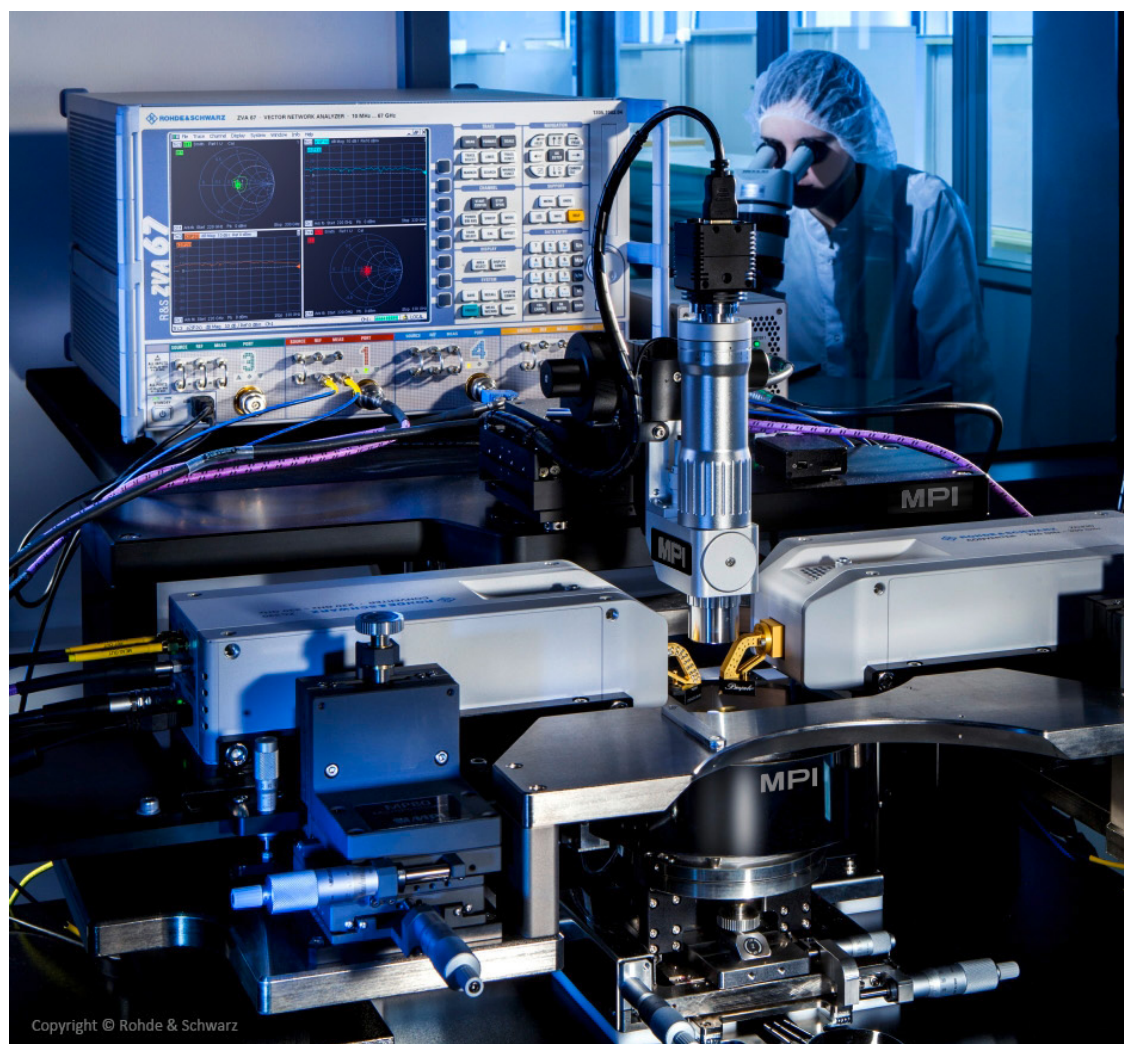


# 複雑なTHz周波数帯測定の簡略化

マニュアル・プローバーを使って計量学レベルの高精度測定の実現

非侵襲性分光分析法、セキュリティー・監視システム、車載用近距離レーダー、5G次世代移動体通信システムなどTHzアプリケーションの需要が拡大する中、高精度で信頼性/再現性の高い測定はこれまで以上に重要になってきています。特にTHz帯が必要となるデバイス/ICの研究開発分野、新製品のアプリケーション開発ではこれが顕著です。

本アプリケーションノートではオンウェハーでのTHz周波数帯の校正およびその測定課題について考察します。測定機器のインテグレーション、頻繁なシステム構成の変更へのソリューション、オペレーターの操作による校正の精度/再現性への影響、測定データの計量学レベルでの解析の必要性について記述します。



## 計測機器とのインテグレーション

サブテラヘルツ領域の測定では周波数帯域を変更するたびにシステム構成の変更を行う必要があります。例えばプローパーおよびVNAの構成変更に加え、750 GHzに到達するまでに6回もRF校正を行う必要があります(図1)。デバイスの広い周波数範囲の測定データを取得するには非常に時間と労力がかかります。

これまでのやり方はVNA周波数エクステンダ(コンバータ)をプローパーに取り付ける方法でしたが、この方法だとチャックと顕微鏡の位置を上げ下げする必要があり、機械的安定度が低くなると同時に、RFプローブをパッドや校正基板に精度良くポジショニングする必要があり、周波数が高くなるほど測定が難しくなります。この結果周波数が高くなるほど、システム校正の精度、再現性が落ち、デバイスの特性評価は非常に困難となります。

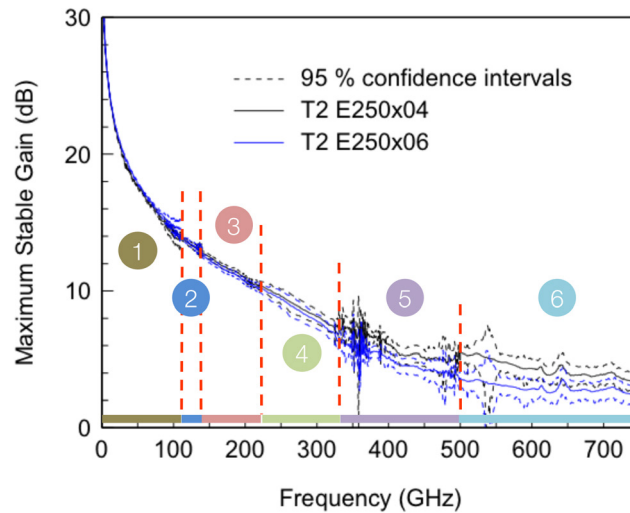


図1: 750 GHzに到達するまでに6回も校正を行う必要がある信頼区間95%のTHzトランジスタを使用したMSG測定例(測定データDylan Williams, NISTご提供)

TS150-THZマニュアル・プローパーはMPI社の技術者たちによりTHz測定用プローパーとしてゼロから設計されたもので、ユニークで革新的な機能が盛り込まれております。あらゆる周波数帯のVNA周波数エクステンダ(コンバータ)に対応し、シームレスなインテグレーションを実現し、最大限の測定ダイナミックレンジ、再現性のある測定結果を保証します(図2)。小型でも安定したチャックステージと堅牢なプローブ・プラテンを組み合わせることにより、直接THz用RFプローブを周波数エクステンダの導波管出力ポートに接続する事ができ、測定ダイナミックレンジを最大限に引き出すことが可能です(図3)。

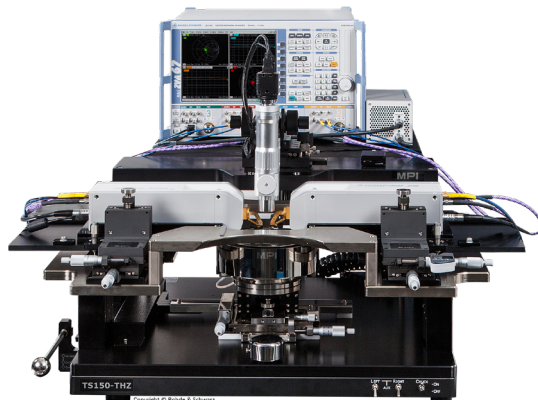


図2: MPI TS150-THZ プローパー+Rohde & Schwarz 社 ZNAネットワークアナライザ ~330GHz対応 (写真: Rohde & Schwarz 社ご提供)

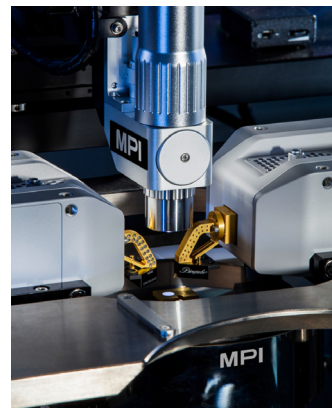


図3: ミリ波VNAの出力に直接接続されている導波管プローブ (写真: Rohde & Schwarz 社ご提供)

周波数エクステンダ(コンバータ)の固定プレートにはダブル型インタフェースがついており、取り換えが容易になっています(図4)。固定プレートは周波数エクステンダよりは必ず必要はなく、側面が平らなため、保管する際に棚などに安全に保管いただくことができます。

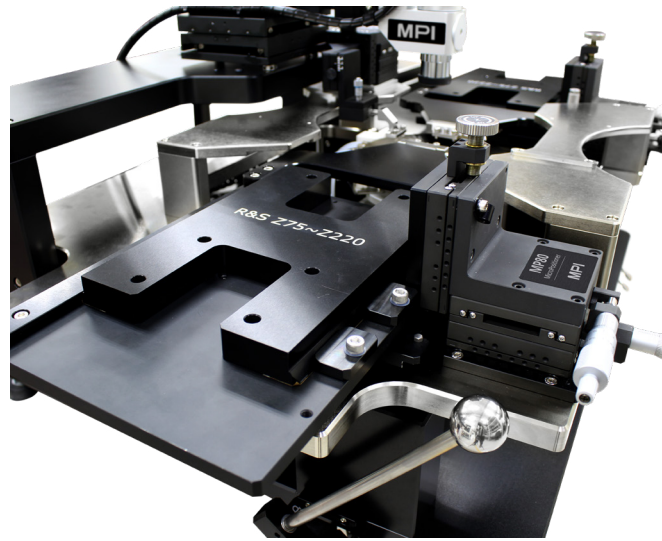


図4: R&S®ZVA-Z75 から R&S®ZVA-Z220 のダブル型インタフェース  
Rohde & Schwarz ZVA周波数エクステンダ(コンバータ)

## ■ なぜマルチラインTRL校正を使用するか

マルチラインTRL(Thru-Reflect-Line)校正法はアメリカ国立標準技術研究所(NIST)により開発され、ウェハーレベルでのRF測定の計量学の標準となりました。他の校正手法に比べての一番の優位点は校正基板の平面線路標準を通る伝送波をもとに測定した基準インピーダンス(ZREF)の計算です。伝送波は伝送線路の種類と構造により決まる物理現象であり、RFプローブの構成や種類が影響を与えることはありません。さらにマルチラインTRL校正アルゴリズムを使用することにより、基準線路の伝搬定数 $\gamma$ を正確に抽出することが可能となります。その結果、測定基準面を正確に任意の位置に設定することが可能になります。

マルチラインTRL校正キットはデバイスに使用されている半導体プロセスと同じプロセスにて簡単に設計/作成することができます。これによりデバイスのコンタクトパッドの寄生容量からくる測定結果をデエンベッドする必要がなくなります。これらの優位点を併せ考えると、110 GHz以上での校正において高い信頼性が得られるのはTRL校正手法だけとなります。

## ■ MP80-DXポジションを使ったマルチラインTRL校正

通常広い周波数範囲での校正を行う際、物理長の違う3種類以上のライン(Line)を使用します。スルー、リフレクト基準と合わせてマルチライン校正キットは5種類以上のエレメントを含めることがあります。このようなキットを使い再現性のある測定をするには何度もポジションの位置の調整やプローブのアライメントをやり直す必要があります。マニュアル・プローバーを使いミリ波帯でのマルチラインTRL校正を行う場合、複数でかつ経験の異なるユーザーにより校正が行われた場合、精度の高い再現性のある校正結果を得ることは困難です。

TS150-THZマニュアル・プローバーでMP80-DXポジション(オプション)をご使用いただくことにより、マルチラインTRL校正を簡単に行うことができます。TRLアルゴリズムではTHRUの長さは常に0として扱われ、その他のLINEの長さ( $\Delta l$ )はTHRUの長さに対して定義されます(図5)。MP80-DXポジションを使用する場合、プローブを最初にTHRU基準に調整した後、デジタル・マイクロメータを0に設定するだけです(図6)。次にRFプローブの距離は簡単に必要値 $\Delta l$ (表1)に1  $\mu\text{m}$ 以下の精度にて調整が可能です。これにより経験の少ないオペレータでも精度/再現性の高いマルチラインTRL校正を行うことができ、セットアップ時間を短縮できます。

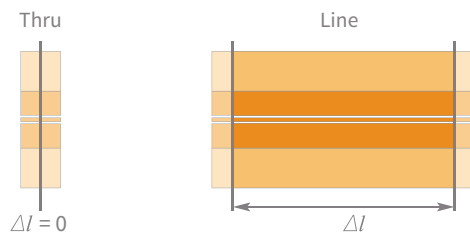


図5: LINE基準(Δl)のTRL定義

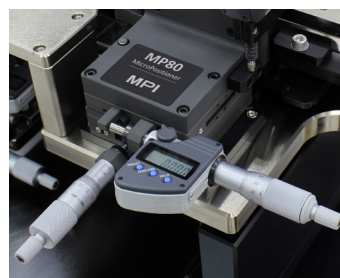


図6: X軸デジタル・マイクロメータ付MP80-DXプローブ。

表1: コプレナ線路長 (CS15インピーダンス基板より)

基準タイプ(基準名)	物理長(μm)	実効長 l (μm)	Δl, μm
Thru	175	150	0
Line 1 (L2)	250	225	75
Line 2 (L3)	355	330	180
Line 3 (L4)	575	550	400
Line 4 (L5)	1025	1000	850
Line 5 (#10)	6600	6575	6425

## StatistiCAL Plus / NIST Uncertainty Framework 解析ツール

StatistiCAL PlusはNISTにて開発されたソフトウェア・パッケージで、従来のマルチラインTRL校正と直交距離回帰法(orthogonal distance regression)に基づいた校正をサポートしています。これらのアルゴリズムはNISTとドイツ物理工学研究所(PTB)で開発されました。アルゴリズムの特長は自身のランダム・エラーによる不確定さの予想が可能となったことです。初期の推測が不十分でもソリューションを導き出すことができるため、StatistiCAL Plusのアルゴリズムは高い安定性をも実現します。

NISTによる「Microwave Uncertainty Framework」はStatistiCAL Plusをさらに拡張させ、ポストプロセスの作業(測定の不確かさをさまざまな測定モデルを使って編集/計算)を可能にしました。本ツールはまた測定のSパラメータの不確定さをトランジスタ・ゲイン、パワー、マテリアル・パラメータといった値や測定基準に反映させるポスト・プロセッサが組み込まれています。

両ソフトウェアともに度量衡学者、マイクロ波測定の専門家向けに開発されており、VNAやプローバー、デバイス特性評価用ソフトウェアなどに接続されていない状態での測定データをポストプロセスするために設計されています。その結果、研究室、研究開発において、このソフトウェアを測定業務のフローへの組込には膨大なプログラミングが必要となり、マイクロ波の計量学についても長年の経験が必要となります。

## ■ QAlibria® StatistiCAL Plusの統合

MPIの校正用ソフトウェアQAlibria®への組み込みにより初めてNISTのStatistical Plusの計量学レベルのマルチラインTRLが簡単にアクセスできるようになりました。両ソフトウェアは校正と測定データ解析ワークフローに連動し(図7)、QAlibria®はVNA、プローバー、オペレータインターフェースを担当し、Statistical Plusはバックグラウンドで校正誤差補正、測定の不確かさの解析を行います。直感的、マルチタッチ、多言語GUIインターフェースのQAlibria®を使用いただくことにより経験の浅いオペレータでも構成ミスを最小限に抑えることができ、高精度な校正結果を短時間で得ることができます。

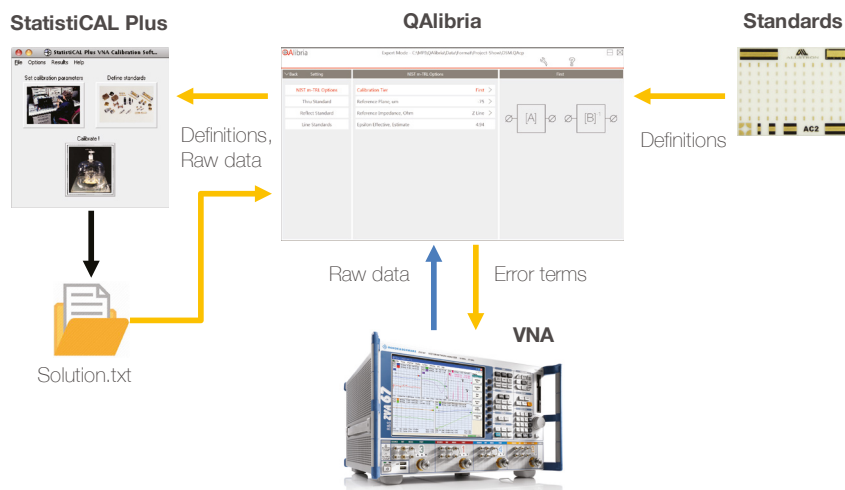


図7: システム校正データのフロー

マルチラインTRLの誤差を計算するには校正基板の基本的な情報(リフレクション(オープンまたはショート)基準、ライン基準の物理長、実効誘電率など)が必要になります。さらにStatistical Plusアルゴリズムでは誤差頂の初期予測、NISTの計算エンジンのODRPACKの設定などが必要になります。これらの定義はQAlibria®側より自動で作成され、Statistical Plusのキャリブレーション・メニューファイル「MPI\QAlibria¥Data¥Statistical Plus¥QAlibriaMenu-NIST.scm」としてQAlibria®のパソコン上に保存されます。本フォルダにはQAlibria®で測定された校正基板の生データ(「¥\_input¥」ディレクトリ)、Statistical Plusによって計算された校正結果(「¥\_output¥Solution.txt」)が保存されています。Statistical Plusによって計算が完了するとQAlibria®が校正結果(solution vector)を読み込み、誤差の情報をVNAに送信します。従ってオペレータが携わることなく、システムは完全に校正されます。

## ■ 校正の再現性

TS150-THZはMPIのマニュアル・プローバーのさまざまな特長(エア・ベアリング・ステージ機構、再現性の高いプラテンリフト機構、オート・コンタクト機能)を使用しております。オート・コンタクト機能は特にコンタクトの再現性に重要な機能で、オペレーターの経験に関わらず測定データの再現性を確実なものにします。

図8はTS150-THZプローバーを使用し、同じメーカーのアルミナ校正基板(CS15)、導波管プローブを使ったLRM(line-reflect-match)とマルチラインTRLの校正結果の再現性を示しています。LRM校正は2回連続して熟練したオペレーターによって行われました。2つの校正手法の違いは校正比較法を使用し計算されています。校正は連続して行われたため、システムのドリフトは最小限に抑えられており、LRMの再現性エラーが結果に現れています(図8の赤線)。次にマルチラインTRL校正は2回は熟練したオペレーターにより、2回は経験の浅いオペレーターによって行われました。どの校正にもMP80-DXポジションナを使用し校正基板線路の $\Delta l$ を表1に基づき定義しました。MP80-DXポジションナを使用した2人のオペレーターによる最大値の再現性エラーでも1人のオペレーターの再現性エラーよりも非常に小さいことがわかります(図8の黄線)。

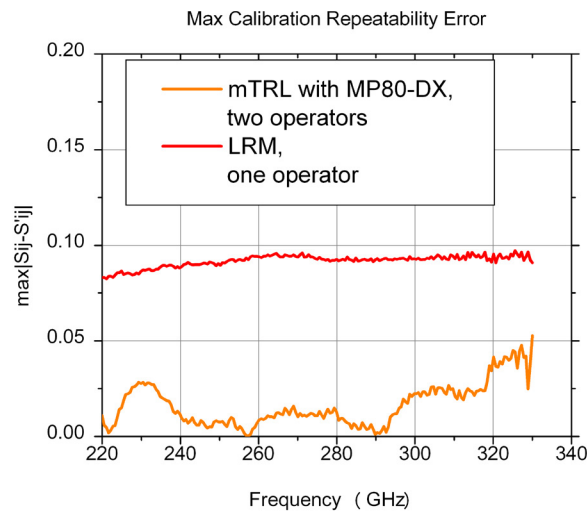


図8:LUMPED—LRM校正とTS150-THZ+MP80-DX<sup>®</sup>ポジションナ<sup>®</sup>を使用しマルチラインTRLを行った校正再現性エラーの比較

## ■ 校正およびデータ解析例

上記で述べたとおり、マルチラインTRL校正を使用することにより正確に校正線路の伝播係数 $\gamma$ を抽出することが可能となります。これにより簡単に実効誘電率 $\epsilon_{\text{EFF}}$ に計算することができます。NISTのStatistiCAL Plusを使用することにより $\epsilon_{\text{EFF}}$ の各線路の実数、虚数、平均値を表示することができます(図9)。これは校正結果の確認とデバッグに非常に有用な機能になります。さらに解析が必要な場合は校正データはグラフやデータファイルにてエクスポートすることも可能です。

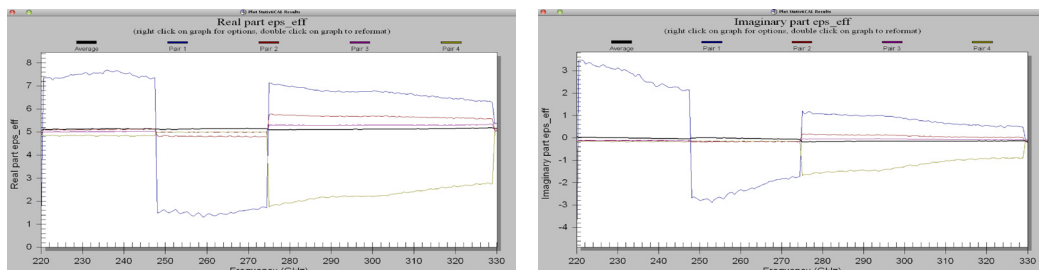


図9: StatistiCAL Plusで計算された実効誘電率 $\epsilon_{\text{EFF}}$ の実数(左)と虚数(右) (debug case)

もう一つのチェックポイントとして、校正に使用されたline基準とreflect基準の補正されたSパラメータを確認することにより、校正作業をより確実にすることができます(図10、11)。

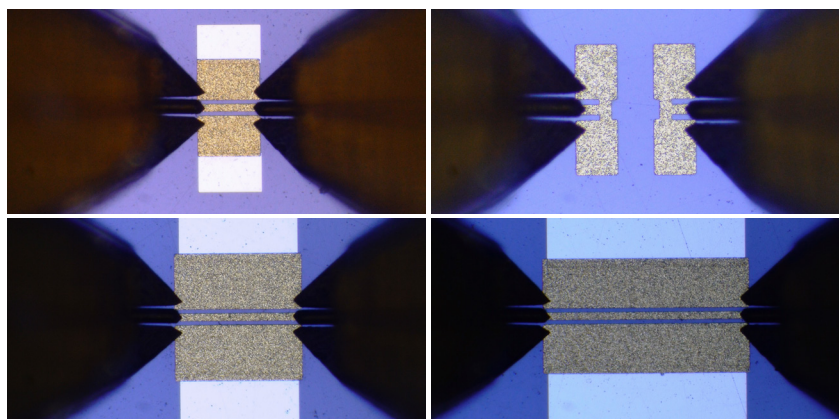


図10: CS15校正基板のコプレナ基準(左から右にthru、short、線路2、線路3)

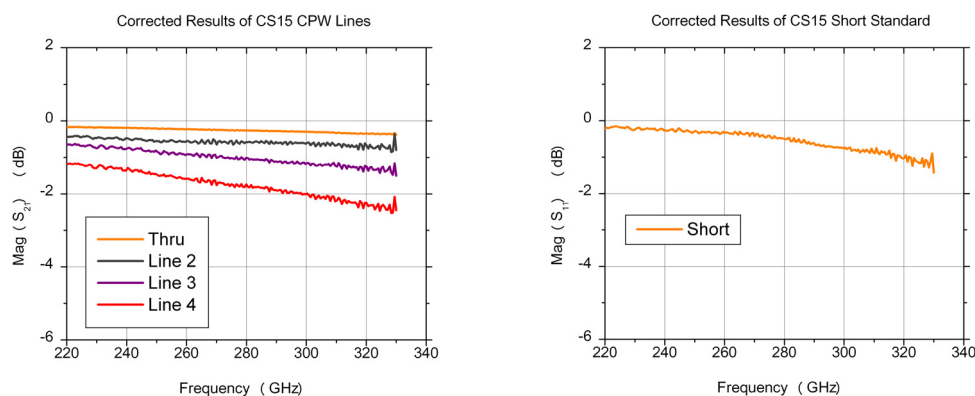


図11: CS15校正基板のコプレナ線路、short基準のマルチプルTRL補正結果

デバイスの校正および測定の不確かさについて詳細な解析が必要な場合、StatistiCAL Plusの校正結果(solution vector)を直接NISTのUncertainty Frameworkの「Calibrate DUT Plus」ツールに読み込むことができ、校正基準の不確かさを含めデバイスのパラメータの95%信頼範囲まで計算することができます。さらに校正誤差の共分散行列もStatistiCAL Plusにより保存することができます。

menu: Results¥Save to File¥Covariance Matrices (図12、13)

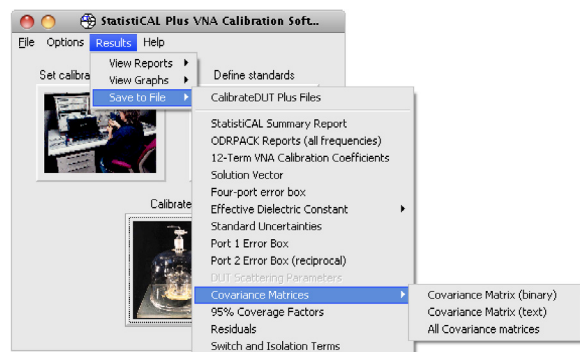


図12: StatistiCAL Plusよりの校正誤差の共分散行列のレポート

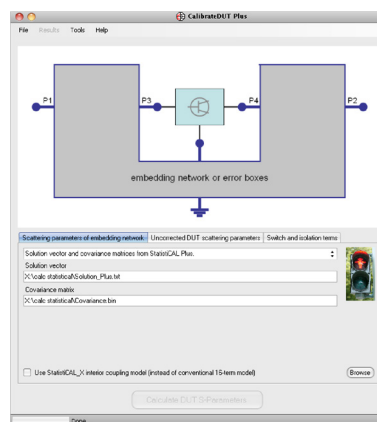


図13: NIST Uncertainty Frameworkの Calibrate DUT Plusツール

ドイツFraunhofer Institute for Applied Solid State Physics IAFにより開発された4次元325 GHz MMICを使用して測定したところ、すべての結果において±95%信頼範囲内に計算されました(図14)。図15は試用LNAのS21のSパラメータの±95%信頼範囲の測定結果を表しています。

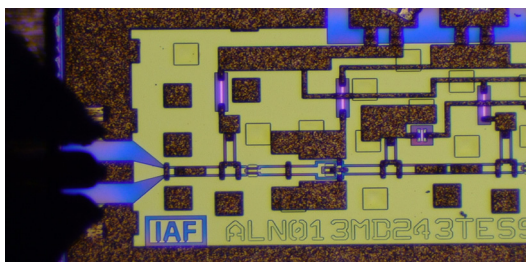


図14: 4次元325 GHz MMIC © Fraunhofer IAF

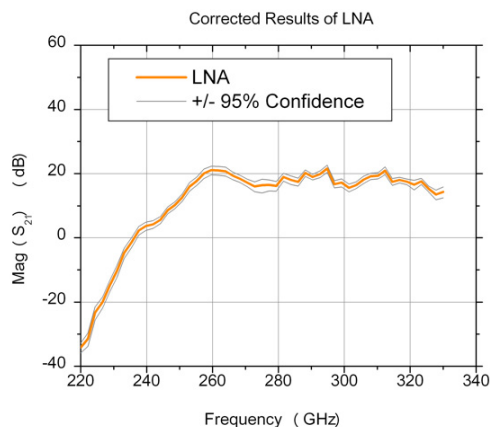


図15. マルチインTRL校正による試用MMICのSパラメータ測定結果±95%信頼範囲を実証

## 結論

オンウェー測定はTHz領域までの広域化によりシステム・インテグレーション、校正、オペレーション、データ解析についての新しいアプローチ方法の要求が高まっています。TS150-THzプローバーにはMPIのAST(Advanced Semiconductor Test)部門のRFプローブ、プロービング用アクセサリ、RF校正用ソフトウェアQAlibria®といった長年培ったRF測定技術が盛り込まれています。TS150-THzはTHz測定用にゼロから設計されたプローバーでオペレーション/構成変更の簡素化、広い測定ダイナミックレンジ、測定結果の再現性を得るための多くの革新的な機能を取り入れています。QAlibria®校正用ソフトウェアとNIST StatistiCAL Plus、Uncertainty Frameworkソフトウェアパッケージを使用することにより、業界で初めて非常に簡単に計量学レベルでシステム校正、デバイス測定、デバイス解析することを可能にしました。

モジュラー式の温度チャック、常温チャック、RFポジショナ、RFケーブル、校正基板、TITAN™RFプローブ、新しい校正手法、VNAをデバイスの位置に可能な限り近づける設計、Rohde & Schwarz社とのパートナーシップによりTS150-THzマニュアル・プローバーは複雑で精度を求められるTHzプロービングにおいて完全な測定ソリューションを提供します。

Direct contact:  
 Asia region: ast-asia@mpi-corporation.com  
 EMEA region: ast-europe@mpi-corporation.com  
 America region: ast-americas@mpi-corporation.com

MPI global presence: for your local support, please find the right contact here:  
[www.mpi-corporation.com/ast/support/local-support-worldwide](http://www.mpi-corporation.com/ast/support/local-support-worldwide)

MPI Global Presence

