

RF IC 製造テストにおける 5G RF 校正手順の改訂

Vineet Pancholi、シニア・ディレクター、テスト技術担当 | Amkor Technology, Inc.

HyeongSik Youn、ディレクター、テストエンジニアリング担当 | Amkor Technology Korea

JeongYon Kim、ディレクター、テスト開発部門マネジャー | Amkor Technology Korea

SangHo Byun、シニア・ディレクター、マスターテストエンジニアリング | Amkor Technology Korea

MinHo Chang、バイスプレジデント、テスト開発課マネジャー | Amkor Technology Korea

Venancio Kalaw、RF&MEMS,テスト開発エンジニアリング | Amkor Technology Philippines

Mon Lopez、ディレクター、開発部門マネジャー | Amkor Technology Philippines

最新の無線周波数（RF）コンポーネントは、半導体組立・テストのアウトソーシングサプライヤー（OSAT）にとって、製品テストの仕様に適合した組立とテストを行わなければならない点で多くの課題を抱えています。携帯電話、航法機器、全地球測位システム、Wi-Fi、受信機／送信機（Rx／Tx）部品などの RF 製品の高度化と需要が増え続けており、より高度な 5G 携帯電話と Wi-Fi 部品の需要を牽引しています。

どのような RF テストシステムでも、被検査デバイス（DUT）で測定器のポート精度を達成できれば、測定精度と再現性が向上します。ただ残念ながら、測定器と DUT の間の経路にあるケーブル、部品、トレース、スイッチなどが理想的でない場合、測定精度を低下させることがあります。

現在の校正方法は過去に有効であったかもしれませんが、しかし、RF 技術のミリ波の進歩に伴い、校正方法を仕様拡張のために見直す必要があります。信号経路校正の主要なポイントである、システム校正、ケーブル校正、負荷基板トレースデエンベッド、ゴールデンユニット校正を考慮し、これらを独自の優位性として校正標準を開発する方法が重要であると考えます。

ミリ波 RF テスト

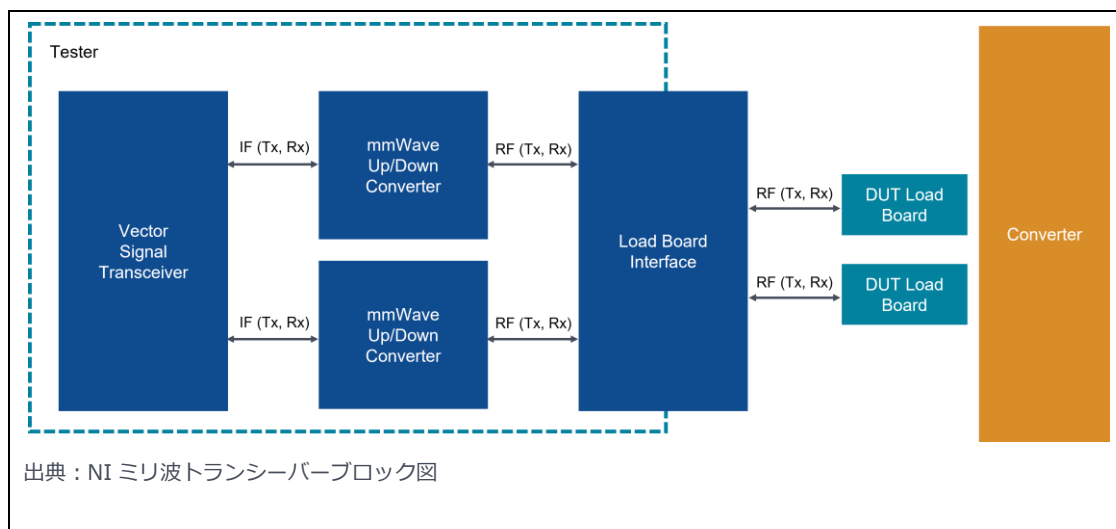


図 1：ミリ波 RF テストのための検査システム構成

テスト装置、コネクタ、アダプタ、システムレベルの校正を適切に選択することで、5G コンポーネントやデバイスの真の性能を評価するための正確な測定が可能になります（図 1 参照）。ミリ波の周波数では、信号が障害を受けやすく、テストソリューション、ケーブル、コネクタの選択において特別な配慮が必要となります。また、正確な測定を実現するためには、システムレベルでの校正が不可欠です。

RF 校正

校正は、測定システムが正確な結果を出すことを保証します。テスト装置の機器と被テストデバイスとの間の経路におけるすべての理想でない状況は、測定精度を低下させ、フィットネスエラーをもたらします。図 2 に示すように、テストシステムの信号源の出力またはその測定入力から DUT のテストポートまで測定精度を延長する必要があります。校正された正確な測定値を得るためには、テスト装置、ケーブル、コネクタの周波数特性の測定が必要な場合があります。

5G は、スループットの向上、遅延の抑制、信頼性の向上、効率の改善など、無線通信の大幅な改善を実現します。この目標を達成するためには、より高い周波数、より広い帯域幅、新しい変調方式、大規模な多入力多出力（MIMO）、フェーズドアレイアンテナなど、さまざまな新しい技術やテクニックが必要です。

これらの技術は、デバイスの性能を検証する上で新たな課題をもたらします。重要な測定項目の 1 つはエラー・ベクトル・マグニチュード（EVM）です。これは変調された信号が DUT に送られ、DUT から受信される際のシステムレベルの仕様です。多くの場合、EVM 値は特定の閾値以下に保たれなければならない、正確に測定するためには、テストシステム自体が低ノイズフロア（＝低 EVM）である必要があります。

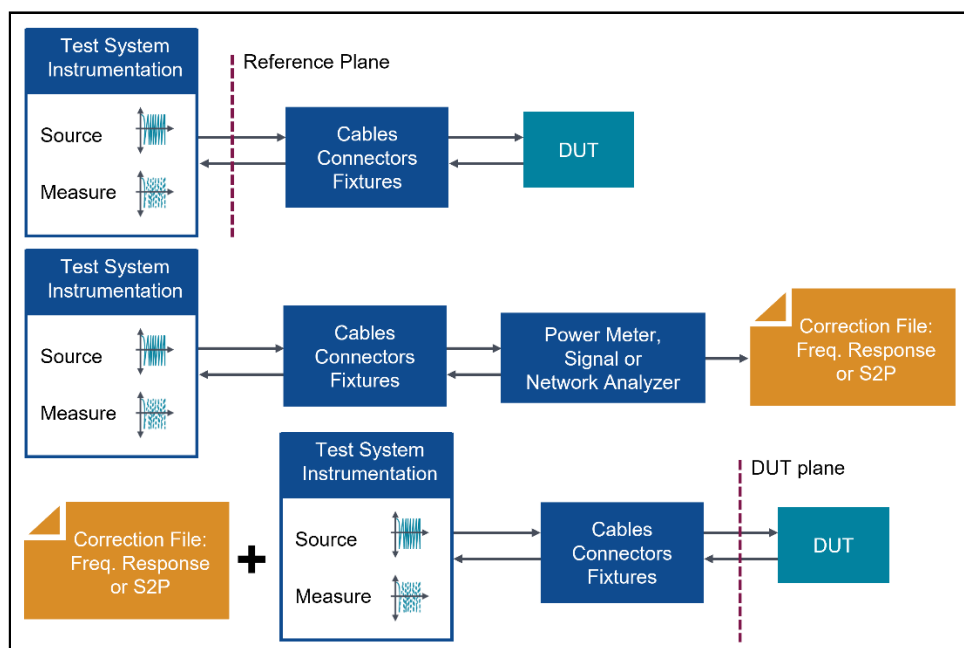


図 2：RF 校正のセットアップ

これらの測定誤差を考慮し、補正するために用いられるのが、ベクトル校正とスカラー校正の 2 種類の校正方法です。

ベクトル校正

ベクトル校正法では、RF パスの振幅特性および位相特性の両方を測定する必要があります。これは、DUT の入力および出力ポートでネットワーク・アナライザーの校正を行うか、校正済みのネットワーク・アナライザーを使用して RF パスの散乱 (S) パラメータ³を測定することによって行うことができます。後者の方法では、信号経路の完全な複素数値による特性評価を行うことができます。

スカラー校正

スカラー校正のアプローチは、RF パスのマグニチュード特性のみを特徴づけるもので、ベクトル校正では S21 透過係数のマグニチュード部分のみを測定することと等価です。一般的な手法としては、信号発生器で経路の一端を駆動し、もう一端の信号をパワーメーターで測定します。経路応答のマグニチュード部分（損失）は、測定された電力レベル（dBm）からソース電力レベル（dBm）を減算することで決定されます。これを対象帯域の複数の周波数で繰り返し、全体のマグニチュード特性を決定します。

スカラー校正における許容可能な結果は、高品質の部品、アダプタ、ケーブルがシステムに使用されている場合に得られます。これにより、測定の不確かさを最小化し、測定の再現性を高めることができます。しかし、完全なベクトル校正と比較すると、スカラー校正は信号経路に沿ったインピーダンス・マッチの変化を検出する可能性が低くなります。

図 3 はスカラー RF 校正の実行手順を示したものです。校正テストプログラムを実行し、DUT ボードとテスターを指定して、経路校正を行います。その後、外部機器（パワーメーター、シグナルジェネレータ、スペクトラムアナライザ）を用いて校正データを収集します。収集した校正データを直近の校正データと比較し、偏差が指定された誤差範囲内であれば、校正データを適用します。偏差が誤差範囲を外れている場合は、点検および修理を行い、校正手順を繰り返します。

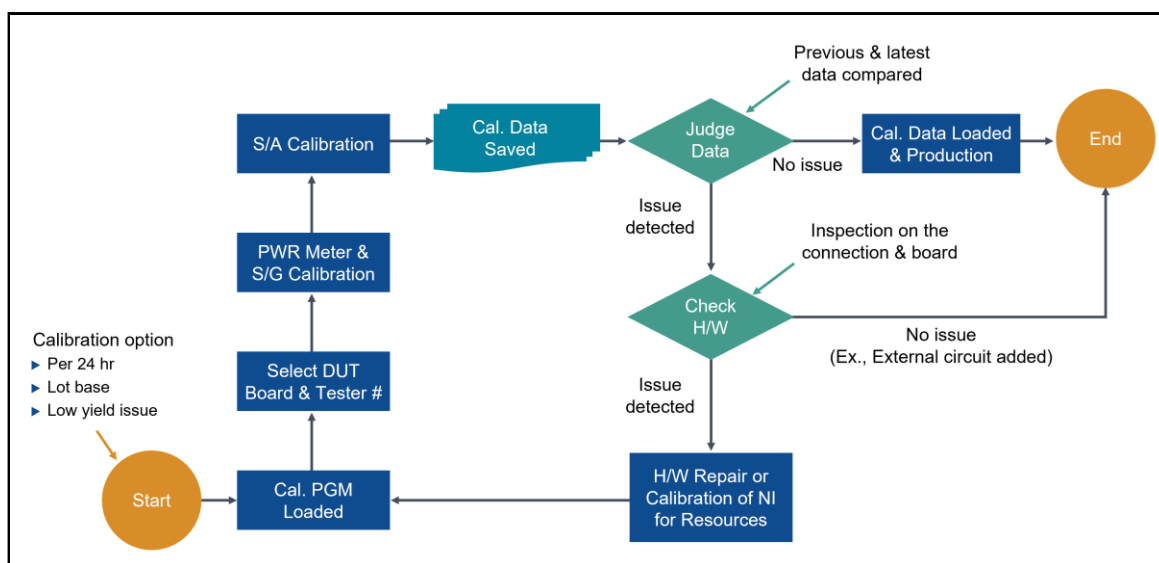


図 3：スカラー RF の校正手順

DUT ソケット校正

RF 校正は、DUT の Rx 信号経路の校正と、DUT の Tx 信号経路の校正の 2 つのステップで実行されます。このため、校正キットの設計と製造を提案しています。

手順 1 では、DUT Rx 信号経路の校正により校正用損失係数測定環境を導出します。ポゴの RF 信号ピンに接続された校正キットは、信号トレースと完全に一致する必要があります。パワーセンサーで入力信号のパワーレベルを正確に測定するためには、パワーセンサーをゼロ（null）にします。その後、信号発生器とパワーセンサーを適用し、DUT への入力信号トレースの損失係数を正確に測定する必要があります。これらの損失測定は周波数に依存するため、各製造テスト周波数で行う必要があります。すべての校正損失係数はファイルに保存され、製造テスト時に適用されます。

手順 2 において、校正損失係数測定環境は、DUT Tx 信号経路の校正を実行するように設定します。信号発生器とスペクトラムアナライザを使って、すべての入力と出力のポゴ RF 信号ピンの損失係数を測定できます。これにより、入力ポゴ RF 信号ピンと出力ポゴ RF 信号ピン間の RF 信号トレースを正確に校正できます。また、手順 1 で測定した入力ポゴ RF 信号端子の損失係数を代入して、出力ポゴ RF 信号ピンの損失係数のみを算出することも可能です。このようにして、各製造テスト周波数における負荷基板からの往復 RF 信号経路の損失係数を校正することが可能です。

DUT までのトレース全体を完全に校正するためには、プリント基板（PCB）と DUT をつなぐポゴピンの損失係数を考慮する必要があります。比較的低い周波数では、ポゴピンの損失係数は無視できるため、RF 校正から除外できます。しかし、5G New Radio（NR）はミリ波周波数帯を使用するため、同じ種類のポゴピンであってもかなりの RF 信号の損失が発生する可能性があります。ポゴピンの損失寄与は、校正における損失要素として含まれています。既存のソケット構造ではポゴピンの損失を正確に測定することが困難でした。そのため、この損失を正確に測定するための新しい校正およびテスト用ソケット機能を開発しました。

系統的な誤差条件を補正するために使用される基本的な手法は 2 つあります。ショート・オープン・ロード・スルー（SOLT）と、スルー・リフレクト・ライン（TRL）です。校正方法の違いは、使用する校正基準の種類と基準の定義方法に関係しています。周波数帯や用途によって、それぞれ利点があります。

ケーススタディ ¹²

5G のキャリア周波数と帯域幅では、テスト治具は検査システムに大きなチャネル周波数応答を引き起こし、EVM 結果に悪影響を与える可能性があります。この測定には、テスト治具と DUT の特性が含まれるため、DUT の真の性能を判断することは、不可能ではないにしても困難です。校正は、テストシステムのコネクタから DUT の入力コネクタにテストプレーンを移動できます（図 4 参照）。

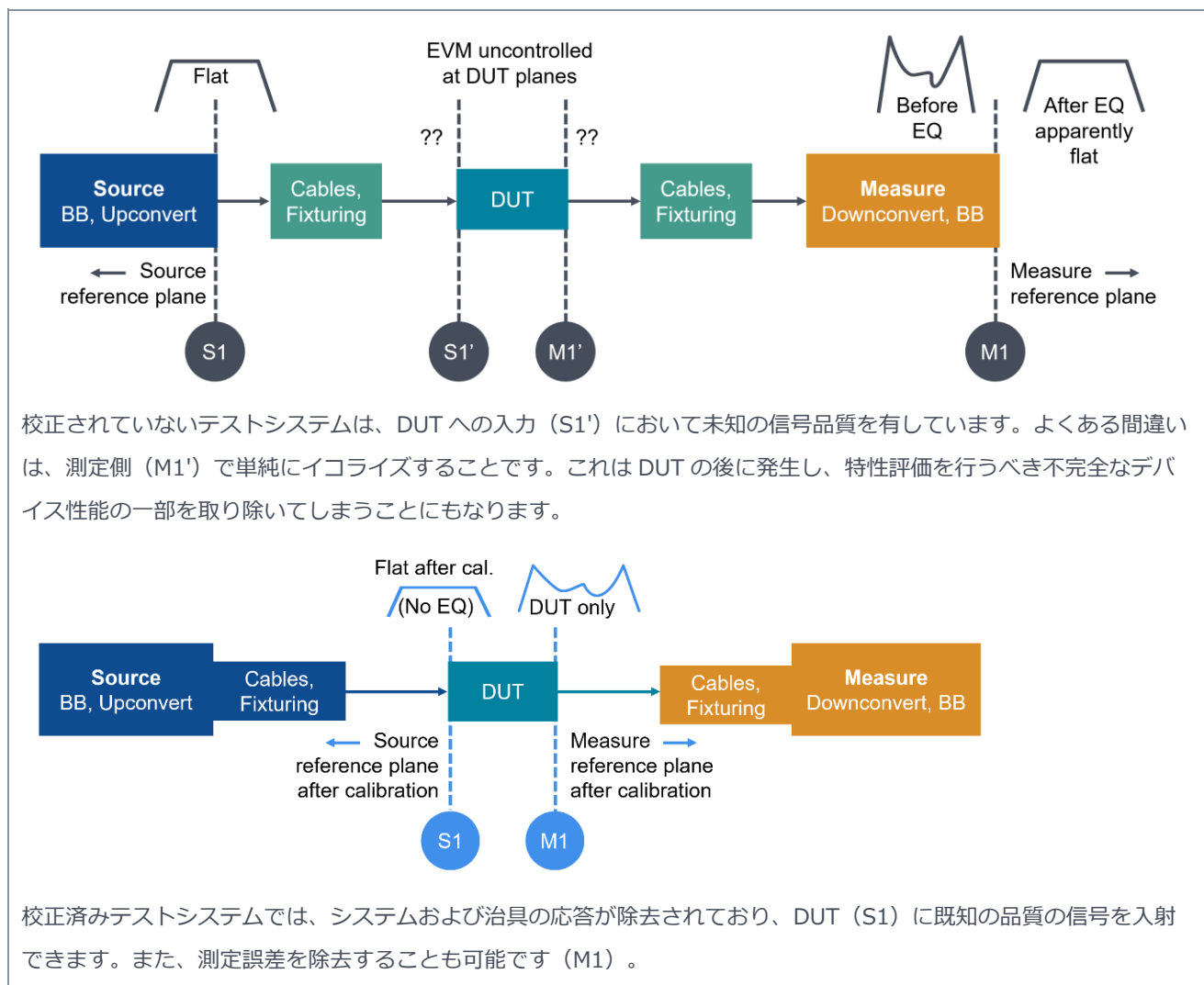


図 4：校正による DUT へのテストプレーンの移動

図5は、直交周波数分割多重（OFDM）のRF変調検査における校正の影響を分析した結果です。周波数応答特性は、900MHzの帯域幅（BW）の信号を28GHzで比較したものです。上のトレースは振幅（amplitude）特性を示しており、帯域の上端で大きくロールオフしています。下のトレースは位相特性ですが、こちらも帯域によって大きく変化しています。

校正を行わない場合、周波数応答特性の大きさ（7dB）と位相（45度）に大きな偏差が発生しました。校正を行った場合、周波数応答特性の大きさ（0.2dB）と位相（2度）にばらつきに抑えられました。

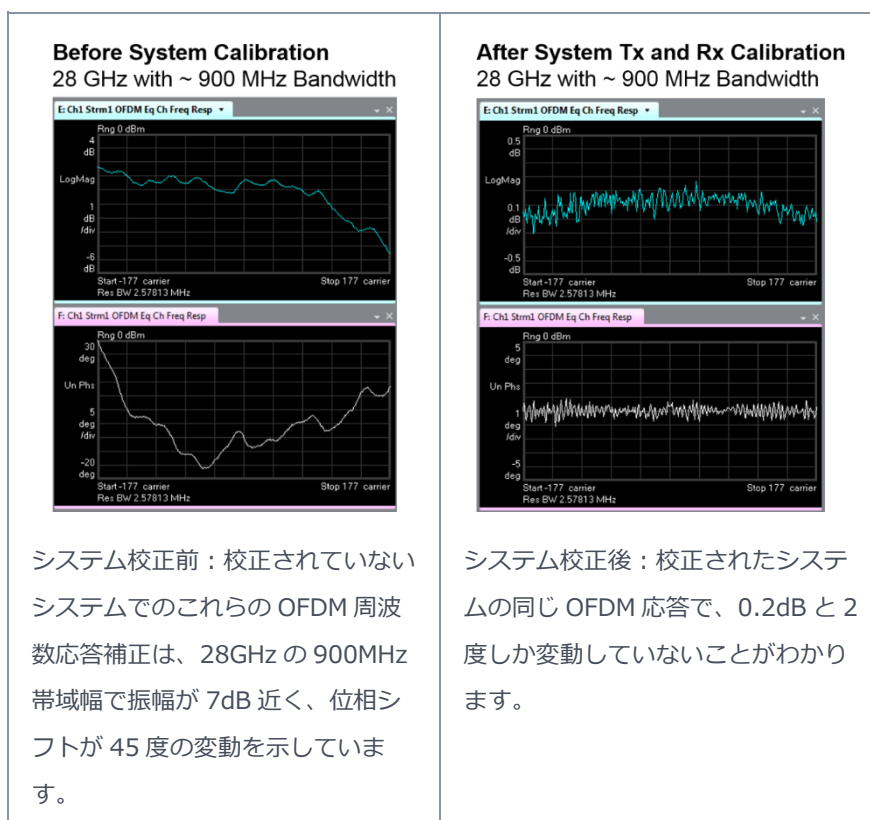


図5：校正前後の OFDM 変調周波数特性

図6は、シングルキャリア 16 直角位相振幅変調（QAM）信号の校正後の復調結果です。左上部のトレースは、極めて明瞭なコンステレーション図です。これは、イコライザの応答が大きさ、位相ともにフラットで仕様の範囲内であることを意味し、イコライザがテスト治具に残留するチャネル応答を相殺していないことを示しています。左下部のトレースには、概ね 1GHz の帯域幅があるスペクトラムが示されています。中央下部のトレースは

、エラーの概要を示しています。EVM は約 0.7%であり、デバイスの仕様と比較すると許容範囲内のマージンを示しています。このシステムは、デバイスの特性を判断するのに最適なシステムでしょう。

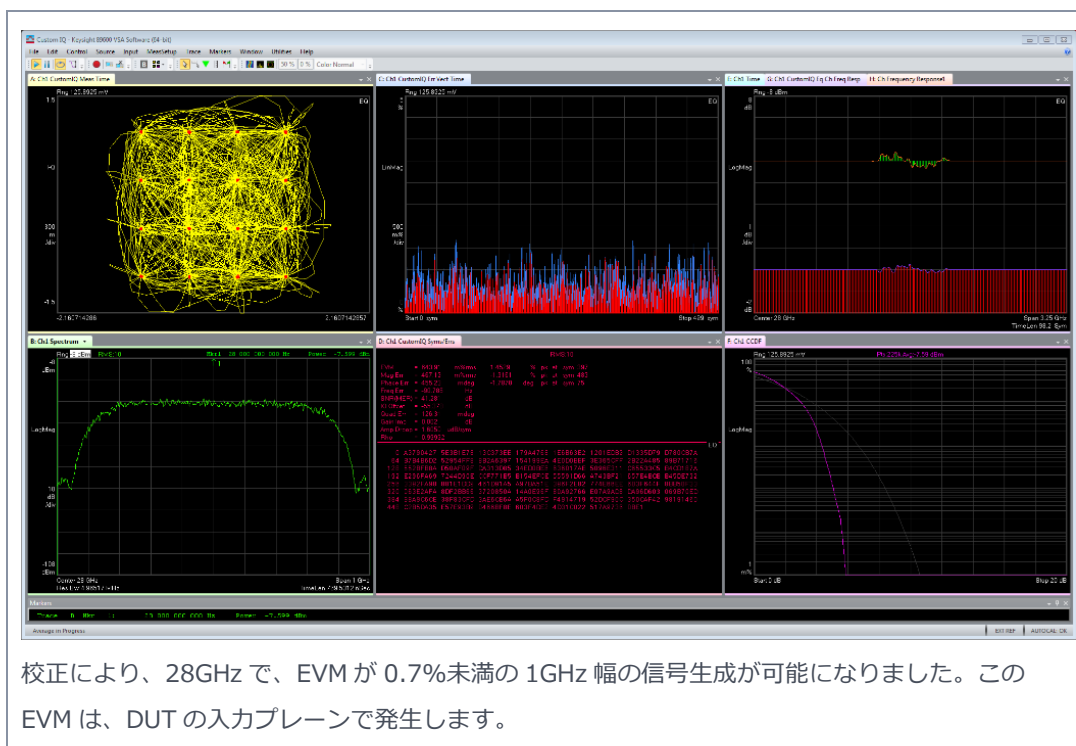


図 6：校正前後の OFDM 周波数応答特性

サマリー

RF 校正は、半導体 RFIC の製造テストに必要なプロセスであり、許容可能なスループット、マージン、歩留まりに変換されます。信頼性の高い再現性のある校正により、一貫した結果が得られます。これにより、製品や設計上の問題の特定が容易になり、その結果、開発や製造の遅れを最小限に抑制できます。Amkor の RF 校正は、お客様のパーツの製造テストを成功させるために不可欠なセットアップです。

参考文献：

1. 「Using Calibration to Optimize Performance in Crucial Measurements (重要な測定におけるパフォーマンスを最適化するための校正の使用)」(Keysight、5992-0891)
2. 「Accelerate 5G Testing: 5G Manufacturing Test Considerations (5G テストの加速 : 5G 製造テストにおける考慮事項)」(Keysight、5992-3659)
3. 「S-Parameters (S パラメーター)」Microwaves101.com、リンク
4. 「4 Hints for Better Millimeter-wave Signal Analysis (より良いミリ波信号分析のための 4 つのヒント)」ホワイトペーパー、(Keysight、5992-2970)
5. 「A Novel BiST and Calibration Technique for CMOS Down-Converters (CMOS ダウンコンバーター用の新しい BiST および校正手法)」2008 4th IEEE International Conference on Circuits and Systems for Communications (ICCSC 2008)
6. 「Self-calibration of input-match in RF front-end circuitry (RF フロントエンド回路での入力整合の自己校正)」IEEE Transactions、52 巻 12 号、2005 年 12 月
7. 「Calibration techniques of active BiCMOS mixers (アクティブな BiCMOS ミキサーの校正手法)」IEEE Journal of Solid-State Circuits、37 巻 6 号、2002 年 6 月
8. 「Digital calibration of gain and linearity in a CMOS RF mixer (CMOS RF ミキサーでの利得と直線性のデジタル校正)」2008 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)
9. 「Verification of wafer-level calibration accuracy at high temperatures (高温でのウェハレベルの校正精度の検証)」2008 71st ARFTG Microwave Measurement Conference
10. 「A multiline method of network analyzer calibration (ネットワークアナライザ校正におけるマルチライン方式)」IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques、39 巻 7 号、1991 年 7 月
11. 「On-wafer calibration techniques for giga-hertz CMOS measurements (ギガヘルツ CMOS 測定用のオンウェハ校正技術)」Proceedings of 1999 International Conference on Microelectronic Test Structures
12. 「Comparison of the "pad-open-short" and "open-short- load" deembedding techniques for accurate on-wafer RF characterization of high-quality passives (高品質パッシブの正確なオンウェハ RF 特性評価のための「パッド・オープン・ショート」および「オープン・ショート・ロード」脱スタック技術の比較)」IEEE Transactions、53 巻 2 号、2005 年 2 月

13. 「Should I be worried about 5G calibration? (5G 校正について心配する必要はあるのか?)」
Keysight Community ブログ