明します。

基準となる性能は、十分なバックオフで動作するオープンループのフロントエンドです。線形化は使用されません。これはコンポーネントが十分な線形性を備えていることに依存しています。利用可能なコンポーネントが同じであると仮定すると、競合製品よりも性能を大幅に向上させることはできません。

一方で、複数の線形化手法を使用して線形化したシステムを開発することもできます。テスト機器をループに組み込んで歪みをモニターし、任意の高度な制御ソフトウェアを用いてさまざまな線形化を実装することができます。このような制約の中で、最適なソリューションを見いだす必要があります。

最初に、信号の線形化が以下のどちらであるかに基づいて線形化を分類します。

- 予測／合成、または
- 測定／抽出

次に、信号の線形化を以下のどちらに適用するかに基づいて分類します。

- 歪みの発生源の前(プリソース)
- 歪みの発生源の後(ポストソース)

これらの分類を表2-1にまとめます。これらのカテゴリーは、さらに細かく分類することもできます。

線形化手法			
		障害発生	
		予測／合成	測定／抽出
補正位置	プリソース	デジタルプリディストーション アナログプリディストーション	デカルトフィードバック ポーラフィードバック
	ポストソース	アナログポストディストーション 合成方式	フィードフォワード 固定フィルタリング(バンドパスなど)

表2-1: 線形化手法の分類と例

これらの基本的な分類を説明するために、それぞれの分類の一般的な特徴を以下に示します。

- 予測方式の補正能力は、予測の精度の制約を受けます。歪みを完全に除去できる可能性があります。

- プリソースの測定方式では、歪みを完全に除去できません。この方式が機能するには、歪みが必要です。ただし、設計可能な補正レベルが利用できます。
- プリソースの方式は通常信号レベルの低い場所に補正を適用し、一般に電力効率に優れています。
- ポストソースの予測方式では、広帯域での補正が可能です。
 - 複数の信号処理パスから線形性を実現する合成方式については、[第6章「マルチパスTxフロントエンド」](#)で別途説明します。
 - 例として、ドハティ、アウトフェーシング/Chireix、エンベロープトラッキング(ET)などがあります。

線形化したデザインの導入は難しい課題です。(本書で示すように)特定の方式をシミュレートしたり、ラボ内で手動で最適化した1回限りの方式を構築するのは比較的簡単です。困難なのは、これを実用に適した自己適応可能な安定した方式に変更することです。これは、競合他社との差別化を図る機会になります。

例えば、1つの無線入力に対して線形化を行うシンプルな方式では、動作周波数や動作温度を抽出し、ルックアップテーブル(LUT)を使用して線形化パラメータを調整することができます。

さらに複雑な適応方式では、フロントエンドのさまざまなノードで信号のデジタイズや復調を行うこともできます。これらの信号は、期待されるパターンや既知のパターンと比較して処理し、それらの結果を使用してパラメータを修正します。

適応方式の開発を行う際には、データ取得ポイントを慎重に選択する必要があります。パラメータの中には、フロントエンドチェーン内で大きく変動するものがあります(信号エンベロープの統計など)。

最後に、DfX(組立、テスト、製造、修理などを考慮した設計)に関する問題を考慮することが重要です。例えば、製造時に校正用の温度掃引を行うことは、量産環境の規模で適切に適用できるとは限りません。ただし、製造時の実際の温度の測定と設計時の温度トレンド特性評価を組み合わせることで、適切な製造を考慮した設計(DfM)を実現できる可能性があります。

3 ハードリミッタ

ハードリミッタは完全に線形な(線形化された)コンポーネントです。これは、通信規格を定義するのに、最良の線形性能[2]を理解するためのモデルとして多く使用されます。ハードリミッタは、図3-1のように図で説明できます。また、以下のような性質を持っています。

- AM-PM歪みなし
- ノイズなし、メモリ効果なし、分散なし、遅延なし、など
- 2つの不連続動作領域でのAM-AM
 - 一定の利得(線形)
 - 一定の出力レベル(飽和)

ハードリミッタは、ピーク対平均電力比(PAPR)を抑制する代わりに歪みを増加させます。必要な線形性を確保してシステムが動作できる平均出力レベルが増加するので、PAPRが小さい方が一般に有利です。

トランスミッターの場合、一般にこのように出力レベルが高くなるほどエネルギー効率が向上します。レシーバーの場合は、これによりダイナミックレンジが広がります。

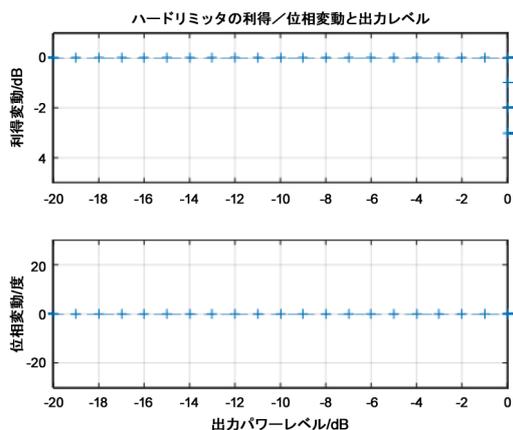


図3-1: ハードリミッタのAM-AMおよびAM-PM特性

一般的な利得圧縮指標(P-1dB、P-3dB、Psatなど)は、入力レベルに対する出力レベルの変化に関するもので、すべて同じです。

本書ではハードリミッタのモデルを使用して、他のフロントエンドに対する線形性の最良性能の比較対照を行います。

4 3次インターセプト

4.1 IP3の背景

従来、フロントエンド設計では、指標として3次インターセプトポイント(IP3またはTOI)、2トーン3次相互変調歪み(IM3)、P-1dB(1 dB利得圧縮)が使用されてきました。

線形性を保証するためのスプレッドシートと計算機が広く発達し、フロントエンドカスケード接続でのIP3やIM3の予測が行われました。ミキサーや増幅器などのフロントエンドの重要な機能ブロックは、特にレーザアプリアケーションの場合、IP3に基づいて売買されました(現在でも売買されています)。

4.2 フロントエンドミキサーの例

ミキサーの線形性の特性値の例は、[3]の文献に示されています。10 dB(高周波の場合)と15 dB(低周波の場合)の間の比がIP3とP-1dBとの間に存在することが示されています。2トーンのそれぞれの絶対レベルが1 dB変動すると、IM3の絶対レベルは3 dB変動します。入力または出力パワーが1 dB変動すると、IM3のレベルは相対的に2 dB変動します。

[3]の文献から引用したデータを表4-1に示します。記載されている変換損失は7 dBです。

ミキサーのIM3特性の例[3]	
出力レベル(トーン毎)	IM3レベル(dBc)
-17	-52
-22	-72
-27	-92

表4-1: [3]の文献から引用した代表的なミキサーの特性データ

以下の仮定および計算を用います。

- P-1dBとIP3の比が15 dB(入力のP-1dB=1 dBm/トーン)
- したがって、出力のP-1dBレベルは-6 dBm/トーン(1 dBm - 7 dBの変換損失)

トーン毎の入力レベルが-10 dBmでトーン毎の出力レベルが-17 dBmである2つのトーンで、-52 dBcのIM3を達成できることとなります。これは、飽和レベルに対する11 dBの出力レベルバックオフに対応しています。

ミキサーのIM3特性の例[3]、ノーマライズ	
出力レベル(平均、P-1dBからのバックオフ)	IM3レベル(dBc)
-11	-52
-16	-72
-21	-92

表4-2: ノーマライズしたミキサー出力のIM3とP-1dBからの出力レベルバックオフ

IM3と平均出力レベルのプロットを図4-1に示します。実際の動作範囲 ($P-1\text{dB}=P_{\text{sat}}=0\text{ dB}$ 以下)と仮想(外挿)範囲を分けています。-11 dBのとき、IM3レベルは-52 dBcです。公称値+15 dBのインターセプトポイントでは、IM3は0 dBです。

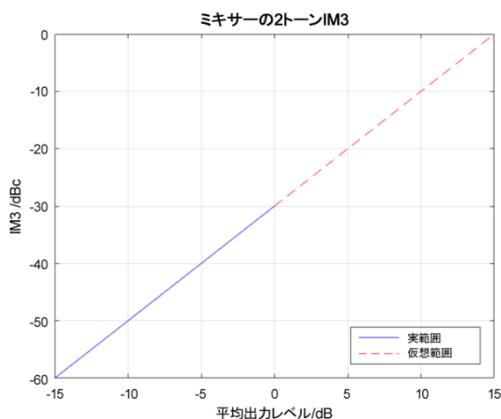


図4-1: [3]の文献から引用した代表的なミキサの2トーン3次相互変調歪み(IM3)

4.3 ハードリミッタのTOI

2トーン信号に対するハードリミッタの応答と、それにより得られる3次相互変調は計算できます。図4-2に、この応答を示します。

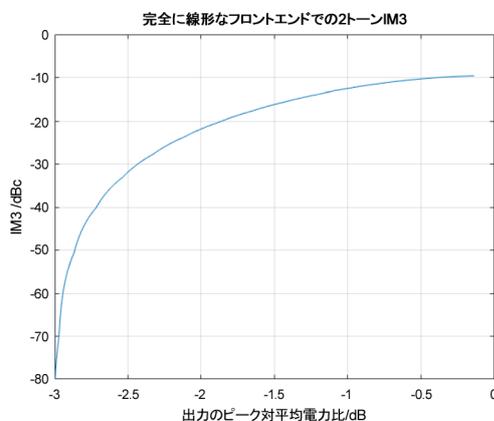


図4-2: 2トーン3次相互変調歪み(3 dBの信号源PAPR)と理想的なフロントエンドでの出力PAPR

クリーンな2トーン信号のPAPRは3 dBです。システムが完全に線形である場合は、このPAPRは維持されます。入力と出力のPAPRがどちらも3 dBになります。

前のセクションの-52 dBc、-72 dBc、-92 dBcのIM3レベルは、 P_{sat} レベルを3 dB以上下回らない平均動作レベルですべて達成できます。

そのため、 -52 dBcが必要な場合には、線形化したシステムで必要となるレベルよりも8 dB高いレート
の(消費電力の大きい)ミキサーが指定されています。 -72 dBcおよび -92 dBcの歪みの場合は、イン
ターセプトポイントに基づいた設計と線形化した設計の間のレートの差はさらに大きくなります。

図4-3に、[3]の文献から引用した既製のミキサーの、入力レベルに対する出力レベルとIM3レベルのプ
ロットを(赤で)示します。

このプロットには、以下を追加しています。

- -6 dBmと仮定した $P-1$ dB
- 線形化したミキサーのIM3レベル
- バックオフレベルからのIM3の外挿(TOIへの影響を示すため)

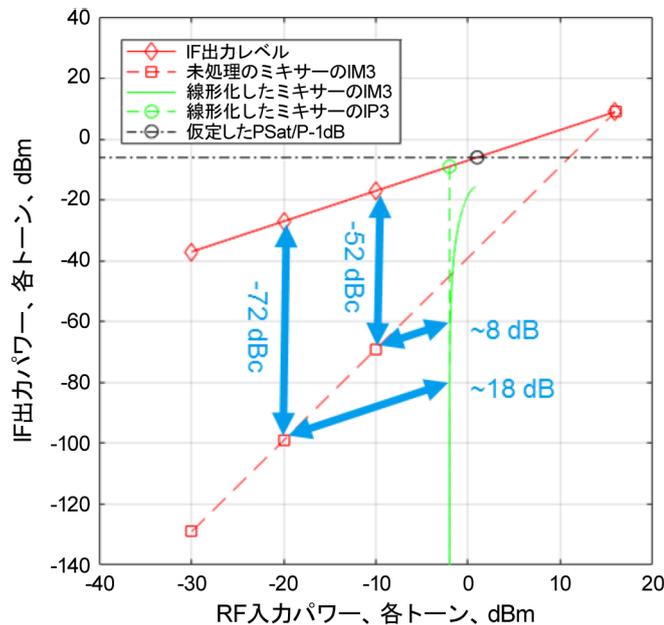


図4-3: 既製のミキサーと線形化したミキサー(IM3およびIP3)

ミキサーで可能な線形性が完全に達成されていると、IP3のレベルは P_{sat} より3 dB低いレベルになる
ことがわかります。業界の経験則に反して、ほとんどの線形ミキサーのIP3の値は実際には非常に低
くなります。

線形化したミキサーのIM3の曲線(緑)は、物理的な限界を表しています。より高いドライブレベルでの
既製のミキサーのIM3の測定値(赤の破線)は、線形化後の曲線に近づくが、交差しないことを示して
います。

4.4 まとめ

フロントエンドのコンポーネントは非線形で、さまざまな用途に使用されるミキサーも例外ではありません。非線形性を制御することにより、ミキサーの場合であっても、性能と実装を大幅に改善することができます。

ミキサーはレシーバーで多く使用されますが、混雑したスペクトラムで高次の変調方式が用いられるようになっているため、レシーバーの線形性の重要性はますます高くなっています。多くの場合、ミキサーは干渉信号を実際にフィルタリングする前の受信チェーンで使用されます。そのため、ダイナミックレンジを損なう強い干渉信号や複数の干渉信号からの保護はほとんど行われていません。

完全に線形なシステムや線形化されたシステムでは、信号統計 (PAPRを含む) は維持されます。実際には、信号の完全性がある程度劣化することは許容されます。最適なフロントエンドを開発するには、どの程度の劣化が許容されるかを理解することが重要です。一般に最適な性能は、フロントエンドがハードリミッタの応答に近づき、PAPRが最小化されたときに達成されます。

FOMとしてTOIを用いてフロントエンドを設計する手法では、安全ではあるが、小型で消費電力が少なく低コストの線形化したフロントエンドからは遠い設計になる可能性があります。

2トーンのCW信号を別の信号 (デジタル変調信号など) に置き替えた場合でも、この基本原理は変わりません。

- 「インターセプトポイント」に基づいたフロントエンドの設計では、各コンポーネントを十分に冗長な状態 (サイズが過大で十分に利用されていない状態) にして正味の性能を達成できるようにする必要があります。
- 「線形化した」フロントエンドを使用すると、各コンポーネントを限界近くで動作させることができるため、小型でコストが低く、消費電力の少ないソリューションを実現できます。

5 RF増幅器の線形化

線形化の効果を詳しく説明するために、[2]の文献に記載されているTWTAモデルを使用した例を作成しました。この特性は純粋な増幅器サブシステムから導かれますが、類似の(ドライブレベルの増加に伴う利得圧縮と位相歪み)特性は、ミキサーやアップコンバーターなどを含むより完全なフロントエンドを代表する特性でもあります。

この章では、線形化の利点を説明するために以下の手順を使用します。

1. 変調テスト信号(256-APSK)を作成する。
2. TWTA基準伝達特性(AM-AMおよびAM-PM)をインポートする。
3. シミュレーションにより、基準TWTAの線形化バージョンを作成する。
4. 線形化バージョンを使用してテスト信号を再生する。
5. 結果を比較する。

5.1 テスト信号

使用するテスト信号はDVB-S2Xの256-APSKです[2]。図5-1に、このコンスタレーションを示します。

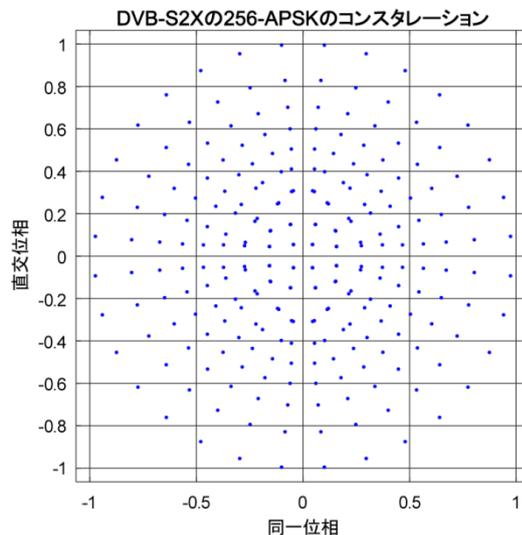


図5-1: DVB-S2Xの256-APSKのコンスタレーション表示

このテスト信号は、ロールオフ係数0.05を使用して作成されました。一般的には、これは非常に小さなロールオフ定数であり、振幅ドメインでは信号を拡散(ピーク対平均比を増加)させ、周波数ドメインでは占有帯域の急峻なロールオフを示します。

図5-2に、変調器出力のスペクトラムを示します。

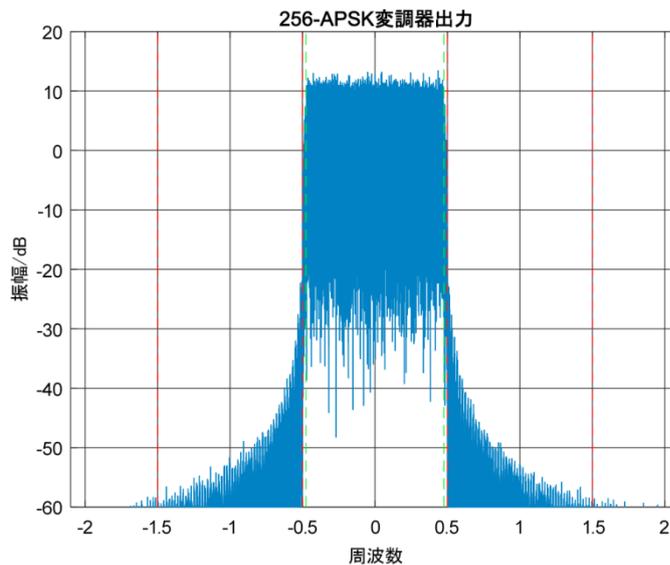


図5-2: ロールオフ係数0.05を使用したクリーンな256-APSK信号のスペクトラム

図5-3に、クリーンな波形の統計データとサンプル波形を示します。

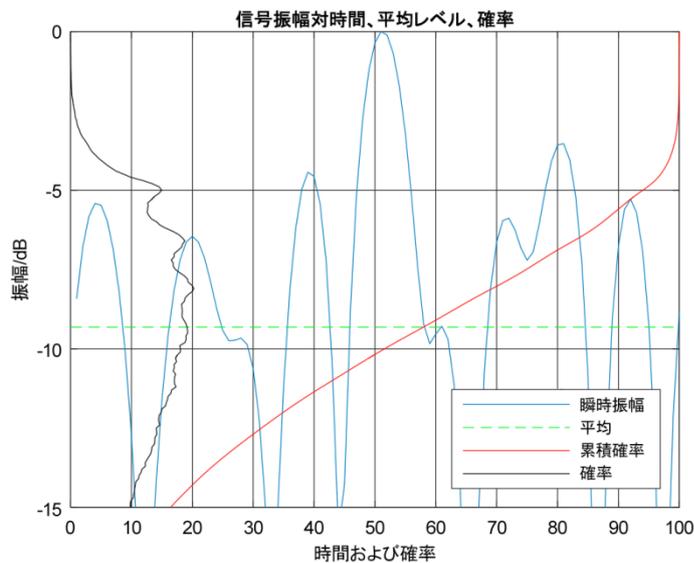


図5-3: 256-APSK信号のタイムドメイン振幅およびパルク信号統計データ

この信号は、変調器出力で9 dB～10 dBのPAPR(ピーク対平均電力比)を示しています。累積確率からは、信号が10 dBのパワーバックオフを上回っている時間が(わずか)50%で、5 dBのパワーバックオフを上回っている時間が5%であることがわかります。

この信号や信号統計データは、増幅器などのさまざまなフロントエンドコンポーネントを通過する際に変化します。

5.2 トランスミッターの性能要件

DVB-S2Xリファレンスでは、以下のように、衛星事業者ごとに異なる線形性の要件について大まかに説明されています。

- "...スペクトラムリグロースのスピルオーバーパワーを-30 dBで制限する"[2]

この-30 dBcのスペクトラムリグロース要件を使用して、他のユーザーへの悪影響を回避します。この値を保証するために、マージンを設定する必要があります。これは、それぞれの業界ソリューションに依存します。代表的なマージンは、5 dBc ACLRまたは-30 dBcが到達される出力レベルからの1 dBパワーバックオフなどです。

本書で示すように、法的規制要件に適合することが、通信リンク全体での十分な線形性につながるとは限りません。

本書では、以下のスペクトラムリグロースの定義を使用します。ルート・ナイキスト・フィルターのロールオフを β とします。

- チャンネル間の周波数間隔は1
- チャンネルパワーの計算に使用する帯域幅は $1/(1+\beta)$ より小さい
- スペクトラムリグロースとは、隣接リグロースチャンネルで計算された最大レベルに対する、意図するチャンネルパワーの比です。

図5-2は、占有された隣接チャンネルを示しています。

図5-4では、ハードリミッタを介して256-APSK信号を再生し、異なる複数のドライブレベルでその動作をモニターしました。復調コンスタレーション表示は、理想的なレシーバーを使用して捕捉したものです。

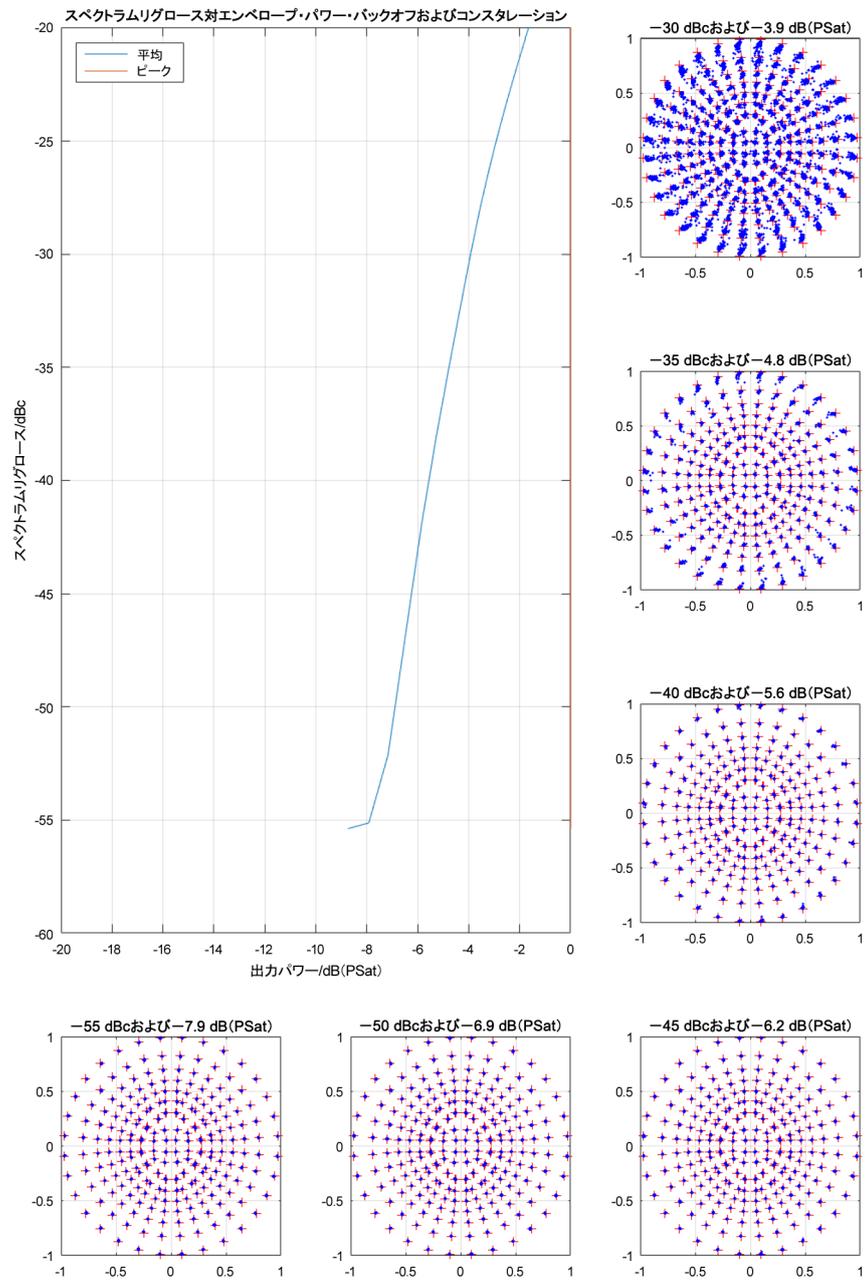


図5-4: ハードリミッタを介した256-APSKのドライブレベルの掃引

約-55 dBcから-20 dBcでの変調器のノイズフロアを元に、平均エンベロープレベルとピーク・エンベロープ・レベルをプロットしています。ハードリミッタは常に飽和するため、ピーク・エンベロープ・レベルは0 dBで一定です。

青で示す平均パワー曲線は、重要な理論上の限界を表します。

- これは、特定のスペクトラムリグロスをサポートするのに必要な最小PAPRを示しています。
 - 最小PAPRは、このプロットの場合、一定のスペクトラムリグロスでの平均曲線とピーク曲線のX軸上の差です。

- -30 dBcレベルには、 4 dBの最小PAPRが必要です。
 - ノーマライズした 0 dBの飽和レベルを持つデバイスの場合、サポートできるデバイスの最大平均出力レベルは -4 dBです。
 - 利得圧縮が最大 5 dBまたは 6 dBのフロントエンドにより、 -30 dBcレベルをサポートできる可能性があります。

スペクトラムリグロースは、平均化されたスカラー量です。これは、線形性の大まかな指標です。歪みの特徴(AM-AMおよびAM-PMの寄与など)を表すものではありません。また、搬送波上の帯域内にどの程度の歪みがあるかを理解することも困難です。

スペクトラムリグロースの 5 dB間隔で示された復調コンスタレーションの方が情報として有益です。コンスタレーションポイントが中心に向かって広がる傾向がある場合はAM-AMを示し、原点を中心に放射状に広がる場合はAM-PMを示します。復調ポイントで不鮮明さや拡散が生じている場合は、復調器の誤った判断により復調された信号のビット・エラー・レートが大きくなります。

5.3 基準増幅器フロントエンド

本書で使用するフロントエンドの基準PAモデルはTWTAです。TWTAは1933年に発明され、長年にわたりミリ波アプリケーションで幅広く使用されています。

比較的高い歪みレベルが示されていますが、出発点として有効であり、[2]の文献からのパブリック・ドメイン・モデルとして提供されています。

図5-5に、引用したTWTAのAM-AMおよびAM-PM曲線を示します。

基準TWTAには、ハードリミッタとは異なり、AM-PMIによる歪みが含まれています。また、AM-AMは、(飽和レベルに対して) 0 dBを下回るドライブレベルで、非ゼロの値になります。そのため、非線形歪みを生成するために、ピーク・エンベロープ・レベルが 0 dBに到達する必要がなくなります。

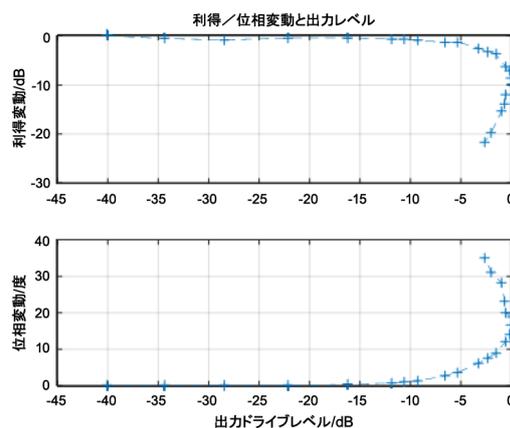


図5-5: [2]の文献に記載されたTWTAのAM-AMおよびAM-PM特性

また、このモデルには以下の特性があります。

- 分散なし
 - 動作無線周波数やエンベロープ周波数に関係なく同じ応答を得ると仮定
- ノイズなし
 - チャンネルモデルによってノイズが信号に追加されない
- メモリなし
 - 伝達特性が現在の入力振幅のみの関数
 - 過去の状態の関数ではない

このモデルはベストケースを表しているため、これらの制限は重要です。分散、ノイズ、メモリ効果を追加すると、性能は低下するだけです。

ここでは線形化の検討を行うために、歪みモデルにエネルギー効率に関する説明を補足します。A級特性を仮定します。A級無線機には、以下の関連する2つの特性があります。

- ドライブレベルに関係なくエネルギー消費量が一定
- 理論上の最大効率が50 % (出力レベルが最大のとき)

消費電力が一定であることは、効率や電力損失の計算を容易に行うことができることを意味します。

基本的なフィードフォワード方式は、通常、(一般的に非常に小さな)帯域外歪みとメモリ効果を低減するのに効果的です。アプリケーションによっては、ノイズ上の利点も得られ、増幅器で追加されたノイズが除去され、他のソースからの(理論上は小さな)ノイズが追加されます。

ポスト補正タイプの手法であるため、出力でパワー損失が発生します。この例で示すように、これは全体の性能が低下することを意味するものではありません。

基本的なフィードフォワード方式の性能について説明するために、[図5-7](#)に従ってハーモニック・バランス・シミュレーションを実行します。

ここでは、基準TWTAをハーフサイズの2つの同じTWTAに分割します。他のコンポーネントはすべてパッシブなので、線形であると仮定します。

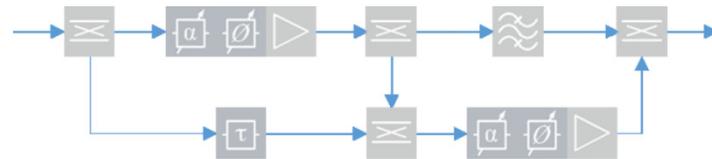


図5-7: 基準TWTAを線形化するためのフィードフォワード回路図の例

この理論的な検討での他の回路コンポーネントに関する注記を以下に示します。

- 2番目のループの遅延ラインで1 dBの損失を仮定し、最後の加算カップラーで3 dBの損失を仮定します。

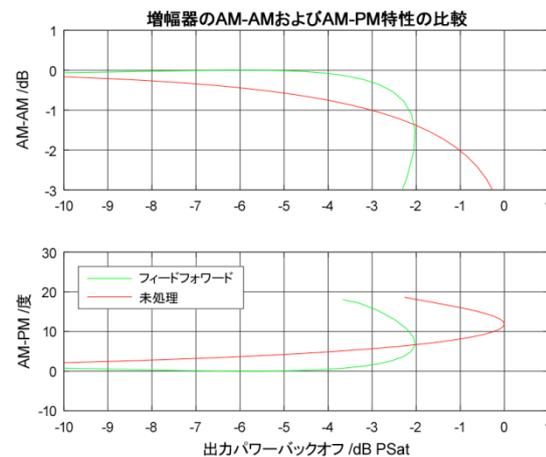


図5-8: フィードフォワードと基準TWTAの特性の比較

[図5-8](#)のAM-AMおよびAM-PM曲線を詳しく見ると、以下がわかります。

- 飽和出力レベルの大幅な低下(約2 dB)が発生しています。これは主に、2番目のループの遅延ラインとカップラーの損失によるものです。
- その代わりに、線形性と線形出力レベルが改善しています。
 - AM-xMの特性は、2 dBの出力レベル・バックオフでクロスオーバーします。

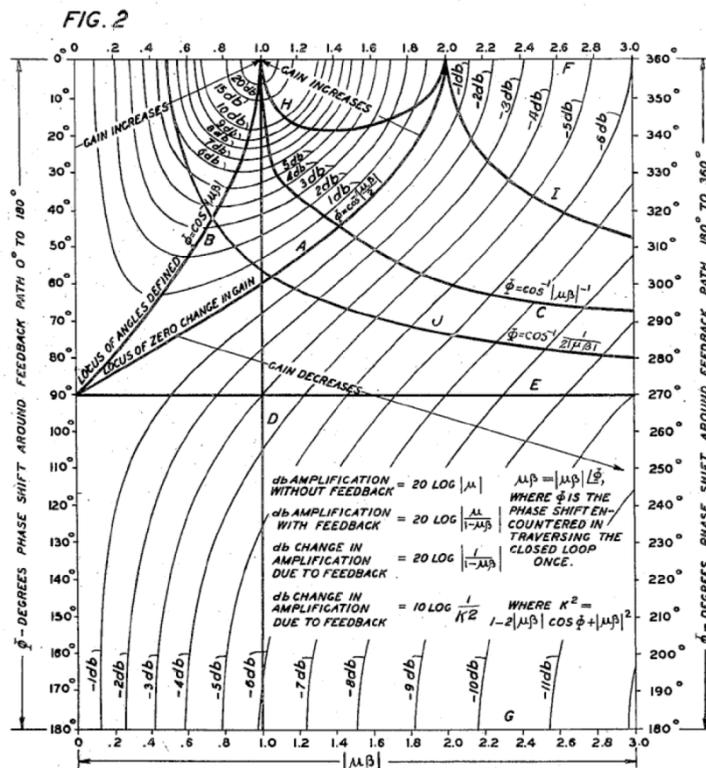
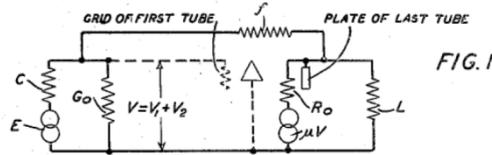
パッシブコンポーネントのみを使用して、同じようなサイズの2つの非線形性が同じ増幅器コンポーネントを結合しました。これに伴い、大きな損失が生じました。ただし、これにより線形性は改善され、個別のコンポーネントよりも優れたものになっています。

フィードフォワードの設計には、さらに多くの自由度が存在します。これは特に、2つの増幅器の相対的なサイズと結合カップラーに対して当てはまります。この例は、多くのソリューションの内の1つの例に過ぎません。

5.5 Blackのフィードバック

ここでは、基準TWTAを負のフィードバックを用いて線形化します。負のフィードバック増幅器の特許はH.S.Blackに与えられました[5]。

Dec. 21, 1937. H. S. BLACK 2,102,671
 WAVE TRANSLATION SYSTEM
 Filed April 22, 1932 35 Sheets--Sheet 1



$\mu\beta$, WHICH IS INDICATIVE OF THE AMOUNT OF FEEDBACK, IS A COMPLEX QUANTITY WHICH MAY BE VIEWED AS REPRESENTING THE RATIO BY WHICH THE AMPLIFIER AND FEEDBACK CIRCUIT (OR IN GENERAL μ AND β) MODIFY A VOLTAGE IN A SINGLE TRIP AROUND THE CLOSED PATH.

INVENTOR
 H. S. BLACK
 BY *H. A. Burgess*
 ATTORNEY

図5-9: Blackのフィードバック特許公報のフロントページ

順方向システムの出力には、目的の信号と歪み成分の両方が含まれます。歪みには、予測可能なものとそうでないもの（ノイズなど）があります。この出力信号のサンプルを、入力にフィードバックし、その後の入力信号から除去します。

この新しい入力は、新しい入力信号と共にフィードバックされた以前の信号のサンプルから構成され、ある程度の歪みとある程度のノイズが含まれています。

厳密には、順方向の増幅経路では、新しい信号によって歪みが生じます。この新しく生じる歪みの一部は、フィードバックされた反転した歪みによって相殺されます。フィードバックループを1周すると以下の結果が得られます。

- 歪みが低減する（ただし、完全に相殺される訳ではない）
- ノイズが増加する：
 - 出力から入力にフィードバックされるノイズはランダムで予測できません。
 - このノイズは、増幅器を周回する経路により増幅され、追加されます。
- 全体の利得が低下する
 - 増幅器の利得そのものは変わりませんが、フィードバック信号によって増幅器入力で信号レベルが低下します。

この過渡的なプロセスは無限に繰り返されますが、徐々に小さくなります。ループを次々に繰り返していくとループ減衰が生じ、以前の入力からの寄与は漸近していきます。この結果、フィードバックシステムの利得、歪み、ノイズは有限値に収束します。

フィードバックループの遅延が大きいほど、サンプリングされた歪みと実際の歪みの差が大きくなります。このことから、特に帯域幅が広くなると、補正の品質が低下します。

この例では、増幅器に対するダイレクトRFフィードバックを使用していますが、他の方式のフィードバックを使用することも可能で、周波数変換部を含めたフロントエンドのより大きな部分を線形化することもできます。その他の方式のフィードバックとして、カルテシアンフィードバック[6]やポーラフィードバック[7]があります。

フィードバック手法は、帯域内（狭帯域）の歪みを補正し、実用性を向上させる（変動を低減する）のに特に効果的です。これらの利点を得るには、利得や安定性の低下、ノイズの増加といった代償が必要になります。

本書では、基準TWTAの周辺にダイレクトRFフィードバックループを設けます。図5-10を参照してください。

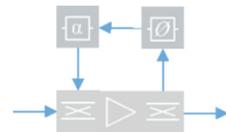


図5-10: 基準TWTAを線形化するためのダイレクトRFフィードバック回路図の例

このケースでは、ダイレクトフィードバック信号をサンプリングし、方向性結合器を使用して再度注入します。

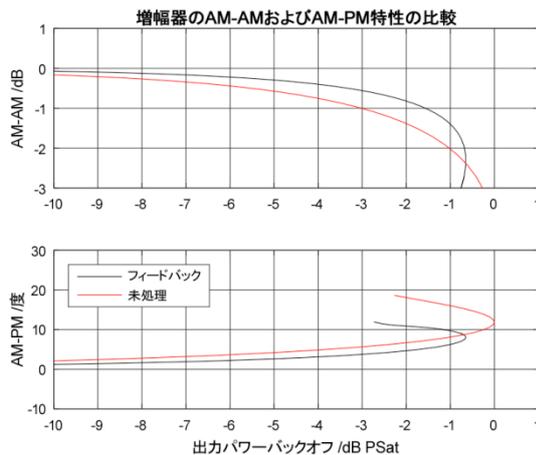


図5-11: フィードバックと基準TWTAの特性の比較

出力サンプリングカップラーにより、飽和出力レベルの低下が生じます。これは、図5-11のX軸の値に現れています。ただし、広いダイナミックレンジで歪み($y=0$ からのずれ)が低減しています。

使用するフィードバックの量は設計変数です。フィードバックの量が大きいほど、線形性は向上しますが、ノイズ、利得、安定性が犠牲になります。

5.6 McMillanのハイブリッド

これは、フィードバック増幅器とフィードフォワード増幅器を1つのハイブリッドシステムに統合したものです。

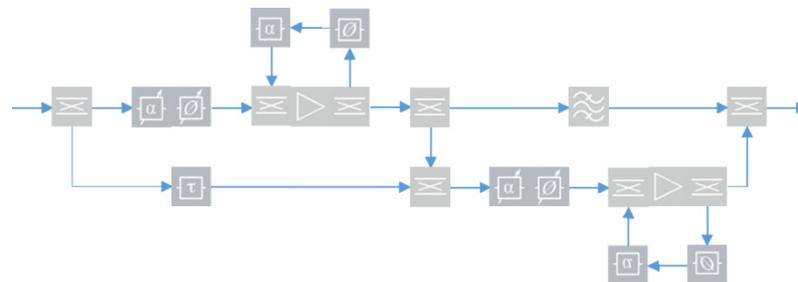


図5-12: フィードバックとフィードフォワードを併用した線形化の実装

フィードバックとフィードフォワードが相補的に機能する可能性は、[1]の文献の中で利用されました。以下は、この特許公報からの引用です。

「最初の増幅器はメイン信号の増幅器とみなすことができ、2番目の増幅器は、入力と出力が主としてメイン増幅器の出力から派生した歪み成分および他のスプリアス成分から成る、補助または2次増幅器とみなすことができる。2次増幅器を経由して変換されたスプリアス成分は、メイン増幅器の出力に現れるスプリアス成分と近似的に相殺する関係で組み合わせられるため、負荷に伝達される増幅信号は当該成分の影響が比較的少ないものになる。2次増幅器そのものは負荷が軽いシステムに現れる当該スプリアス成分の残余を増加させることはほとんどなく、発生する当該成分はフィードバックにより大幅に低減される。」

May 29, 1956

B. McMILLAN

2,748,201

MULTIPLE-FEEDBACK SYSTEMS

Filed Sept. 21, 1951

7 Sheets-Sheet 1

FIG. 1

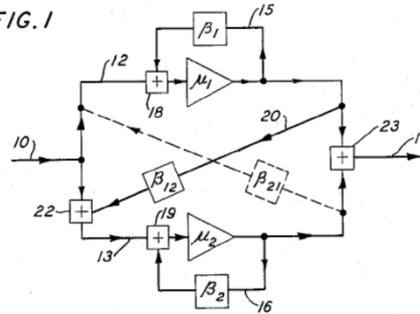


FIG. 2

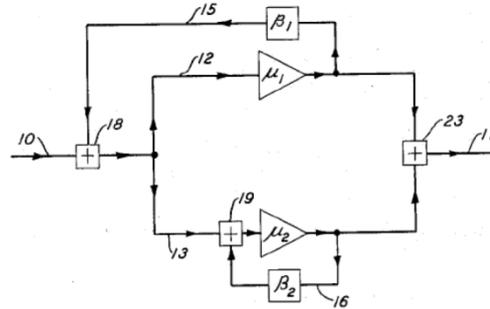
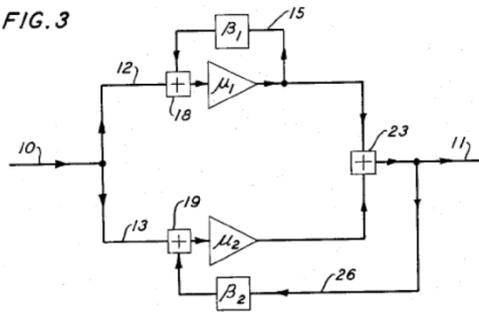


FIG. 3



INVENTOR
B. Mc MILLAN
BY *N. S. Ewing*
ATTORNEY

図5-13: McMillanのハイブリッド型フィードフォワード/フィードバック特許公報のフロントページ

シミュレーション環境で、前述のフィードフォワード実験の2つの基準TWTAを2つのフィードバックTWTAに置き替えます。フィードフォワードループの利得と位相を調整して、これらのTWTAの伝達特性の変化を最適化します。

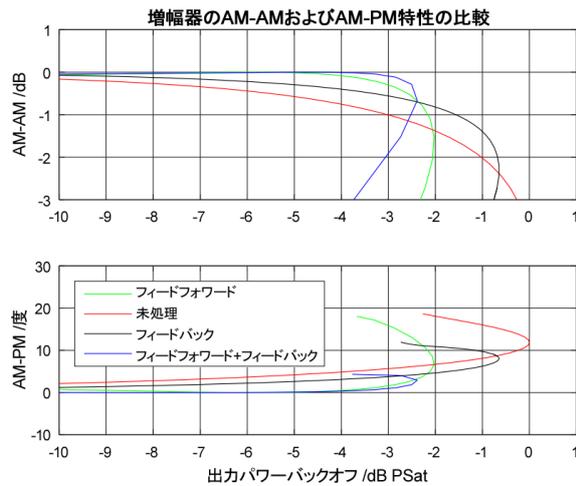


図5-14: フィードバック、フィードフォワード、基準、ハイブリッドTWTAの特性比較

フィードバックとフィードフォワードをハイブリッド型に組み合わせることにより、両方の特性を併せ持つ性能改善が得られます(図5-14)。このハイブリッド方式では損失はさらに大きくなりますが、フィードフォワードまたはフィードバックだけの場合よりも優れた線形性が得られます。

AM-AMおよびAM-PM($y=0$ からのずれ)のレベルは小さくなり、絶対出力レベル(X軸の値)が大きくなっても小さいままです。一方で、可能な最大(飽和)出力レベルはさらに低下しています。

5.7 変調信号による性能

ここでは、線形化バージョンのそれぞれを、これまでのセクションのようにCW信号ではなく、変調信号(DVB-S2X規格の256-APSK)で励振します。

最初の基準TWTAのケースはパワー掃引です。図5-15は、ドライブレベルの増加に伴うACLRをプロットしたものです。

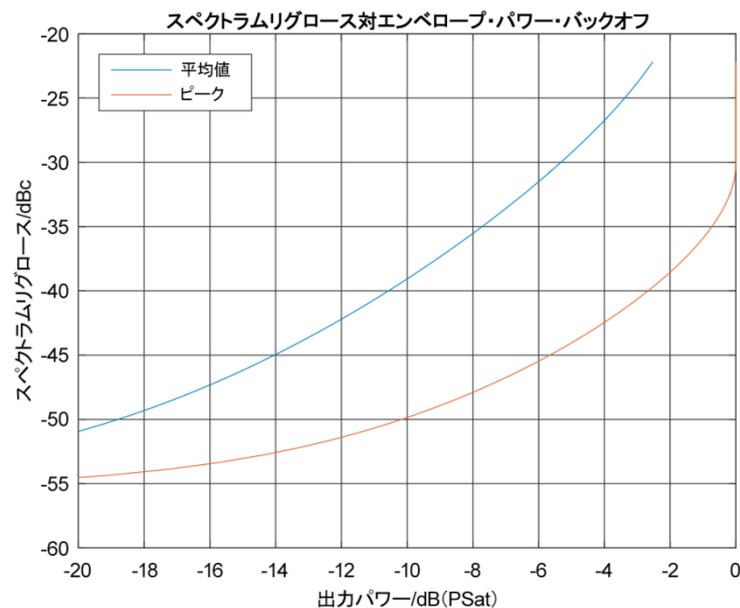


図5-15: 線形化を行わない場合の基準TWTAでのスペクトラムリグロースと出力レベル(エンベロープの平均振幅とピーク振幅を示す)

−35 dBcの目標で、出力レベル(代表値)は飽和出力レベルから7.7 dBのバックオフです。これは、飽和出力レベルの17 %の平均パワーに相当します。すなわち、1 kWのTWTAの場合であれば、平均出力パワーを170 Wまでに制限する必要があります。

ACLRが−30 dBcに達するまで、エンベロープのピーク出力レベルが飽和し、TWTAがフルに利用されることはありません。したがって、線形化を行わずに−35 dBcで動作させると、TWTAはリソースをすべて使用しないことになります。

規制要件に適合しているため、リンクの品質に注目します。−35 dBcのTWTA出力信号は、理想的なレシーバーを使用して復調できます。

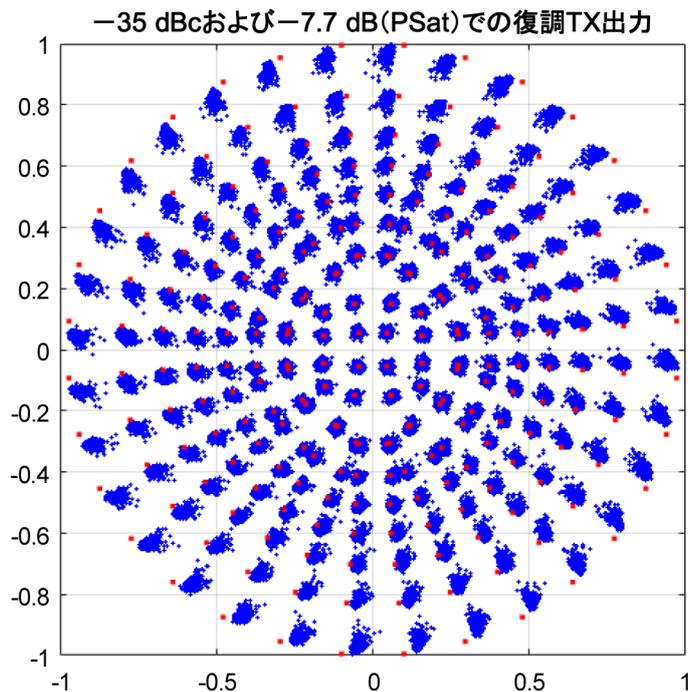


図5-16: −35 dBcのスペクトラムリグロースで動作する基準TWTAの復調された256-APSK

図5-16では、シンボルの大きなバラツキを主観的に観察することができます。特に内側のコンスタレーションポイント間が不鮮明です。実際には、リンクの信号の品質は、リピーターやレシーバーでの信号劣化によってさらに低下します。

他の線形性のレベル(スペクトラムリグロースの5 dBcごと)での信号の復調は、図5-17の傾向を示します。

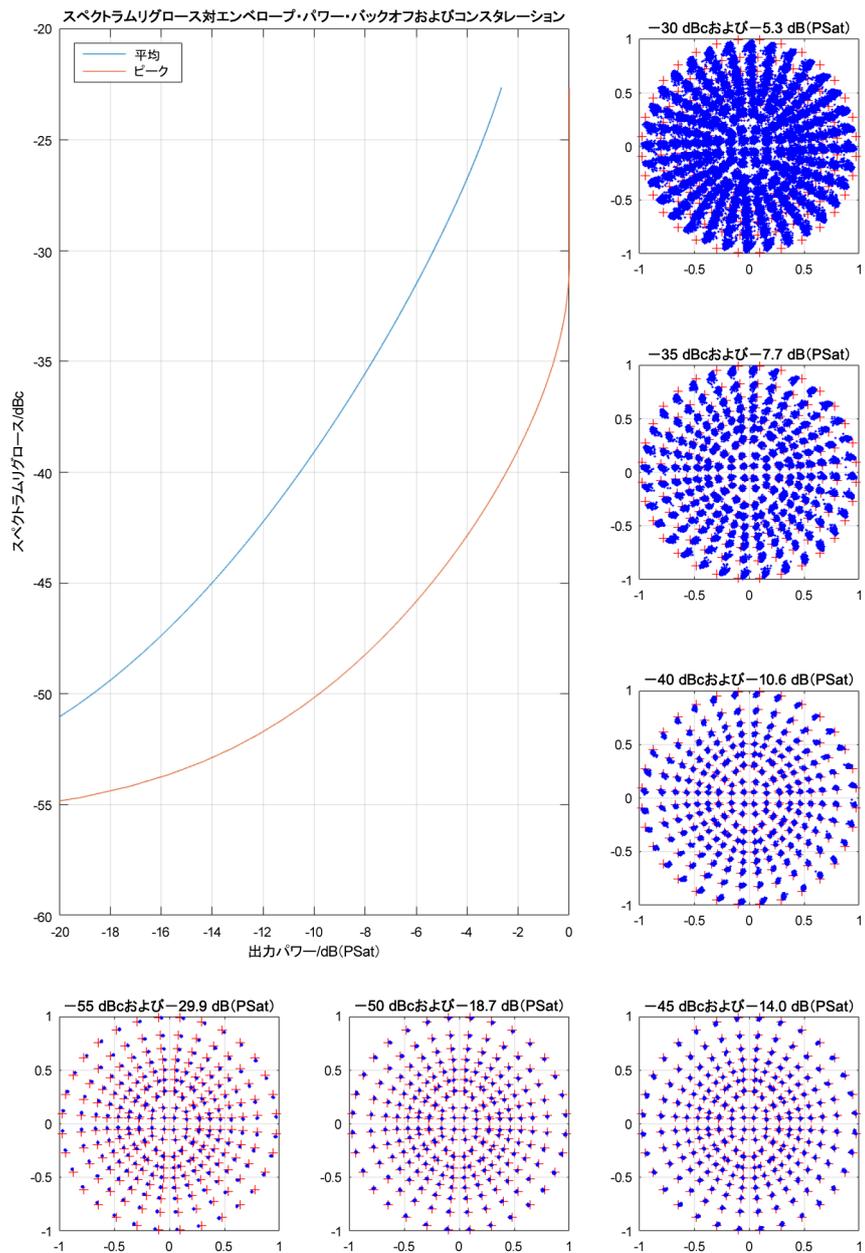


図5-17: ドライブレベルの掃引による、基準TWTAの平均およびピーク・エンベロープ・レベルと、スペクトラムリグロースの5 dBごとの復調コンスタレーション

リピーターおよびレーザーの影響を含めて、より包括的な検討を行うと、 -40 dBcまたは -45 dBcより優れたACLRレベルを使用する必要があることが示唆される可能性があります。これは、 1 kWのTWTAに対して 90 Wまたはわずかに 40 Wの出力に相当します。

その場合、TWTAフロントエンドの状況は以下ようになります。

- このより厳密な線形性のレベルでの稼働を余儀なくされますが、ピーク・エンベロープ・レベルでのTWTAリソースの利用率は $30\sim 60\%$ にとどまります。
- その上、 1 kWのTWTAに対して 2 kWの電源が必要になります。

フィードバックバージョンの場合は、状況は図5-18に示すように改善します。

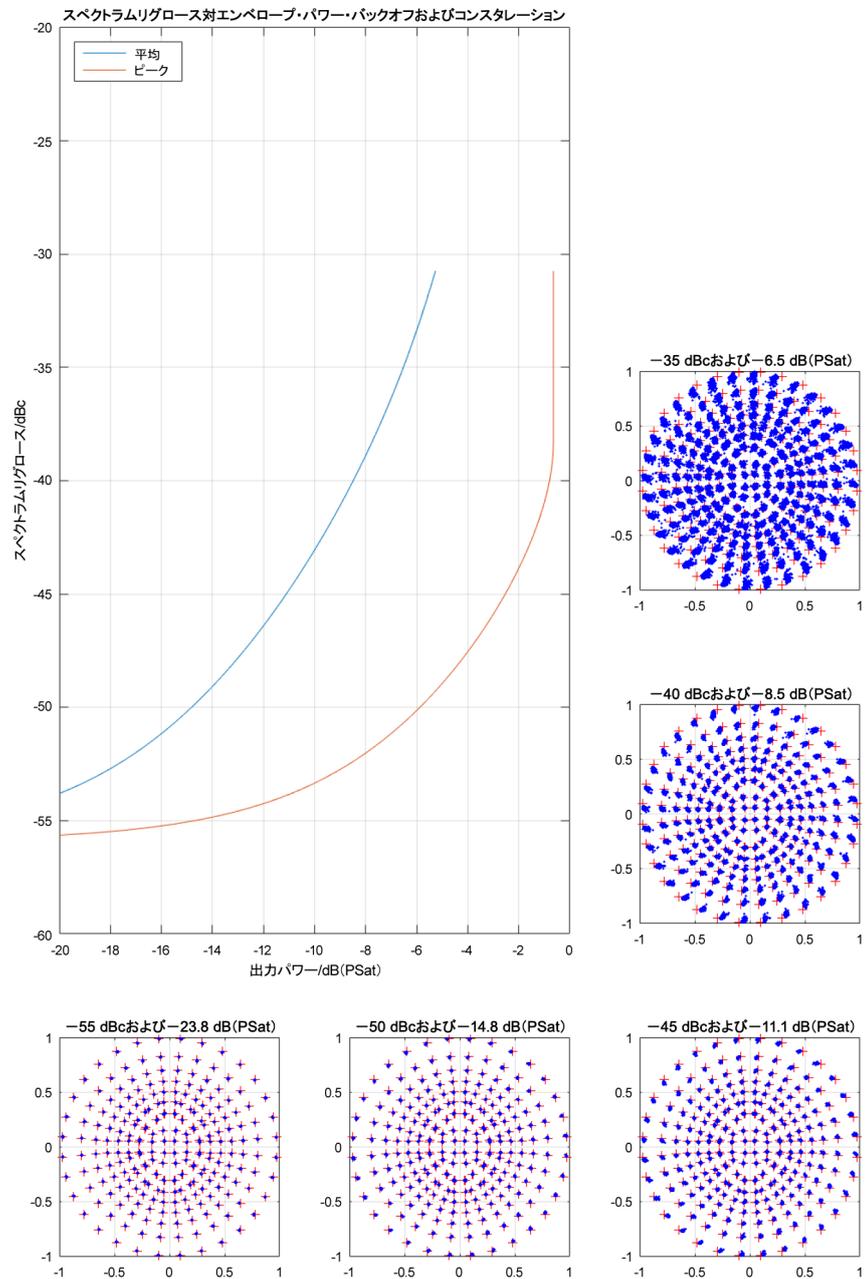


図5-18: ドライブレベルの掃引による、フィードバックTWTAの平均およびピーク・エンベロープ・レベルと、スペクトラムリグロスの5 dBごとの復調コンスタレーション

このトランスミッターの線形出力は、-40 dBcまたは45 dBcのACLRの目標に対して、対応する出力レベルがそれぞれ141 Wおよび76 Wの範囲まで増加するようになっています。

この利用率の改善では、飽和出力パワーが犠牲になっている(1 kWから861 Wに14 %低下している)ことに注意する必要があります。このようにPsatが低下しているにもかかわらず、ピーク・エンベロープ・パワー(利用率)が実際に改善されています。

他の線形化のケースを評価する前に、以下が達成されたことをまとめておく必要があります。

- 平均出力パワーの向上
- ピーク出力パワーレベルの向上
- Psatの低下

線形化を行うことにより、飽和出力パワーレベルと使用可能（線形）出力レベルの間に比例関係が存在しないことが示されました。

直感に反しますが、おそらく出力に損失が追加されてもシステム出力は必ずしも低下しません。

フィードフォワードによる線形化ソリューションでは、フィードバックと比較してやや異なる改善が得られます。ここでの例では、1 kWの1つのTWTAを500 Wの2つのサブシステムで置き替えています。

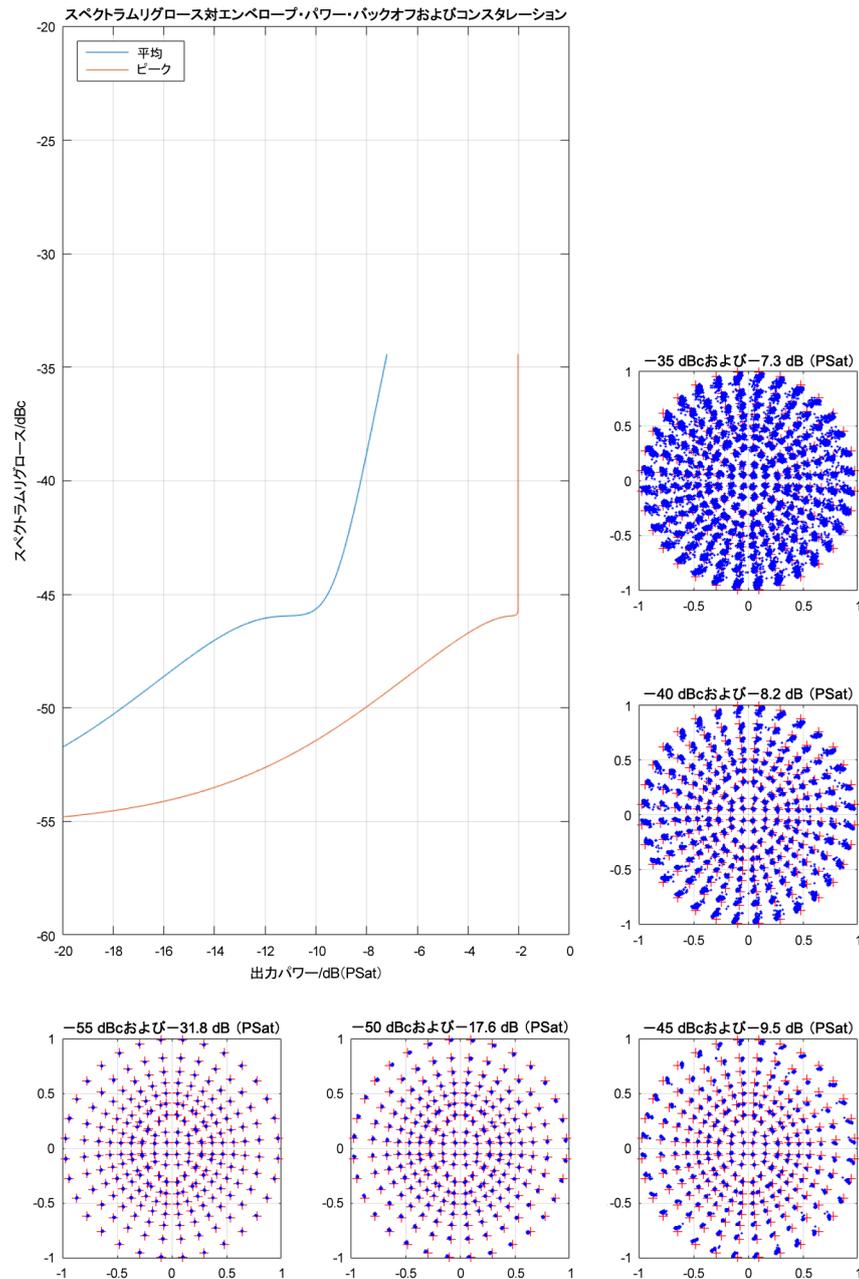


図5-19: ドライブレベルの掃引による、フィードフォワードTWTAの平均およびピーク・エンベロープ・レベルと、スペクトラムリグロスの5 dBごとの復調コンスタレーション

このように、 -45 dBcおよび -40 dBcに関連する出力パワーレベルは、基準ケースと比較して大幅に向上しています。図5-19に示すように、それぞれ110 Wおよび148 Wになります。

飽和出力パワーは、1 kWから628 Wに低下しました。

フィードフォワードタイプの線形化では、以下のことが同時に発生しました。

- 必要なPsatが2 dB低下

- 使用可能な出力レベルが少なくとも同じ量だけ増加

最後は、McMillanのハイブリッドバージョンです。図5-20には、フィードバックとフィードフォワードを組み合わせた場合の出力損失が示されています。また、飽和出力パワーが1 kWから578 Wに減少していることがわかります。その代わりに、-50 dBcのスペクトラムリグロースを107 Wでサポートすることができます。

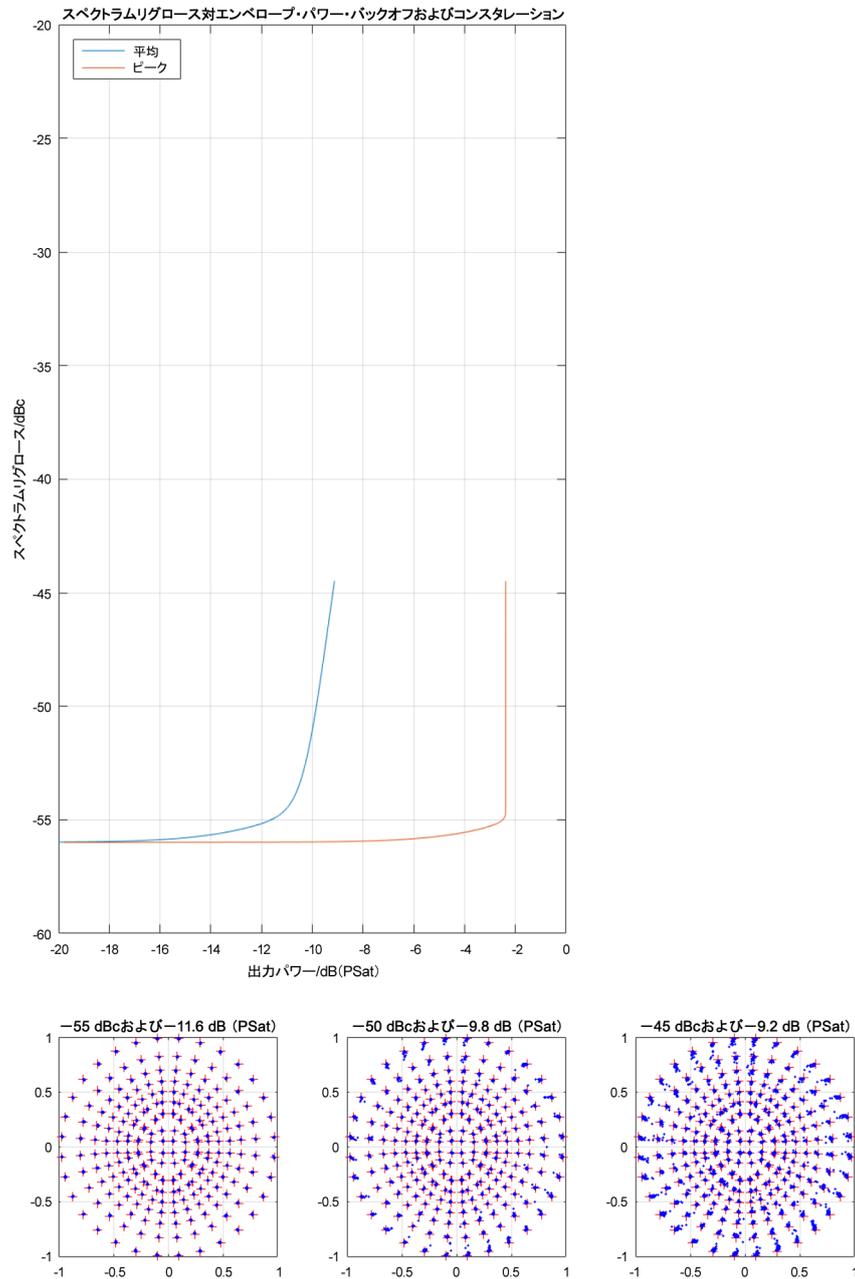


図5-20: ドライブレベルの掃引による、ハイブリッド型フィードバック/フィードフォワードTWTAの平均およびピーク・エンベロープ・レベルと、スペクトラムリグロースの5 dBごとの復調コンスタレーション

表5-1に、各バージョンの性能をまとめます。

TWTA線形化バージョンの256-APSK性能					
パラメータ	基準	フィードバック	フィードフォワード	ハイブリッド	ハードリミッタ
飽和パワー(W) (合計1 kWのTWTAを使用)	1000	861	628	578	1000
以下での使用可能な出力パワー(W) :					
-40 dBc	90	141	148	141	278
-45 dBc	40	76	110	124	237
-50 dBc	13	31	18	107	203

表5-1: 256-APSK励振下での基準、線形化、ハードリミッタTWTAの性能のまとめ

理論上の最大効率が50 %の1 kWのTWTA(A級動作)の動作には2000 Wのパワーが必要です。

この近似を使用すると、基準TWTAの特定の出力パワーレベルと線形性の制約を用いて代替システムの影響を比較することができます。これらを、表5-2に示します。

256-APSKに対するTWTAの代替実装					
パラメータ	基準	フィードバック	フィードフォワード	ハイブリッド	ハードリミッタ
-40 dBcおよび90 Wに スケールリング					
必要なTWTAサイズ	1000	638	608	638	323
無駄になるパワー	1910	1186	1126	1186	556
-45 dBcおよび40 Wに スケールリング					
必要なTWTAサイズ	1000	526	364	323	169
無駄になるパワー	1960	1013	687	605	298
-50 dBcおよび13 Wに スケールリング					
必要なTWTAサイズ	1000	419	722	121	64
無駄になるパワー	1987	826	1431	230	115

表5-2: 基準TWTAの性能に合わせて最適化および線形化された代替システムの例

線形化された無線機チェーンの信号に対する影響を繰り返し説明するために、-45 dBc/40 Wのケースについて検討します。図5-21に、フィードフォワード出力とクリーンな変調器出力を並べて示します。

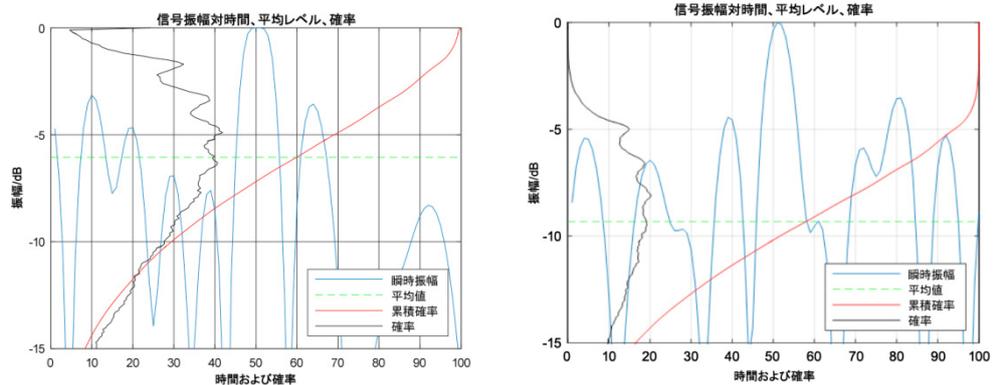


図5-21: -45 dBc/40 W信号の振幅と主要統計データ: フィードフォワード実装を使用した場合(左)、クリーンな変調器出力を使用した場合(右)

- フィードフォワードの場合、確率特性が相対振幅の上方に押し上げられています。このフィードフォワードでは、瞬時エンベロープ振幅のレベルが5 dBを下回っている時間が70 %であるのに対し、クリーンな変調器出力の場合は95 %です。
- その結果、PAPRは9 dB超(変調器出力)から約6 dB(TWTA出力)に低下しています。
- 0 dBの飽和レベルに近づくエンベロープ振幅は、クリーンな変調のケースと比較して、フィードフォワードのケースでは大きく圧縮またはクリップされています。
 - この圧縮は、エンベロープ確率密度関数の増大(スパイク)として現れます。
 - この圧縮は、エンベロープ振幅の変化率を強制的に増加させ、信号を高速化し、スペクトラムリグロスを発生させています。

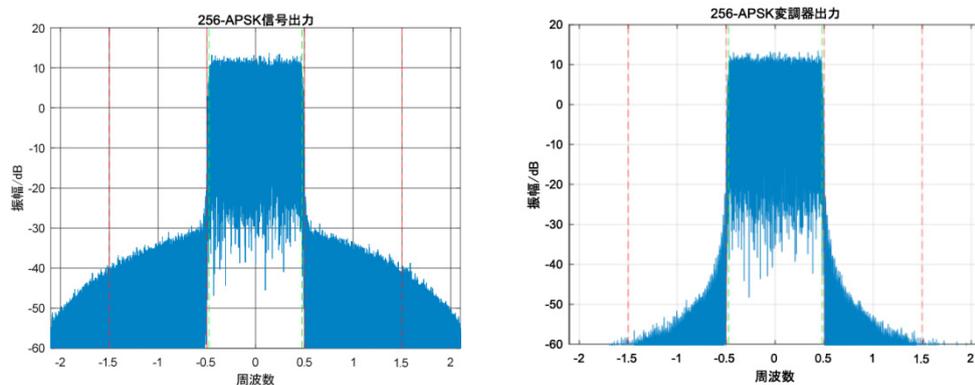


図5-22: -45 dBcで動作するフィードフォワードTWTA(左)と変調器出力(右)のスペクトラム出力

図5-22に、フィードフォワードと変調器出力の -45 dBc/40 WでのTWTAの出カスペクトラムを示します。帯域外周波数の振幅(システムの他のユーザーに影響を与える歪み)が明らかに増加していることがわかります。このスペクトラム表示では、帯域内の歪みレベルの増加は簡単には確認できません。(ユーザーに影響を与える)帯域内の歪みは、コンスタレーション表示などの方が簡単に確認できます。

5.8 まとめ

以下に、一般化した所見を示します。

- 線形化手法の分類を行いました。
 - 特定のアプリケーションに対する各手法の一般的な長所を理解することは、コストと性能のバランスが最適な手法を決定するのに役立ちます。
- 線形化はほとんどの送信、中継、受信機器に関連しています。
 - それぞれの機器に、障害に対する固有の制約、課題、機会があります。
 - 通信リンクの場所(送信、中継、受信)ごとに、異なるリソースに対する異なるアクセスがあります。
- 線形化を行うことで性能を引き出し、フロントエンドに価値を追加することができます。
 - フロントエンドのアプリケーションや実装は非常に多様であるため、確実な解決法はありません。
 - 例えば、マイクロ波バックホール用レシーバー、LTEインフラ用リピーター、衛星通信用BUC、光ファイバー変調器、精密テスト/測定に適したフロントエンドソリューションが同じものになる可能性は低いです。
 - 完全な線形化(クリッピング回避に対応したハードリミッタ)は、多くのケースで最適とは言えません。PAPRは、歪みとの引き換えになります。

本書で示したケースに直接関連して、以下の結論が導かれます。これらは、他のケースにも当てはまる場合があります。

- 簡素化したTWTA/256-APSKシナリオで、同じTWTAパワーの4種類の実装バージョンがまったく異なる性能を持つことが示されました。
 - パッシブコンポーネントのみを追加してソリューションを差別化しています。
 - Blackのフィードフォワードおよびその派生方式の場合は、信号が複数の増幅器に分解されます。その結果得られる特性は、個々の増幅器だけの場合よりも大幅に線形性が良くなります。
- エネルギー消費量への影響が大きいことが示されました。
 - 本書で示したシナリオでは、線形化を使用した場合に所定の出力レベルと信号忠実度に対して発生する熱が27 %から90 %少なくなります。
- 機器コストの大幅な削減も可能です。
 - 1 kWの基準TWTAを使用して構築する40 W/−45 dBcソリューションの高額な部品表(BOM)をフィードフォワードバージョンのソリューション例と比較すると、表5-3のようになります。

-45 dBc/40 W 256-APSKの部品表(BOM): 基準とフィードフォワードの比較		
部品	基準	フィードフォワード
TWTA	1×1000 W	2×190 W
電源サイズ	2000 W	780 W
冷却能力	1960 W	740 W
無線機コンポーネント	追加なし	パッシブ(カップラー、フィルターなどを含む)
管理および制御	追加なし	適応線形化

表5-3: 40 W/-45 dBc 256-APSK TWTAソリューションの主要コンポーネント部品表(BOM)の例

- このケースでは、ほぼ完全に線形化されたシステムは経済的ではないと考えられます。PAPRのある程度低下を許容することにより、大きな価値を得ることができます。

6 マルチパスTxフロントエンド

高性能トランスミッターで使用されるフロントエンドでは、マルチチャネルを利用して線形性やエネルギー効率を向上させることができます。使用される個々の機能ブロックに比べて、トランスミッター全体の性能を大幅に向上させることができます。

これらのマルチパス方式の特徴は、効率的に生成されたマルチパス成分から予測可能なポスト補正を使用して、出力で目的の信号を合成することです。残留歪みやこれらの方式で生じる歪みは、追加の線形化方式を使用してさらに低減することができます。

一般的にこのマルチパスアーキテクチャーは、従来のシングルパスの疑似線形化方式の場合よりも、高いエネルギー効率を実現できる可能性があります。

[8]の文献では、マルチパストランスミッターの範囲が以下の3つのカテゴリーにまとめられています。

- ドハティPA[9]
 - 2つ以上のRF PAのソース電流をドハティコンバイナーに接続します。
 - コンバイナー／負荷は、これらの電流を(独立していると考えられる場合に)著しく非線形なパワーに変換します。
 - これらの2つ(以上)の著しく非線形なパワー寄与分の総和は線形になります。

- アウトフェーシング/Chireix[10]
 - 2つ(以上)のソースが同じ高い出力レベルで動作します。
 - それぞれの寄与分の位相差は、目的の出力レベル(同相の寄与分は強め合う結合となり、逆位相の寄与分はゼロ出力になります)に従って変化します。
 - Chireixは出力の設計が異なるだけで、より高い周波数ではChireixの方が好まれる傾向があります。アウトフェーシング手法とChireix手法の両方の取り扱いは、[11]の文献に示されています。

- エンベロープトラッキング
 - 疑似線形増幅器により、補助電源をエンベロープソースで変調します。
 - これにより得られる線形性は、RF PA固有の線形性と変調した電源に対する応答を組み合わせた複雑なものになります。

他のマルチパスに関する研究は、これらのカテゴリー間の明確な関係性がいまいで、[12]、[13]、[14]の各文献で解説しているとおりハイブリッド型の方式になっています。

他の純粋な方式やハイブリッド型の方式の例を追加して[8]の文献に記述されている分類を拡張し、[図6-1](#)を作成しました。

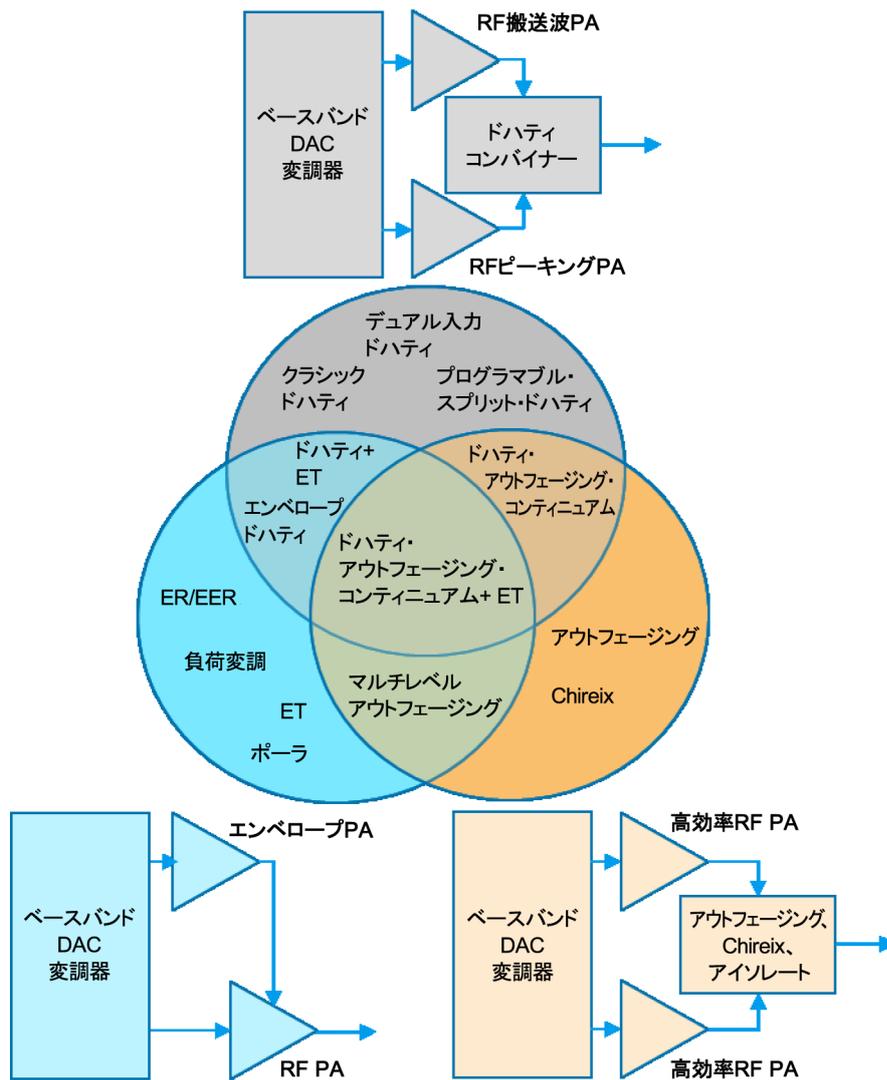


図6-1: [8]の文献を元にマルチ入力TxFEアーキテクチャーの例を拡張したもの

マルチパスアーキテクチャーにより、フロントエンドの線形性の向上と高効率化を同時に実現する幅広い実装オプションの利用が可能になります。

7 参考資料

- [1] McMillan, Brockway. "Multiple-feedback systems." U.S. Patent No. 2,748,201. 29 May 1956.
- [2] Draft, ETSI "TR 102 376 – 2 V1. 1.1 (2014-xx)." User guidelines for the second generation system for Broadcasting, Interactive Services News Gathering and other broadband satellite applications.
- [3] Mini-Circuits, "Understanding Mixers – Terms Defined, and Measuring Performance", AN-00-009 Rev.: A, April 2015.
- [4] Black, H. S. "Translating system." U.S. Patent 1,686,792, issued October 9, 1928.
- [5] Black, Harold S. "Wave translation system." U.S. Patent No. 2,102,671. 21 Dec. 1937.
- [6] Petrovic, V. "VHF SSB transmitter employing Cartesian feedback." Proceedings of the IEE Conference on Telecommunications, Radio and Information Technology. 1984.
- [7] Petrovic, V., and W. Gosling. "Polar-loop transmitter." Electronics letters 15.10 (1979): 286-288.
- [8] Z. Popović. T. Reveyrand. "High-Efficiency PAs for High PAR Signals Using an NI- Based Platform", Technical Session, NIWeek 2015, August 5, 2015, Austin, TX.
- [9] Doherty, William H. "A new high efficiency power amplifier for modulated waves." Radio Engineers, Proceedings of the Institute of 24.9 (1936): 1163-1182.
- [10] Chireix, Henry. "High power outphasing modulation." Radio Engineers, Proceedings of the Institute of 23.11 (1935): 1370-1392.
- [11] Raab, Frederick H. "Efficiency of outphasing RF power-amplifier systems." Communications, IEEE Transactions on 33.10 (1985): 1094-1099.
- [12] Andersson, Christer M., et al. "A 1 – 3-GHz digitally controlled dual-RF input power- amplifier design based on a Doherty-outphasing continuum analysis." Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on 61.10 (2013): 3743-3752.
- [13] Chung, Sungwon, et al. "Asymmetric multilevel outphasing architecture for multi-standard transmitters." Radio Frequency Integrated Circuits Symposium, 2009. RFIC 2009. IEEE. IEEE, 2009.
- [14] Choi, Jinsung, et al. "Optimized envelope tracking operation of Doherty power amplifier for high efficiency over an extended dynamic range." Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on 57.6 (2009): 1508-1515.

8 付録

8.1 フロントエンドでのRF線形性のテスト

従来、フロントエンドは、IM3やTOI(IP3)などの指標と共に、2トーンCW測定を使用して設計と開発が行われました。通信システムがデジタル変調に移行していくことは、より高度な信号発生器とアナライザを使用して線形性のテストが頻繁に行われるようになることを意味します。

多くの場合、システムごとに既知のデジタル・データ・シーケンスを使用したテスト信号が定義され、線形性の指標はそれらから導出されます。振幅を検出する周波数掃引モードでスペクトラム・アナライザを使って解析できるシンプルなスペクトラムリグロースに加えて、テスト信号の復調とデコードを行うことで、ビット単位のデジタル解析が可能になります。

通常、設計者は、この中間の復調IQデータを利用します。このデータの解析は、フロントエンド開発での強力な診断ツールになります。

線形性を評価するための指標および計測手法には、以下のものがあります。

- 高調波
 - 対象信号の高調波周波数は、明確に定義されていて計算が容易です。高調波のレベルの測定は簡単です。
 - 高調波レベルの測定では、CWまたは変調信号を使用して、スペクトラム・アナライザで特定の狭い周波数スパンをスキャンする方法が最も多く使用されます。
- スプリアス
 - フロントエンドはさまざまなアーキテクチャを使用して構築でき、多くの場合、1つまたは複数の周波数変換が含まれています。
 - ミキサーや変調器をドライブしてこれらの周波数変換を行うために使用する発振器(非安定増幅器など)では、多数の高調波が生成されます。
 - 発振器でドライブされるこれらのミキサーや変調器は、これらの高調波が現れる周波数範囲を通過します。信号の高調波($n \times IF$ または $n \times RF$)を乗算した発振器の高調波($n \times LO$)を確認/管理する必要があります。
 - スプリアスレベルと関連する周波数を測定するには、通常、広い周波数掃引モードでスペクトラム・アナライザを使用します。
- IMRR(イメージ応答除去比)とLOリーケージ
 - 周波数変換ステージでは、必要な信号に付随する信号が変換器の出力に現れます。これらの中で最も重要なのは、イメージ信号(意図しない周波数)です。
 - イメージ信号は、周波数をアップコンバートするかダウンコンバートするか、上側変換を行うか下側変換を行うかに関係なく現れます。

- イメージ信号の一部または全体が、目的の帯域に重ね合うことがあります。その場合、信号品質に追加の影響が生じます(EVMなど)。
 - 通常、LO(局部発振器)がミキサーやフロントエンドの出力に現れることは望ましいことではありません。通常、LOリーケージはレベルを最適化する際に動的に測定します。
 - 周波数変換性能を測定するには、通常、周波数掃引モードでスペクトラム・アナライザを使用します。
- ACxRおよびEVM
 - ACxR(隣接チャネル漏洩電力)やスペクトラムリグロースは、不要な信号電力や歪みの量を表し、対象の周波数バンドまたはチャネルに隣接する周波数バンドまたはチャネルに現れます。通常、こうした信号は搬送波の近傍で最も強くなり、周波数オフセットの増加と共に減少します。
 - EVM(エラーベクトル振幅)は、変調信号のシンボルのIQエラーパワーを表します。EVMの低下を引き起こす原因は歪みだけではありません。シンボル単位の復調が存在しない場合でも、シンプルなエンベロープEVM測定を行う場合があります。
 - IQデータを捕捉するには、通常、シグナル・アナライザを使用して変調信号の品質に関する測定を行います。この捕捉した出力IQデータを、入力IQデータと合わせて直接比較することができます。ACxRは捕捉した出力IQデータから計算できます。
- Psatおよび出力PAPR
 - 本書で示したように、最良の性能を実現するには、(i)エンベロープのピーク信号レベルでフロントエンドのPsatをスティミュレートし、(ii)それが最小出力PAPRで実行されるようにすることが重要です。
 - 出力PAPRは、捕捉した復調IQデータから直接計算できます。
 - Psatの値は、出力PAPRとRMSパワーの合計として計算されます。
 - Psatの測定は、メモリ効果による確度の低下を回避するために、CWパワー／周波数掃引を使用するのではなく、代表的な信号を使用して実行します。
 - PsatとPAPRの測定は、例えば、パワーセンサを接続したオシロスコープで捕捉したIQ波形を使用して実行することができます。

8.2 線形性テストと測定機器の例

8.1で説明したように、さまざまなテスト機器でさまざまなタスクを実行することができます。多くの場合、これらのタスクは、単体の専用ユニットではなく、2つの機器を使用して実行されます。

表8-1に、さまざまな機器と機能をまとめます。

測定器ファミリー	例	説明
信号発生器		
	R&S®SMW200A	デュアルRFおよびデュアルエンベロープ出力に対応した独自のベクトル信号発生器で、高性能無線フロントエンドの開発に使用できます。
	R&S®SMBV100A	RFおよびマイクロ波信号発生器で、1つのRF出力ソースで波形ファイルまたはリアルタイム波形の変調を行うことができます。
シグナル/スペクトラム・アナライザ		
	R&S®FSW	シグナル/スペクトラム・アナライザで、従来から振幅対周波数の測定に使用されています。最新のアナライザでは、さらに高度な機能や信号解析が利用できるようになっています。
	R&S®FS-Z	高調波ミキサーで、RF信号の周波数をダウンコンバートし、スペクトラム・アナライザまたはシグナル・アナライザの上限周波数を拡張します。
オシロスコープ		
	R&S®RTO	デジタルオシロスコープで、通常、IQ波形をサンプリングするのにその入力チャンネルが使用されます。
パワーセンサ		
	R&S®NRP	3パス・ダイオード・パワー・センサで、通常、変調波形の平均パワーを測定するのに使用されます。
ベースバンドジェネレーター		
	R&S®AFQ	信号およびIQ変調発生器で、デジタルまたはアナログ形式でIQデータを合成するのに使用します。

表8-1: テスト/測定機器ファミリーの例と機能説明

- アプリケーションに依存する、動作周波数レンジ、ソフトウェア、ハードウェアオプションは別途指定してください。
- お客様の要件に合わせた最適な構成をご提案します。詳細については、最寄りの弊社オフィス、または営業担当者までお問い合わせください。

用語集

AM-AM、AM-PM: 振幅変調-振幅変調変換(振幅変調-位相変調変換)。非線形動作の影響を受けたときに起きる信号の伝送振幅(位相)の変化。

ANT: アンテナ。送信信号を伝導媒体から自由空間に移したり、受信信号を自由空間から伝導媒体に移すのに使用される。

BOC: ブロックアップコンバーター。1つの機能ユニット内で周波数のアップコンバートと増幅の両方を行う送信用無線フロントエンドを表すために、主に衛星通信分野で使用される用語。

DFX: Xを考慮した設計。製造および配備環境でのフロントエンドハードウェアの組立、テスト、適応、保守、修理に関する幅広い問題が含まれる。

LUT: ルックアップテーブル。元になる計算式を使用せずに、1つ以上の入力値から出力値を作成する手法。

mmWave: ミリ波。厳密には、30 GHzから300 GHzの周波数レンジ。6 GHzから始まるより広い周波数レンジを表す場合が増えている。マイクロ波と同義で使用される。

MUX: マルチプレクサー。フロントエンドで、送信と受信を調整するのに使用される。

OSI: 開放型システム相互接続モデル。基礎となる内部構造およびテクノロジーに関係なく、電気通信またはコンピューターシステムの通信機能の特徴付け標準化した概念モデル。

PAPR: ピーク対平均電力比。時間変動波形でのピーク電力と平均電力の比。

PHY: 物理層。7階層OSIモデルの基礎部分で、通信リンクを形成するのに必要なハードウェアが含まれる。

RRC: ルート・ナイキスト・フィルタ。通信システムで符号間干渉を最小化するのに使用される。通常、送信および受信フロントエンドの両方で1つのRRCが使用され、正味の「ナイキストフィルタ」応答が得られる。

TWTA: 進行波管増幅器。一般に非常に高い周波数と電力で使用される増幅デバイスで、半導体を使用せずに構築される。

使用率: Psatに対する、使用されたサブシステム(増幅器など)リソースの比。

5G: 4Gの後に続く第5世代の移動体通信ネットワーク。

ローデ・シュワルツについて

Rohde & Schwarzエレクトロニクスグループは、試験／測定、放送／メディア、セキュアコミュニケーション、サイバーセキュリティ、無線信号の検出／位置特定の分野で革新的なソリューションを提供しています。設立から80年以上にわたり、独立したグローバル企業として70カ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。

エレクトロニクスグループは、確立されたビジネス分野における世界的なマーケットリーダーです。本社をドイツのミュンヘンに構え、シンガポールと米国メリーランド州コロンビアに地域統括会社を置き、これらの地域での事業運営を管理しています。

ローデ・シュワルツ・ジャパン株式会社

本社／東京オフィス

〒160-0023 東京都新宿区西新宿7-20-1
住友不動産西新宿ビル27階
TEL:03-5925-1288/1287 FAX:03-5925-1290/1285

神奈川オフィス

〒222-0033 神奈川県横浜市港北区新横浜2-8-12
Attend on Tower 16階
TEL:045-477-3570 (代) FAX:045-471-7678

大阪オフィス

〒564-0063 大阪府吹田市江坂1-23-20
TEK第2ビル8階
TEL:06-6310-9651 (代) FAX:06-6330-9651

サービスセンター

〒330-0075 埼玉県さいたま市浦和区針ヶ谷4-2-11
さくら浦和ビル4階
TEL:048-829-8061 FAX:048-822-3156

E-mail: info.rsjp@rohde-schwarz.com
<http://www.rohde-schwarz.co.jp/>

本社(ドイツ)

Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG
Mühlendorfstraße 15 | D - 81671 München
TEL: + 49 89 4129 - 0 FAX: + 49 89 4129 - 13777
www.rohde-schwarz.com

持続可能な製品デザイン

- 環境適合性とエコロジカルフットプリント
- エネルギー効率と低エミッション
- 長寿命化と所有コストの最適化

Certified Quality Management
ISO 9001

Certified Environmental Management
ISO 14001

本アプリケーションノートと付属のプログラムの使用にあたっては、Rohde & Schwarz Webサイトのダウンロードエリアに記載されている条件に従ってください。

R&S®は、Rohde & Schwarz GmbH & Co. KGの登録商標です。
商品名は、各所有者の商標です。

ローデ・シュワルツ・ジャパン株式会社

〒160-0023 東京都新宿区西新宿7-20-1
住友不動産西新宿ビル27階
TEL:03-5925-1288/1287 FAX:03-5925-1290/1285

www.rohde-schwarz.co.jp