

# 正確なテストフィクスチャの 特性評価とディエンベディング

## 製品：

- ▶ R&S® ZNA
- ▶ R&S® ZNB
- ▶ R&S® ZNBT
- ▶ R&S® ZND

Martin Stumpf、Greg Vaught、Andrea D'Aquino、Jörn Pfeifer | 1SL367 | バージョン 1.0 | 09.2022

コネクタ加工されていないデバイスに対しては、テストフィクスチャやプローブなどの構造物を使用して、テストセットアップの同軸インタフェースと被試験デバイス（DUT）を接続します。DUT を正確に測定するには、これらのリードイン／リードアウトを特性評価して、その影響を数学的に除去（測定結果からのディエンベディング）できるようにする必要があります。

このアプリケーションノートでは、R&S ベクトル・ネットワーク・アナライザ ZNA、ZNB、ZNBT、および ZND を用いて、そのようなリードイン／リードアウト構造を正確に特性評価してディエンベディングするための実践的なヒントを提供します。ディエンベディングは、オシロスコープなどの他のテスト機器でも不可欠です。そのため、このガイドでは、VNA を使用してリードイン／リードアウトを正確に特性評価した後で、それらを他の測定器で使用するための S パラメータファイルとしてエクスポートする手順についても説明します。

# 目次

<b>1</b>	<b>テストフィクスチャの特性評価とディエンベディング:それは何なのか、なぜ必要なのか</b> .....	<b>3</b>
1.1	VNA 測定のためのテストフィクスチャの特性評価.....	3
1.1.1	同軸の校正とディエンベディング.....	3
1.1.2	TRL 校正の制限とディエンベディングの利点.....	5
1.2	オシロスコープ測定のためのテストフィクスチャの特性評価.....	6
1.3	R&S VNA によるテストフィクスチャの特性評価とディエンベディング.....	8
<b>2</b>	<b>テストフィクスチャの特性評価とディエンベディング:動作原理、および最良の結果を取得する方法</b> .....	<b>9</b>
2.1	ディエンベディング構造.....	9
2.2	ディエンベディングワークフロー.....	9
2.3	インピーダンス補正あり／なしのディエンベディング.....	11
2.4	テストフィクスチャの性能基準.....	13
2.5	推奨される周波数範囲／掃引設定.....	14
<b>3</b>	<b>テストフィクスチャの特性評価とディエンベディングの整合性チェック</b> .....	<b>16</b>
3.1	フィクスチャモデルと「フィクスチャ - DUT - フィクスチャ」構造の TDR インピーダンスの比較.....	17
3.2	使用されているスルー2x のセルフディエンベディング.....	20
<b>4</b>	<b>参考文献</b> .....	<b>21</b>
<b>5</b>	<b>オーダー情報</b> .....	<b>22</b>

# 1 テストフィクスチャの特性評価とディエンベディング: それは何なのか、なぜ必要なのか

## 1.1 VNA 測定のためのテストフィクスチャの特性評価

### 1.1.1 同軸の校正とディエンベディング

最大の確度を実現するために、ベクトル・ネットワーク・アナライザ (VNA) はシステム誤差補正を使用しています。配線を含むVNAセットアップは通常、自動校正ユニットまたは手動校正キットを使用して同軸校正面まで校正されます。VNAは、そのシステム誤差補正を適用して、校正面までのシステムティックな再現性のある誤差を除去します。

最も一般的なセットアップでは、測定器は同軸ケーブルを介して同軸被試験デバイス (DUT) に接続されます。この場合、校正後の校正面の位置は直接、DUT の同軸コネクタになります (図1の左側のセットアップ)。

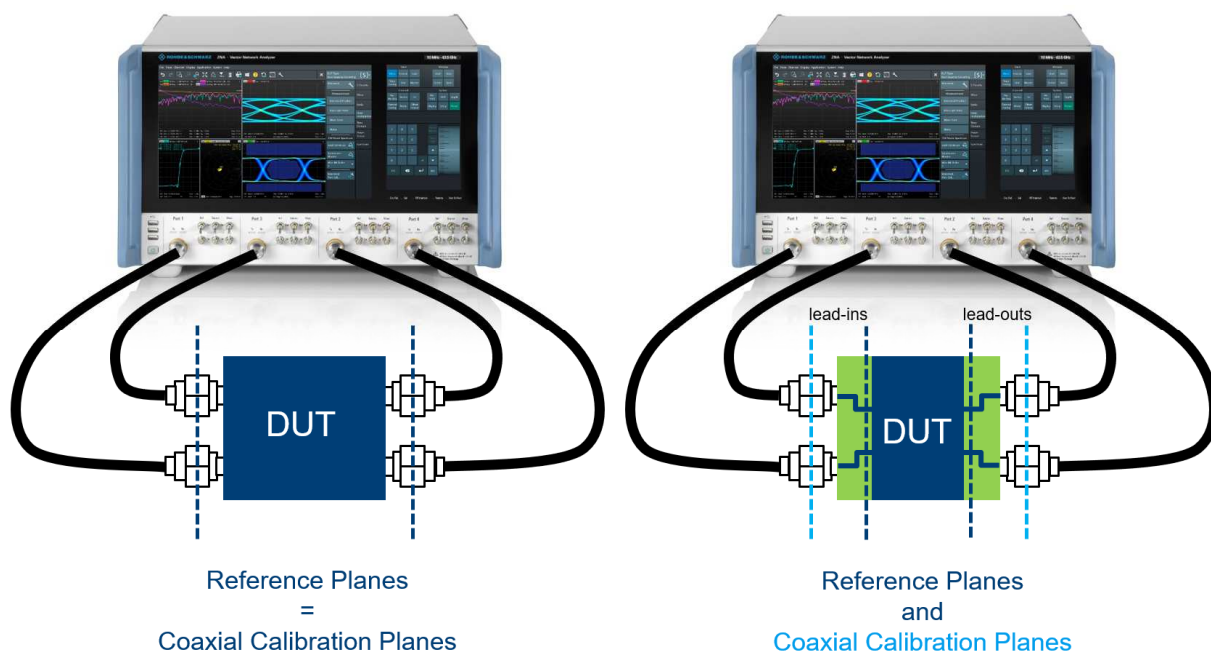


図1-DUT (同軸コネクタあり/なし) の同軸校正面と基準面を含む VNA セットアップ。

しかし、多くの場合、DUT には同軸コネクタがなく、DUT のポートに対して直接、VNA の校正を実行することはできません (図1の右側のセットアップ)。例えば、PCBの信号構造、同軸以外のコネクタ/ケーブル、コネクタ加工されていないすべてのコンポーネントがこれに当てはまります。このような場合、テストフィクスチャやプローブなどの構造物を使用して、同軸インタフェースと被試験デバイスを接続します。そのため、同軸校正面からDUTの基準面までの該当するリードイン/リードアウトを、Sパラメータによる特性評価などを用いてモデリングして、測定結果からディエンベディング (数学的に除去) する必要があります。このようなデバイスの場合、以下の2つのステップのアプローチが必要になります。

#### ステップ1:

自動校正ユニットまたは手動校正キットによる校正を、リードイン/リードアウトの同軸インタフェースで実行する。

#### ステップ2:

リードイン/リードアウトを特性評価して、それらを測定結果からディエンベディングして、基準面を同軸インタフェースからDUTポートに直接移動させる。

図 2 は、R&S®ZNB26 を用いて PCIe 5.0 CEM コネクタを測定する例です。セットアップは、同軸ケーブルの終端まで校正されています。この例では、ケーブルは 2.92 mm コネクタを備えているので 2.92 mm の自動校正ユニットが使用されています。ベースボードとアドインカードのコネクタは 2.4 mm です。そのため、ベースボード上の CEM コネクタ基準面までのリードインには、2.92 mm ~ 2.4 mm 変換アダプタと、CEM コネクタ基準面までのベースボード上の信号トレースが含まれています。同様に、アドインカード上の CEM コネクタ基準面までのリードアウトには、2.92 mm ~ 2.4 mm 変換アダプタと、アドインカード上の CEM コネクタ基準面までの信号トレースが含まれます。テスト対象の PCIe 5.0 CEM コネクタの性能を抽出するためには、リードイン／リードアウトのモデリングとディエンベディングを行う必要があります。



図 2 - R&S®ZNB26 による PCIe 5.0 CEM コネクタの測定。

図 3 に示す別の例では、R&S®ZNB8 を使用して、MultiGBASE-T1 車載イーサネット・インラインコネクタを測定しています。先と同様に、校正は同軸ケーブルの終端で実行されます。この場合、インラインコネクタの基準面までのリードイン／リードアウトには、インラインコネクタの基準面までの対応アダプタと、車載イーサネットケーブルのセクションが含まれます。テスト対象のインラインコネクタの性能を表示するためには、リードイン／リードアウトのモデリングとディエンベディングを行う必要があります。

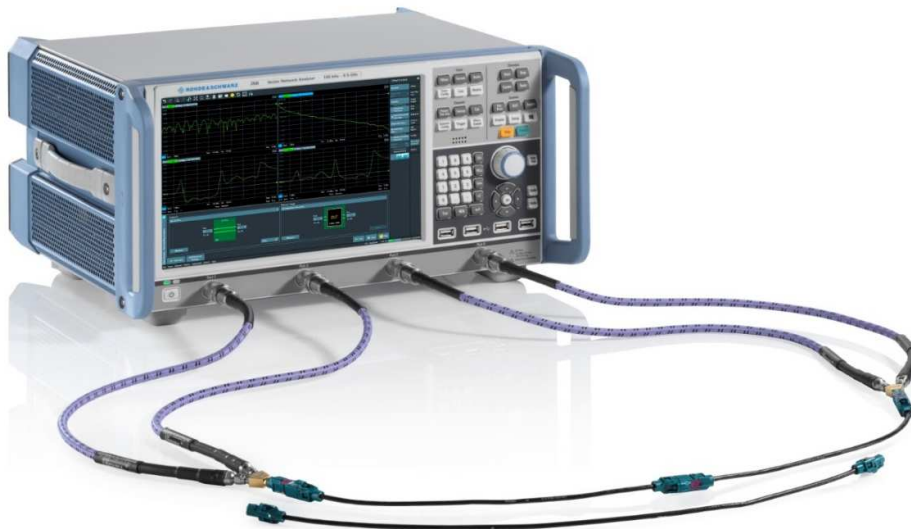


図 3 - R&S®ZNB8 による MultiGBASE-T1 車載イーサネット・インラインコネクタの測定と、対応する 2x スルーケーブル。

## 1.1.2 TRL 校正の制限とディエンベディングの利点

PCB 上のリードイン／リードアウト構造に対しては、多くの場合、TRL 校正がディエンベディングの代替手段として検討されます。この場合、校正構造には、リードイン／リードアウト構造のレプリカだけでなく、必要な TRL 基準標準（スルー、反射、ライン）が含まれます。この構造は、DUT までの実際のリードイン／リードアウトと同じ PCB に実装することができ、それを用いて、校正を DUT のポートに対して直接実行することができます。

ただし、欠点は、必要な周波数範囲に応じて通常は複数のライン標準が TRL に必要になることです。さらに、非常に長いライン標準を避けるために、低めの周波数範囲では TRL と TRM（スルー、反射、マッチ）を組み合わせるのが一般的です。TRL/TRM では必要な校正標準が多くなるため、この校正手法は、広い周波数範囲で測定する必要のある DUT では非常に面倒になります。これとは対照的に、ディエンベディングでは多くの場合、必要なのは 1 つの基準構造（例：2x スルー）のみなので、取り扱いがかなり簡単になります。

さらに、TRL/TRM 校正では、スルー／反射／ライン／マッチ標準までのリードイン／リードアウトのレプリカが、DUT までの実際のリードイン／リードアウト構造と等しいことを前提としていることも問題です。なぜならば、この前提条件は、「フィクスチャ-DUT-フィクスチャ」構造と同じ PCB にそれらを実装して最適なインピーダンス制御を適用したとしても成立しないからです。TRL/TRM 標準は常に PCB の異なる位置にあり、PCB の繊維織り構造に沿って異なる経路をとるため、トレースの長さ全体にわたるインピーダンスプロファイルは、DUT 自体に対するリードイン／リードアウトのそれとは異なります。このような相違は、リードイン／リードアウトが長い場合や信号帯域幅が高い場合に特に致命的になり、TRL/TRM 校正による測定精度を大幅に低下させます。このような場合に多大な利点をもたらすのが、インピーダンス補正ありのディエンベディング（[セクション 2.3](#) を参照）です。使用される TRL/TRM 校正標準のリードイン／リードアウトレプリカのインピーダンスプロファイルとは異なる独自のインピーダンスプロファイルを用いて DUT の実際のリードイン／リードアウトを正確にモデリングします。

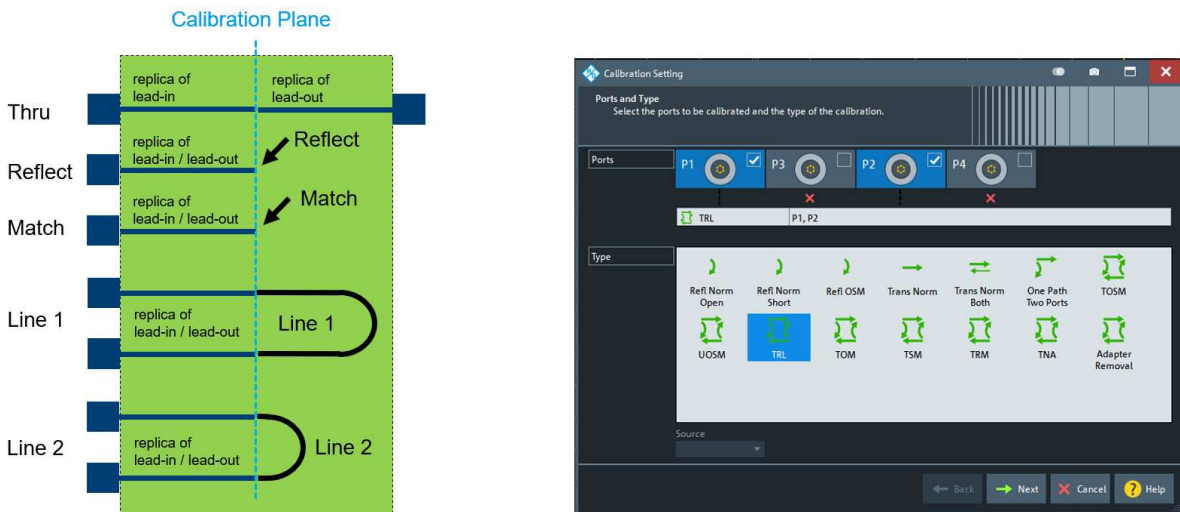


図 4 - シングルエンド測定用の TRL 校正標準と、R&S®ZNA、R&S®ZNB、R&S®ZNBt、R&S®ZND での TRL 校正の選択。

## 1.2 オシロスコープ測定のためのテストフィクスチャの特性評価

オシロスコープやその他のテスト機器による測定では、多くの場合、リードイン／リードアウト構造を介してテスト機器と被試験デバイスが接続されます。基準面を DUT にするためにはこの構造をディエンベディングする必要があります。最高の確度を実現するためには、一般的にベクトル・ネットワーク・アナライザを用いてリードイン／リードアウトの特性評価を実行します。

図 5 に、テストボード上のシステム・オン・チップ (SoC) の一般的なセットアップを示します。通常 SoC は、PCB にはんだ付けされているボールで測定する必要があります。タイのパンプまでの測定も関心の対象になる場合があります。どちらの場合でも、VNA を使用してテスト機器 (オシロスコープ、任意波形発生器など) から必要な基準面までの信号経路を最適に特性評価することができます。次に、結果として得られた S パラメータを VNA からオシロスコープまたは AWG にエクスポートします。各測定器は S パラメータを使用して基準面をパッケージ、またはダイまで移動させます。

ここでの新たな課題は、オシロスコープや AWG でのディエンベディングには DC (0 Hz) までの S パラメータファイルが必要になることです。しかし、ベクトル・ネットワーク・アナライザでは DC までの測定はできません。そのため、VNA による正確で完全なリードイン測定では、高度な DC 外挿を含めて、低周波領域で信号経路を正確にモデリングし、S パラメータを DC ポイントまで計算する必要があります。

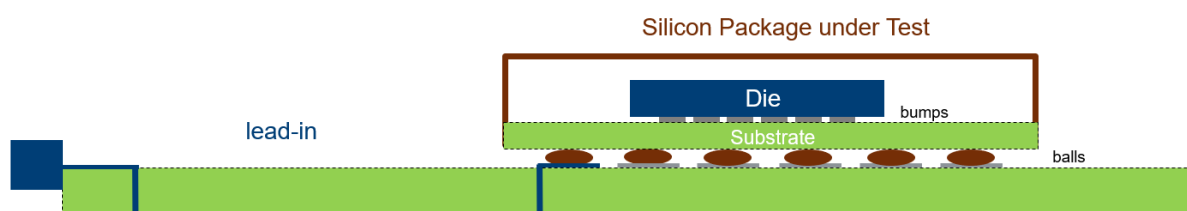


図 5- オシロスコープによる SoC 測定。正確なディエンベディングのためには、一般的にリードインを VNA で測定する必要があります。

SoC までの信号トレースの測定は、多くの場合、PCB プロブを用いて SoC が不在の状態で行われます。プロブを SoC 下部のはんだパッドに接続して、プロブと同軸コネクタを結ぶトレースの S パラメータを VNA で測定します。関連するグランドパッドの可用性に応じて、一般的に GSSG 構造または SS 構造のフットプリントを備えたプロブを使用します。図 6 に、SS プロブを使用した例を示します。この例では、1x オープン（プロブピンをオープン）と 1x ショート（プロブピンをショート）を使用してプロブを特性評価します。その後、プロブを測定からディエンベディングすると、最初は基準面の位置がプロブチップになります。R&S ディエンベディングソリューションの詳細設定にある "Scaling for flight time" パラメータを使用すると（図 7 を参照）、基準面を少しだけ前方、または後方にずらすことができます。良好なディエンベディング結果を得るには、基準面を前方に少しだけずらして、それがリードインに含まれるようにすることをお勧めします。こうすることで、基準面から不連続性（プロブチップ／はんだパッド）までの間にある程度の距離を確立でき、測定結果の確度が向上します。もう 1 つの課題は、プロブチップとパッド間の接触抵抗が変化することによる効果です。プロブの接触抵抗は、ディエンベディング基準構造（この場合、1x オープンと 1x ショート）に接続されたときと、DUT までの実際のリードインではんだパッドに接続されたときとは、異なる値を持つようになります。すると、使用されるディエンベディング基準構造までと、実際のリードインまでのプロブの信号経路に異なるインピーダンスプロファイルが発生し、従来のディエンベディングは確度に影響を受けます。これは、インピーダンス補正ありのディエンベディングを使用すれば解決することができます（[セクション 2.3](#) を参照）。

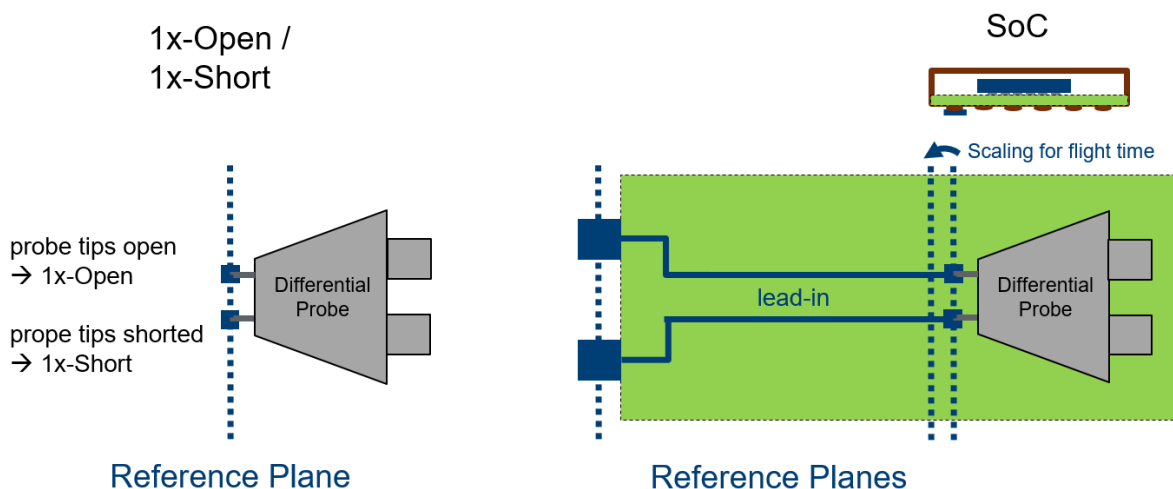


図 6 - SS プロブを用いた SoC までのリードインの測定。プロブを特性評価するために、1x オープンおよび 1x ショート構造を使用しています。最適なディエンベディング結果を得るために、基準面をリードイン側にわずかにずらしてプロブチップから離れるようにしています。

図7に、デモ PCB の測定例を示します。プローブを測定からディエンベディングして、その結果として得られる信号トレースの S パラメータを DC まで外挿しています。右側のスクリーンショットに、R&S®ZNX-K220/ISD で "Scaling for flight time" および "DC extrapolation" を選択した場合の詳細設定の例を示します。

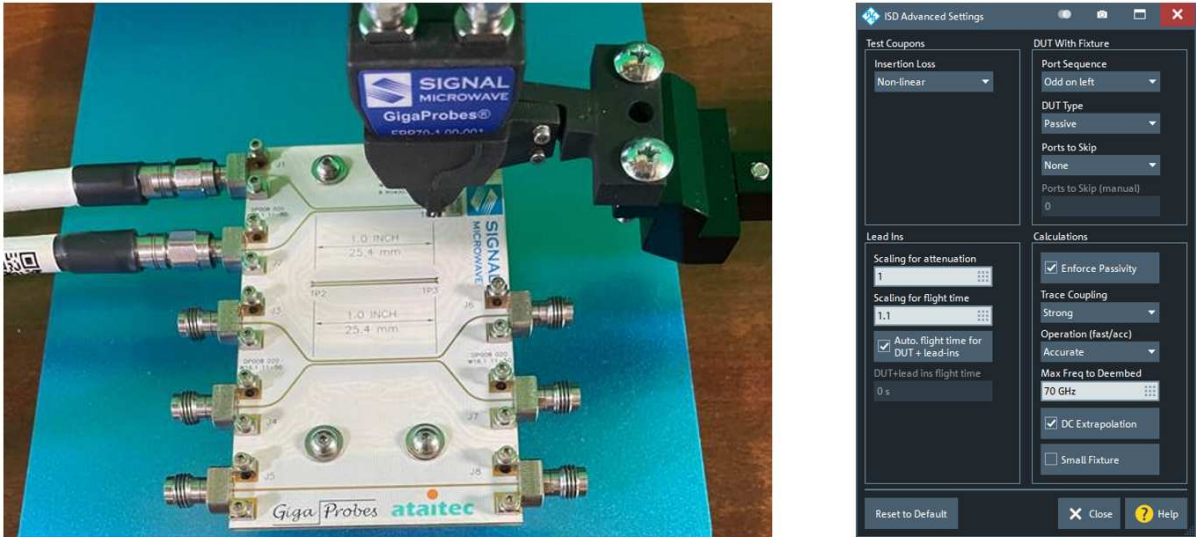


図7-VNAによるPCB信号トレースの測定。信号トレースを正確に測定するために、プローブを特性評価して測定からディエンベディングしています。

### 1.3 R&S VNA によるテストフィクスチャの特性評価とディエンベディング

テストフィクスチャの特性評価およびディエンベディングのプロセスを簡素化するために、ローデ・シュワルツは、ディエンベディングワークフローを R&S®ZNA、ZNB、ZNB-T、ZND ベクトル・ネットワーク・アナライザに統合しました。ワークフローの実装は、DUT、テストフィクスチャ、および使用されるディエンベディング構造の選択を定義するための支援を行い、ユーザーはそのガイドに従ってディエンベディングプロセス全体を進めることができます。

ローデ・シュワルツが統合した業界最高のディエンベディングツールを以下に示します。これらのアルゴリズムは、IEEE Std 370 の開発中に集中的に使用されてきました。

- R&S®ZNX-K210 : IEEE Std 370 により提供される Open Source De-embedding (EZD – Easy De-embedding) アルゴリズムのワークフロー統合。
- R&S®ZNX-K220 : AtaiTec 社の In-Situ De-embedding (ISD) アルゴリズムのワークフロー統合。
- R&S®ZNX-K230 : Clear Signal Solutions 社の Smart Fixture De-embedding (SFD) アルゴリズムのワークフロー統合。



## 2 テストフィクスチャの特性評価とディエンベディング: 動作原理、および最良の結果を取得する方法

### 2.1 ディエンベディング構造

テストフィクスチャのモデリングと特性評価には、多くの場合、ディエンベディング構造（ディエンベディングクーポン）と呼ばれる基準構造が必要です。これは、「フィクスチャ-DUT-フィクスチャ」構造のリードイン／リードアウトのレプリカである必要があります。一般的に、以下のディエンベディング構造が使用されており、2x スルークーポンが最も一般的です。

- 2x スルー：DUT に対する基準面におけるリードイン／リードアウトをミラーリングする基準構造。
- 1x オープン：DUT における基準面に対するリードイン／リードアウトのレプリカになる基準構造。オープンで終端。
- 1x ショート：DUT での基準面に対するリードイン／リードアウトのレプリカになる基準構造。ショートで終端。

リードイン／リードアウトの構造が左右対称の場合は、左側と右側に同じディエンベディングクーポンを使用することができます。リードイン／リードアウトが異なる場合は、別々のクーポンを使用する必要があります（図 8 参照）。

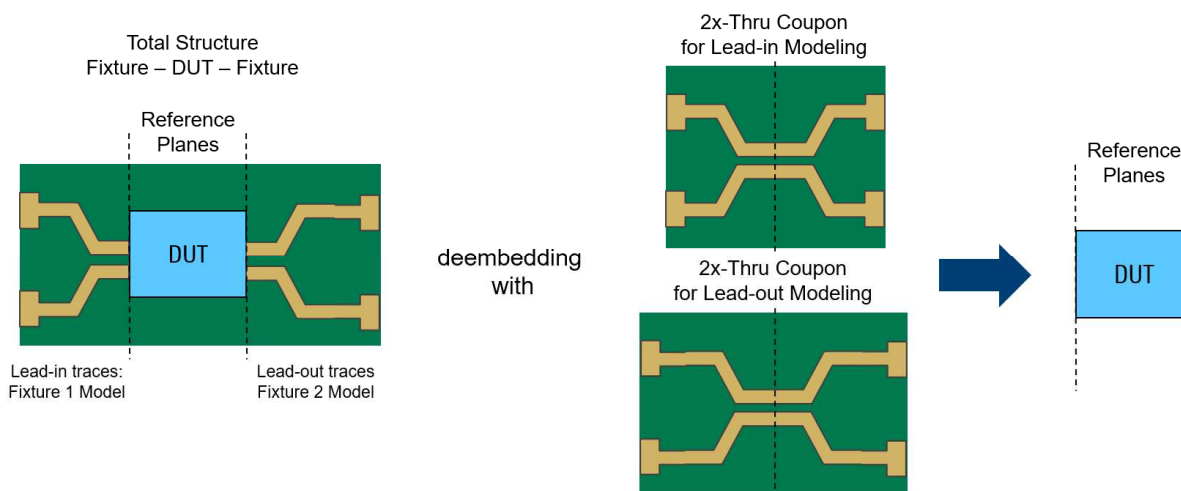


図 8 - 非対称構造の例。テストフィクスチャの特性評価とディエンベディングのために、2x スルークーポンを使用します。リードインとリードアウトのトレースが異なるため、ディエンベディングのために別々のクーポンが必要になります。

### 2.2 ディエンベディングワークフロー

R&S®ZNA、ZNB、ZNBТ、ZND のディエンベディングアシスタントに従ってユーザーはディエンベディングワークフローを進めることができます。最初に「フィクスチャ-DUT-フィクスチャ」構造のトポロジを設定します。ここでは、DUT のタイプと、テストフィクスチャの特性を定義します。図 9 に、差動入出力を備えた平衡 DUT の例を示します。リードインとリードアウトは結合されていません。すなわち、ディエンベディングのために、s2p ファイルを使用してシングルエンドモデルによる特性評価を行います。この例の構造全体は左右対称なので、同じクーポンを使用して左側（リードイン）と右側（リードアウト）のフィクスチャを特性評価することができます。



図 9 - 「フィクスチャ-DUT-フィクスチャ」構造のトポロジー構成。

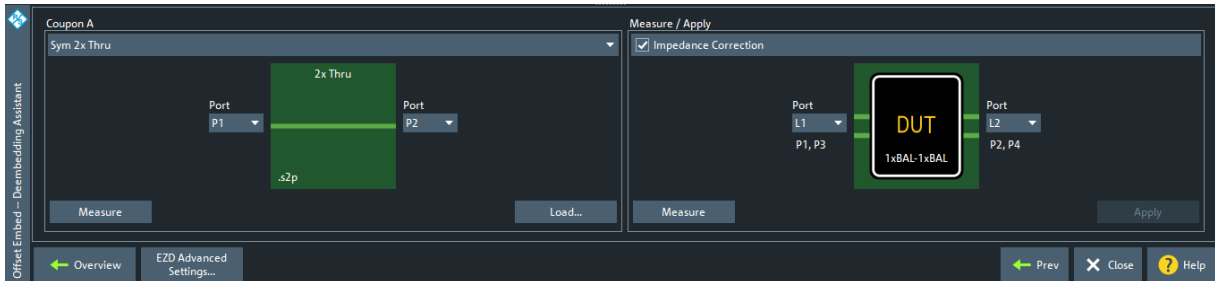


図 10 - インピーダンス補正ありのディエンベディングを行うためのディエンベディングワークフロー。図 9 のトポロジー構成に従います。

トポロジーに基づき、図 10 のディエンベディングワークフローが示すガイドに従って、ユーザーは以下に示す 3 つのステップを実行します。インピーダンス補正ありのディエンベディングを行う場合は、これら 3 つのステップのすべてが必要です。インピーダンス補正なしの従来のディエンベディングでは、ステップ 2 がスキップされます。

### 1.) ディエンベディング構造の選択と測定：

一般的に実装しやすいのは、リードイン/リードアウトをミラーリングする 2x スルークーポンです。正確で明確なディエンベディング構造を提供します。これは、フィクスチャのモデリングにおいて最良の結果を提供するので、ディエンベディングの第一候補となる構造です。

2x スルークーポンを用意できない場合や使用できない場合は、1x オープンクーポン、または 1x ショートクーポンを使用します。1x オープンクーポンも実装しやすい構造です。ただし、フリッジ効果が不明確なため、ディエンベディング結果の確度が最も低くなり、主に 2x スルークーポンや 1x ショートクーポンを使用できない場合に使用されます。1x ショートクーポンを使用した方が良好な結果を取得できます。1x オープンクーポンと 1x ショートクーポンを組み合わせると、さらに確度が向上し、場合によっては 2x スルークーポンが実現できるレベルまで達することもあります。

### 2.) 構造全体の測定：

インピーダンス補正ありのディエンベディングには、第 2 のステップが必要になります。「フィクスチャ DUT フィクスチャ」構造全体を測定し、実際のリードイン/リードアウトのインピーダンスプロファイルを用いてフィクスチャモデルを導きます。インピーダンス補正なしの従来のディエンベディングではディエンベディング構造（例：2x スルークーポン）のみを使用してフィクスチャモデルを導くため、このステップはスキップされます。そのインピーダンスプロファイルは、使用されているディエンベディング構造（例：使用されている 2x スルークーポン）に一致します。ただし、実際に DUT に接続されるリードイン/リードアウトのインピーダンスプロファイルではありません。それらのプロファイルは、一般的にかなり異なります。そのため、インピーダンス補正なしの従来のディエンベディングでは、リードイン/リードアウトを測定から完全に除去することはできません。多くの場合、ディエンベディング結果にファントムリム（実体がなく不要な特性）が現れます（[セクション 2.3](#) 参照）。

### 3.) テストフィクスチャのモデリングとディエンベディング

"Apply"ボタンを押すと、ディエンベディングツールが、ディエンベディングクーポンと「フィクスチャ-DUT-フィクスチャ」構造全体の測定に基づいてリードイン/リードアウトのモデルとそれに関連するSパラメータを計算します。詳細設定で外挿(extrapolation)を選択した場合は、DCポイントまでの外挿も実行されます。その後、リードイン/リードアウトのSパラメータがVNAのディエンベディングエンジンに読み込まれます。オシロスコープやAWGなどの別の測定器でのディエンベディングにSパラメータが必要な場合は、SパラメータをVNAからそれらの測定器にエクスポートすることができます。

## 2.3 インピーダンス補正あり/なしのディエンベディング

実際には、ディエンベディングクーポンの実装が、DUTまでのリードイン/リードアウトと等価なレプリカになることはありません。その理由は、PCB製造プロセスに一般的な許容範囲があるため、また、PCB上の位置や配線によってPCB信号トレースの特性が異なるためです。信号トレースの長さにはわたるインピーダンスプロファイルは、例えば、PCBの繊維織り構造に対する位置や向き、あるいは、ボードの層やビア構造間を通る配線によって異なります。同じことがケーブルにも当てはまります。ケーブルインピーダンスは決して同じではなく、常に一定の許容範囲に従います。

インピーダンス補正なしの従来のテストフィクスチャモデリングでは、ディエンベディングクーポンが、「フィクスチャ-DUT-フィクスチャ」構造のリードイン/リードアウトと等価なレプリカであり、それらが同じインピーダンスプロファイルを持つことを前提としています。そのため、テストフィクスチャモデルは、ディエンベディングクーポン自体からしか作成されません。

特に最新テクノロジーにおける高い帯域幅では、この前提条件はもはや正しくなく、結果の確度に多大な影響を及ぼします。ディエンベディング結果の品質を左右するのは、フィクスチャモデルの確度と、実際のリードイン/リードアウトのインピーダンスプロファイルを表す正確さの程度です。そのため、業界では、インピーダンス補正ありのディエンベディングが一般的に推奨されるようになってきました。R&S ZN<sub>x</sub>-K210 (EZD)、ZN<sub>x</sub>-K220 (ISD)、ZN<sub>x</sub>-K230 (SFD)などの最新のディエンベディングツールは、実際のインピーダンスプロファイルを用いて「フィクスチャ-DUT-フィクスチャ」構造のリードイン/リードアウトをありのままにモデリングし、非常に正確な結果を提供します。それを実現するために、インピーダンス補正ありのディエンベディングでは、ディエンベディングクーポンの測定だけでなく、構造全体の測定も求められます。これは、対応するテストフィクスチャモデルを導くためです。

インピーダンス補正を使用する必要がないのは、クーポンとフィクスチャの構造が等価である場合のみです。そのような例に、DUTがテストソケット、または直接ボードに配置されているテストボードがあります。クーポンを測定するにはDUTを取り外し、「フィクスチャ-DUT-フィクスチャ」構造全体を測定する場合にはDUTを装着することができます。テストソケットとDUT間の接触抵抗が変化する可能性を考えなければ、インピーダンス補正なしのディエンベディングで十分な場合があります。それでも、インピーダンス補正ありのディエンベディングと結果を比較して、接触抵抗の変化による効果の有無を評価することを強くお勧めします。

図3のMultiGBASE-T1車載イーサネット・インラインコネクタは、インピーダンス補正ありのディエンベディングが必要になる代表的な例です。図11に示されているとおり、ケーブルインピーダンスは、リードインが98Ω、リードアウトが102Ω、および2xスルーが100Ωで、等しくありません。インピーダンス補正なしの従来のディエンベディングを使用すると、使用されている2xスルーケーブルのケーブルインピーダンスである100Ωが影響するため、リードイン/リードアウトが誤ってモデリングされ、ディエンベディング結果にファントムリムが含まれるようになります(図12)。インピーダンス補正ありのディエンベディングを使用すれば、リードイン/リードアウトがそれらの実際のインピーダンスプロファイル(リードインが98Ω、リードアウトが102Ω)により正しくモデリングされます。ディエンベディング結果には、ファントムリムを含まないインラインコネクタの真の挙動が表示されます(図13)。

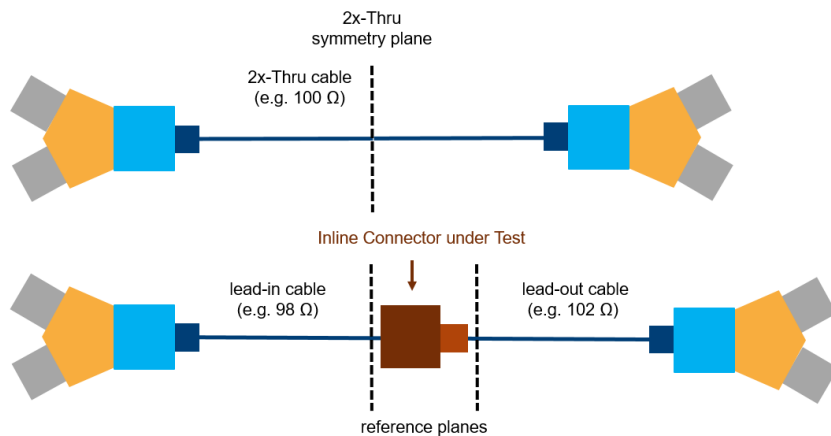


図 11 - MultiGBASE-T1 車載イーサネットのインラインコネクタの測定例 (図 3)。インピーダンス補正ありの場合となしの場合のディエンベディング結果を比較します。テストフィクスチャを正確にモデリングするために、インラインコネクタの不連続部からある程度離れた位置に基準面を配置します。そのため、ディエンベディング結果には、コネクタ両側の短いケーブル部分が含まれます。2x スルーケーブルは、基準面でのリードイン/リードアウトケーブルをミラーリングすることで導かれます。



図 12 - インピーダンス補正なしの従来のディエンベディング：左の図には、構造全体のインピーダンスプロファイルが表示されています。これには、リードインの 98 Ω インピーダンスプロファイルと、リードアウトの 102 Ω インピーダンスプロファイルだけでなく、中央のインラインコネクタも含まれています。左のフィクスチャのモデル (中央の図：緑色トレース) は、2x スルーケーブルから直接作成されるもので、100 Ω インピーダンスプロファイル (中央の図：青色トレース) に一致しています。リードインは正しくモデリングされませんが、リードアウトも同様です。右の図では、ディエンベディング結果にファントムリムが残っています。リードインとリードアウトが適切に除去されていないことがわかります。

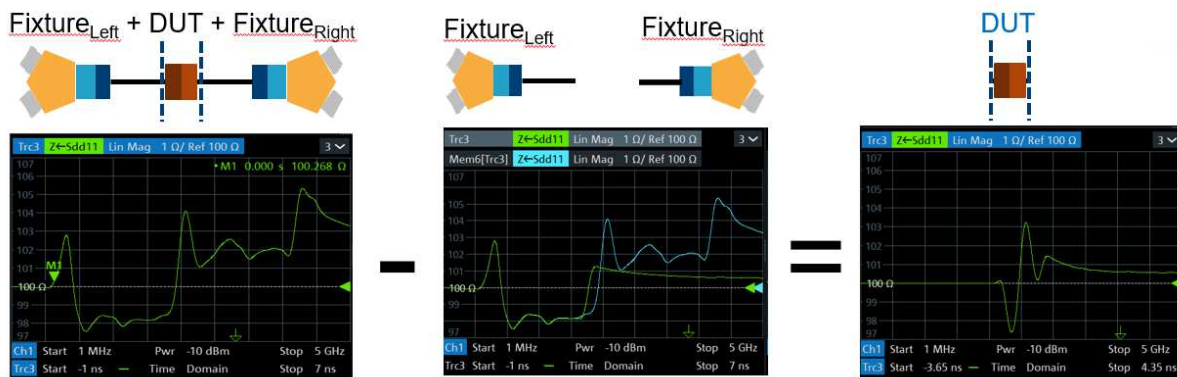


図 13 - インピーダンス補正ありのディエンベディング：左の図には、先と同様に構造全体のインピーダンスプロファイルが表示されています。これには、リードインの 98 Ω インピーダンスプロファイルと、リードアウトの 102 Ω インピーダンスプロファイルだけでなく、中央のインラインコネクタも含まれています。左のフィクスチャのモデル (中央の図：緑色トレース) は適切に作成されており、リードインの 98 Ω インピーダンスプロファイル (中央の図：青色トレース) に一致しています。これはリードアウトも同様です。右

の図では、ディエンベディング結果にファントムリムが残っていません。リードインとリードアウトが完全に除去されていることがわかります。インラインコネクタとコネクタ両側の短いケーブル部分の真の特性が表示されています。

## 2.4 テストフィクスチャの性能基準

良好なディエンベディング結果を取得するには、適切なテストフィクスチャと、正確にインピーダンスを補正できる適切なディエンベディングツールが必要です。

理想的なケースは、「フィクスチャ-DUT-フィクスチャ」構造全体の中のテストフィクスチャのリードイン/リードアウトが理想的な特性（低挿入損失、高リターンロス、低クロストーク、低モード変換）で、使用されるディエンベディングクーポンが構造全体のリードイン/リードアウトの理想的なレプリカであり、そのトレース長さの全体にわたるインピーダンスプロファイルが同じである場合です。したがって、ディエンベディングクーポンは、トレースを同じ方向に向けて同じ PCB 上に実装し、同じ PCB 層に配線し、構造全体と同じ層遷移と開始テストポイントを使用する必要があります。

しかし、テストフィクスチャの設計に最大の努力を払ったとしても、このような理想的な条件はある程度までしか満たすことができません。上述のようなテストフィクスチャの設計基準に加えて、IEEE Std 370 は、クラス A、B、C という 3 種類のクラスをテストフィクスチャに定義しています。クラス A が最も厳格な設計要件で、クラス C が最も寛容です。同程度のディエンベディング結果を得る場合、クラス A のフィクスチャは比較的単純なディエンベディングツールでディエンベディングすることができます。これに対して、クラス C のフィクスチャには最も高度なツールが必要です。テストフィクスチャの特性は周波数によっても変化し、テストフィクスチャは、多くの場合、クラス A/クラス B が低周波用でクラス B/クラス C が高周波用です。そのため、より高度なディエンベディングツールを用いれば、既定のテストフィクスチャを高周波まで使用することができます。

以下の表 1 に、IEEE Std 370 に準拠したフィクスチャの性能特性を示します。

	クラス A の リミット	クラス B の リミット	クラス C の リミット
2x スルーの挿入損失	-10 dB	-15 dB	-15 dB
2x スルーのリターンロス	-20 dB	-10 dB	-6 dB
2x スルーの挿入損失と リターンロスの差	5 dB	0 dB	0 dB
「フィクスチャ-DUT-フィクスチャ」 クロストークと「フィクスチャ-フィク スチャ」クロストークの差 (ドッグレッグ/スパイダーレッグ型 構造を使用)	6 dB	6 dB	6 dB
2x スルークーポンと 実際のリードイン/リードアウト間の インピーダンス変化	±2.5 %	±5 %	±10 %
リードイン/リードアウト/2x スルー の半分の間隔のライン間または ペア間のスキュー	1/(10 x fmax) (50 GHz の場合： 2 ps)	1/(10 x fmax) (50 GHz の場合： 2 ps)	1/(10 x fmax) (50 GHz の場合： 2 ps)
2x スルーの最短の長さ	3 波長 (最高周波数)	3 波長 (最高周波数)	3 波長 (最高周波数)
ミックスモード・ディエンベディング の追加要件： 差動 コモンモードの変換損失と 挿入損失の差	-15 dB	-15 dB	-15 dB

表 1 - IEEE Std 370 に準拠するフィクスチャの電氣的要件 (FER)

2x スルー測定の例を以下の図 14 に示します。リターンロス (S11) は -20 dB から -10 dB の範囲内なので、表 1 によれば、これは全周波数範囲でクラス B になります。挿入損失 (S21) は -10 dB を超えることがないので、これはクラス A の性能を示しています。35 GHz 付近で挿入損失からリターンロスを引いた値が 5 dB を超えるようになるため、これは 35 GHz 未満ではクラス A 性能を示していると言えます。全体としては、リターンロス性能に基づいて、10 MHz~40 GHz の全範囲で、これはクラス B のテストフィクスチャであると考えられます。

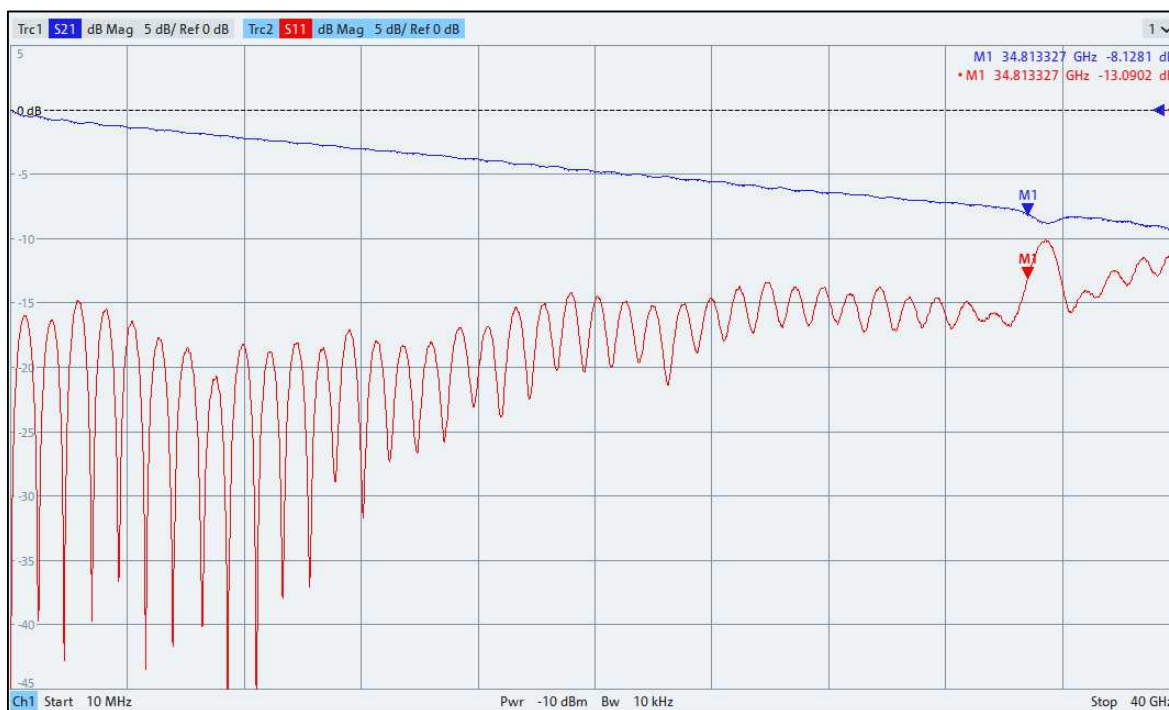


図 14 - テストフィクスチャの性能検証：R&S®ZNA43 により、PCIe 5.0 CEM コネクタ・テスト・フィクスチャの 2x スルーを測定。

## 2.5 推奨される周波数範囲／掃引設定

ディエンベディングアルゴリズムは、周波数ドメイン測定をタイムドメインに変換して、使用されているテストフィクスチャのモデルを導きます。周波数範囲が高いほどタイムドメイン分解能が高くなるため、フィクスチャモデルの確度も向上します。したがって、最高のディエンベディング結果を得るには、たとえ DUT 自体は低周波領域までしか測定する必要がない場合でも、高度なディエンベディングツールを選択して、クラス A、B、C のリミットを満たす全周波数範囲でフィクスチャをモデリングすることが推奨されます。図 2 および図 14 の PCIe 5.0 CEM コネクタの例では、コネクタを 24 GHz まで検証する必要があります。この場合、2x スルーと「フィクスチャ-DUT-フィクスチャ」構造全体を 24 GHz まで測定すれば、十分に適切なテストフィクスチャモデルと良好なディエンベディング結果を得ることはできますが、テストフィクスチャを 40 GHz まで特性評価すれば、テストフィクスチャモデルとディエンベディング結果の確度をさらに向上させることができます。

VNA の周波数掃引のステップサイズも重要なパラメータです。これは、タイムドメイン測定の明白な範囲を定義するもので、想定される最大のフライトタイム（構造体の電気長）に従って選択する必要があります。良好なディエンベディング結果を得るには、送信測定で位相 360°当たりのポイント数が十分になるような狭いステップサイズを選択する必要があります。最小限、位相変化 360°当たり 8 個以上のポイント、すなわち、最高の周波数ポイントに対する構造体の 1 波長当たり 8 個以上のポイントが必要です。例えば、40 GHz まで特性評価される構造体でフライトタイムが 2 ns の場合は、この最大周波数に対応する長さが  $2 \text{ ns} / (1/40 \text{ GHz}) = 80$  波長になるので、少なくとも  $8 \times 80 = 640$  ポイントを測定する必要があります。ただし、ディエンベディングの確度を向上させるためには、より多数の掃引ポイントを使用することを強く推奨します。

テストフィクスチャで使用可能な周波数範囲で最大のタイムドメイン分解能を実現するために、ディエンベディングアルゴリズムは通常、ローパスモードを適用して周波数ドメインをタイムドメインに変換します。これを使用するには、掃引を高調波グリッドで定義する必要があり、その場合、スタート周波数は VNA のステップサイズの整数倍になります。そうすることで、ローパスモードにより、DC ポイントを抽出して、負の周波数をミラーリングできるようになるので、実効 TDR 分解能が 2 倍になり、フィクスチャモデルの分解能も向上します。

以上に基づく、VNA に推奨される掃引設定は以下のようになります。

#### **スタート周波数およびステップサイズ：**

スタート周波数とステップサイズは一般的に等しく、構造体の想定される最大電気長と、周波数ドメインに必要な分解能に基づいて選択されます。最も使用される値は 10 MHz です。

#### **ストップ周波数**

ストップ周波数はできるだけ高い必要があり、クラス A、B、または C のリミットを満たすテストフィクスチャの周波数範囲をフルに使用します。少なくとも DUT の最大周波数と同じか、それ以上に高くする必要があります。高調波グリッドが求められるため、ストップ周波数はステップサイズの整数倍である必要があります。

ディエンベディングアルゴリズムに必要な最小限のタイムドメイン分解能を実現するために、フルスパン ( $f_{\text{stop}} \sim f_{\text{start}}$ ) を 4 GHz より広くする必要があります。

### 3 テストフィクスチャの特性評価とディエンベディングの整合性チェック

通常、被試験デバイスの特性は未知なので、多くの場合、ディエンベディングされた DUT の測定結果を元にして、フィクスチャモデルの品質やディエンベディングプロセスの確度を判断することは困難です。そのため、IEEE Std 370 は、ディエンベディングプロセスそのものの整合性を検証するために使用できる特定のテストをリストにまとめています。以下で説明する手法は、IEEE Std 370 に標準として指定されているもので、業界で広く使用されています。

以下のサンプル測定は、R&S ディエンベディング・デモ・ボード上で「フィクスチャ-DUT 2A-フィクスチャ」構造と「フィクスチャ-DUT 2B-フィクスチャ」構造を用いて実行されています（図 15 および図 16 参照）。「フィクスチャ-DUT 2A-フィクスチャ」構造では、リードイン/リードアウトが 2x スルーのインピーダンスプロファイルに一致するように設計されています。「フィクスチャ-DUT 2B-フィクスチャ」構造では、不整合インピーダンスの効果を表示してインピーダンス補正がある場合とない場合のディエンベディングプロセスを比較するために、2x スルーよりもリードインは 5% 高いインピーダンスに、リードアウトは 5% 低いインピーダンスになるように意図的に設計されています。

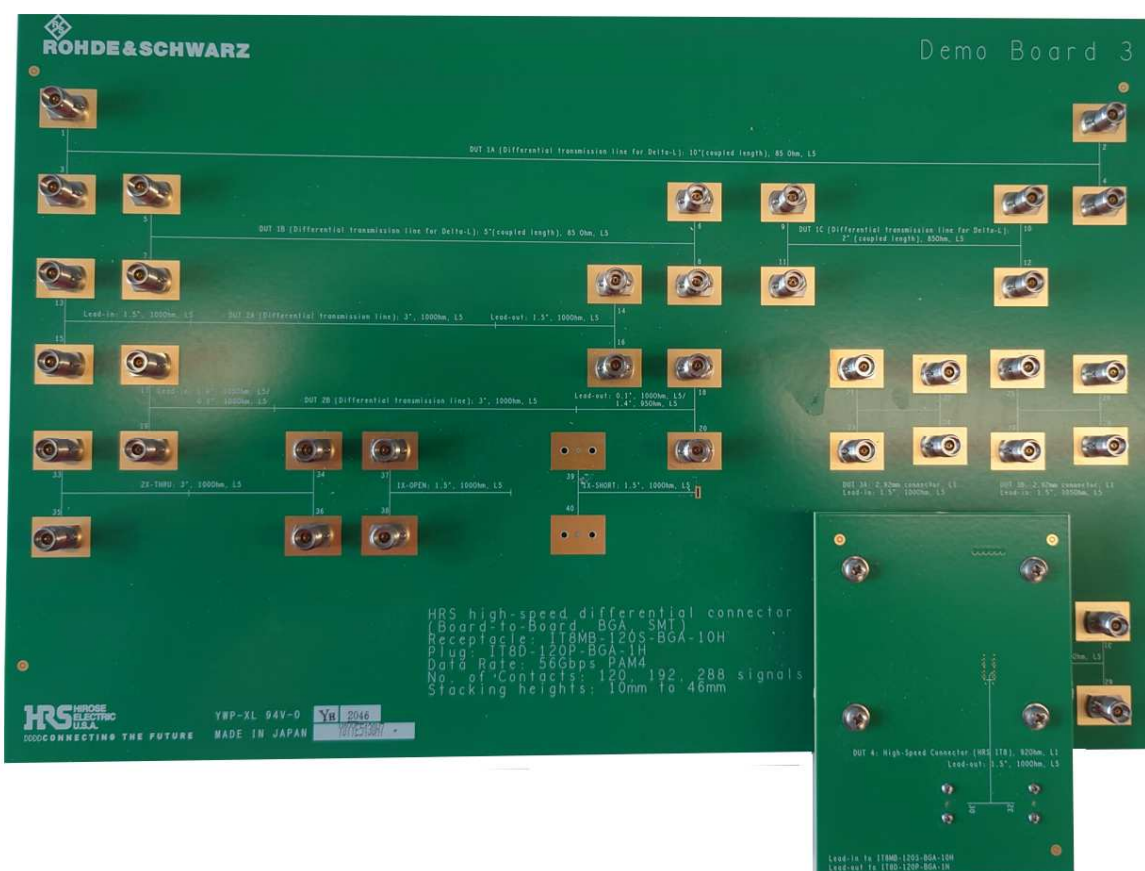


図 15 - 差動信号構造の R&S ディエンベディング・デモ・ボード。



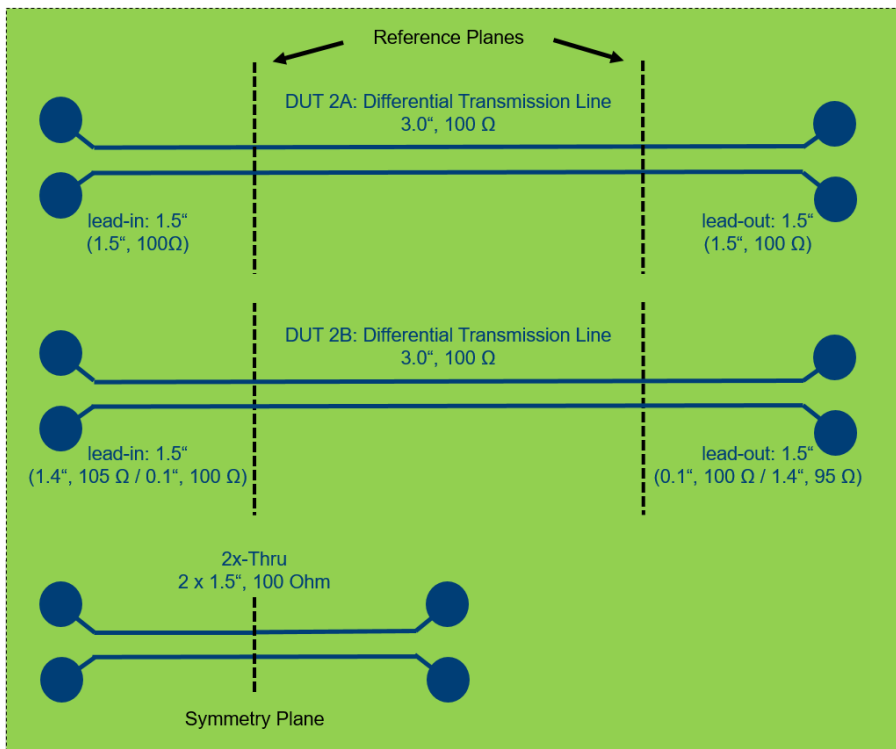


図 16-R&S ディエンベディング・デモ・ボード：「フィクスチャ-DUT 2A-フィクスチャ」構造、「フィクスチャ-DUT 2B-フィクスチャ」構造、使用される 2x スルークーポンの回路図。すべてのインピーダンスは公称値です（許容誤差は±10%）。

### 3.1 フィクスチャモデルと「フィクスチャ-DUT-フィクスチャ」構造の TDR インピーダンスの比較

良好なディエンベディング結果を得るために、ディエンベディングツールは「フィクスチャ-DUT-フィクスチャ」構造のリードイン/リードアウトを正確にモデリングするだけでなく、それらの実際のインピーダンスプロファイルを示す必要もあります。それらの一致度が高いほど、モデルの品質は高くなり、ディエンベディング結果の確度も向上します。したがって、整合性テストとして非常に有用なのは、左側（リードインの「フィクスチャ 1」モデル）と右側（リードアウトの「フィクスチャ 2」モデル）で導かれたフィクスチャモデルの TDR インピーダンスと、「フィクスチャ-DUT-フィクスチャ」構造の実際のリードイン/リードアウトの TDR インピーダンスを比較するために、次を表示することです。

- 「フィクスチャ 1」モデルと「フィクスチャ-DUT-フィクスチャ」構造の TDR インピーダンス
- 「フィクスチャ 2」モデルと反転「フィクスチャ-DUT-フィクスチャ」構造の TDR インピーダンス

使用されている 2x スルーと比較するために、使用されている 2x スルークーポンの TDR インピーダンスと、「フィクスチャ-DUT-フィクスチャ」構造の TDR インピーダンスを表示することも役立つ場合があります。これには、使用されている 2x スルーと、構造全体における実際のリードイン/リードアウトのインピーダンスプロファイルの相違と、フィクスチャモデリングにおけるインピーダンス補正の性能が表示されます。

#### 例 1：R&S ディエンベディング・デモ・ボード上の「フィクスチャ-DUT 2A-フィクスチャ」構造

図 17 に表示されているのは、左側（リードイン）から見たインピーダンスプロファイル（Z←Sdd11）です。「フィクスチャ-DUT 2A-フィクスチャ」構造（赤色トレース）と使用されている 2x スルー構造（青色トレース）が表示されています。フィクスチャモデルは、インピーダンス補正を用いて導かれます。左のフィクスチャモデル（緑色トレース）は、「フィクスチャ-DUT 2A-フィクスチャ」構造のリードイン部分に正確に従っています。図 18 に表示されているのは、右側（リードアウト）から見たインピーダンスプロファイル（Z←Sdd22）です。反転「フィクスチャ-DUT 2A-フィクスチャ」構造（赤色トレース）と反転 2x スルー構造（青色トレース）が表示されています。右のフィクスチャモデル（緑色トレース）も、「フィクスチャ-DUT 2A-フィクスチャ」構造のリードアウト部分に正確に従っています。



図 17 - R&S®ZNA43 によるインピーダンス補正ありのディエンベディング：整合性チェック。導かれた左側のフィクスチャモデル（緑色トレース）と、「フィクスチャ-DUT 2A-フィクスチャ」構造（赤色トレース）および使用されている 2x スルー（青色トレース）を比較します。



図 18 - R&S®ZNA43 によるインピーダンス補正ありのディエンベディング：整合性チェック。導かれた右側のフィクスチャモデル（緑色トレース）と、反転「フィクスチャ-DUT 2A-フィクスチャ」構造（赤色トレース）および反転 2x スルー（青色トレース）を比較します。

## 例 2：R&S ディエンベディング・デモ・ボード上の「フィクスチャ-DUT 2B-フィクスチャ」構造

同様に、図 19 および図 20 に表示されているのは、各々が「フィクスチャ-DUT 2B-フィクスチャ」構造の左側（Z←Sdd11）と右側（Z←Sdd22）から見たインピーダンスプロファイルです。インピーダンス補正の効果により、フィクスチャモデル（緑色トレース）は、先と同様に、リードイン/リードアウトの実際のインピーダンスプロファイルに正確に従っています。この例では、2x スルーとはかなり異なります。

この整合性チェックにより、フィクスチャモデルの確度と、それらがどの程度正確に実際のリードイン/リードアウトに従っているのかに関して、優れた知見を得ることができます。それだけでなく、使用されている 2x スルーと直接比較することも可能になります。これは、インピーダンス補正ありのディエンベディングの品質を評価するために選択される手法です。



図 19 - R&S®ZNA43 によるインピーダンス補正ありのディエンベディング：整合性チェック。導かれた左側のフィクスチャモデル（緑色トレース）と、「フィクスチャ-DUT 2B-フィクスチャ」構造（赤色トレース）および使用されている 2x スルー（青色トレース）を比較します。



図 20 - R&S®ZNA43 によるインピーダンス補正ありのディエンベディング：整合性チェック。導かれた右側のフィクスチャモデル（緑色トレース）と、反転「フィクスチャ-DUT2B-フィクスチャ」構造（赤色トレース）および反転 2x スルー（青色トレース）を比較します。

### 3.2 使用されているスルー 2x のセルフディエンベディング

セルフディエンベディング手法は、2x スルーから作成されるフィクスチャモデルを使用して、使用されている 2x スルーを自身からディエンベディングします。インピーダンス補正なしの従来のディエンベディングを使用する場合は、フィクスチャモデルは 2x スルーから導かれます。インピーダンス補正ありのディエンベディングを使用する場合は、フィクスチャモデルは、2x スルーおよび使用されている「フィクスチャ-DUT-フィクスチャ」構造から導かれます。これも先と同様に使用されている 2x スルーです。セルフディエンベディングの結果は常に、電氣的にトランスペアレントなインターコネクタで、損失も位相シフトもなく、そのため残留成分もありません。ここで、IEEE Std 370 は、残留振幅応答 (<math><0.1\text{ dB}</math>) と残留位相応答 (<math><1^\circ</math>) によりリミットを定義しています。

ただし、インピーダンス補正ありのディエンベディングが必要な場合、この手法には大きな欠点があります。これには、実際のリードイン/リードアウトを備えた本当の「フィクスチャ-DUT-フィクスチャ」構造が含まれておらず、それらのモデルの正確性に関する情報が提供されません。この整合性チェックは、測定の安定性を示す優れた指標にはなりますが、インピーダンス補正が不要な場合のこのセルフディエンベディングのシナリオにおけるディエンベディングプロセスの品質しか示しません。そのため、実際の「フィクスチャ-DUT-フィクスチャ」構造のディエンベディング性能と、どの程度フィクスチャモデルが実際のリードイン/リードアウトの特性に一致しているのかに関する知見は得ることができません。フィクスチャモデルがリードイン/リードアウトに一致しているかどうかに関係なく、良好な結果が得られてしまいます。[セクション 2.3](#) で使用されている MultiGBASE-T1 車載イーサネットコネクタの例でセルフディエンベディングを用いると、インピーダンス補正なしの従来のディエンベディングでも良好な結果が表示され、ディエンベディング結果にファントムリムが含まれるリスクに関する指標は提供されません。この整合性チェックは非常に簡単ですが、その結果はかなり誤解を招く可能性があり、慎重に使用する必要があります。確認できるのは、インピーダンス補正なしの従来のディエンベディングで十分なシナリオの性能のみです。インピーダンス補正ありのディエンベディングが必要な場合に、唯一の意味ある整合性チェックは、[セクション 3.1](#) で説明した TDR インピーダンスの比較のみです。

図 21 に、このようなセルフディエンベディングによる整合性テストの例を示します。R&S ディエンベディング・デモ・ボード上で 2x スルー構造を使用したときの、残留振幅応答と残留位相応答の結果です。

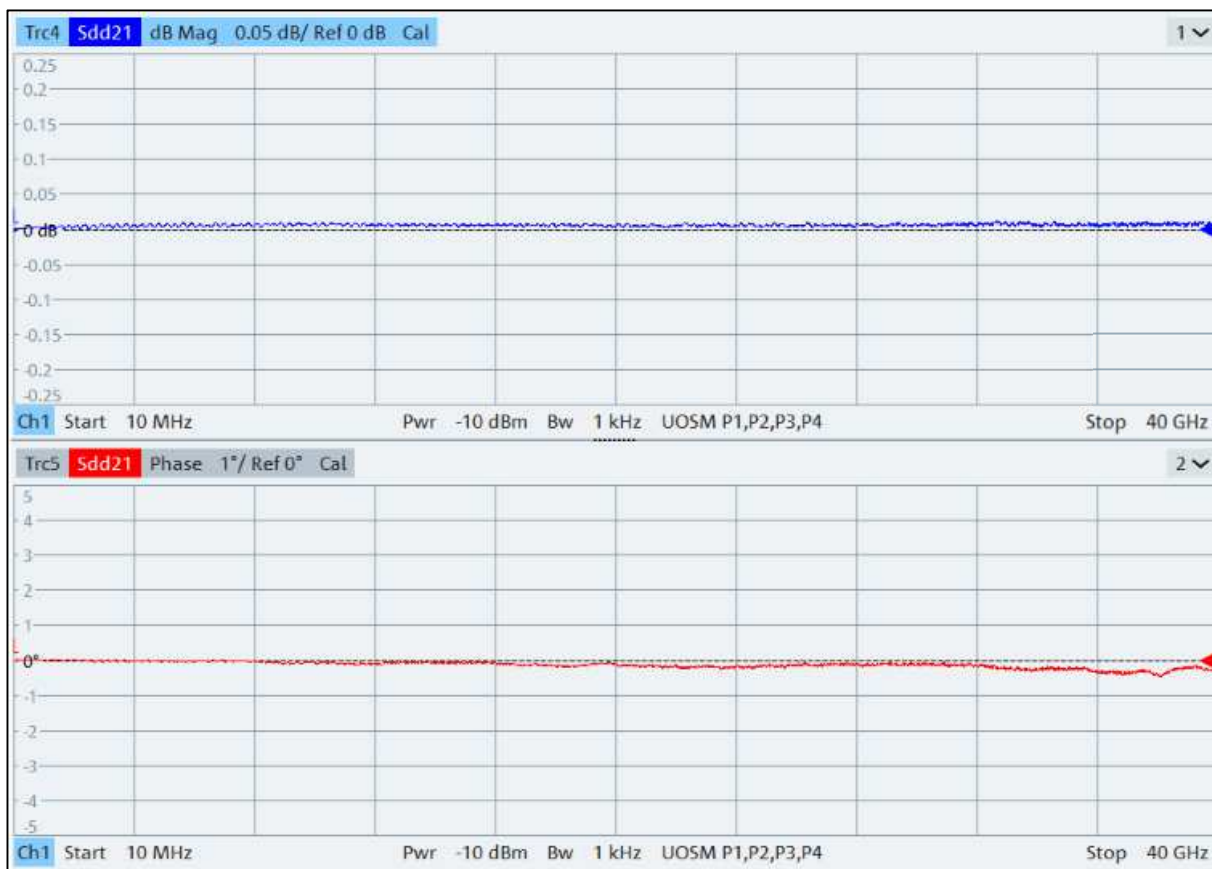


図 21 - R&S®ZNA43 によるディエンベディング：整合性チェック、使用されている 2x スルーのセルフディエンベディング。

## 4 参考文献

- [1] IEEE, “IEEE 370-2020 – IEEE Standard for Electrical Characterization of Printed Circuit Board and Related Interconnects at Frequencies up to 50 GHz,” [オンライン]. Available: <https://standards.ieee.org/standard/370-2020.html>.

## 5 オーダー情報

### R&S ZNA ベクトル・ネットワーク・アナライザ

品名	タイプ	オーダー番号
R&S®ZNA の Eazy De-embedding (EZD) 、 IEEE Std 370 の要件に適合	R&S®ZNA-K210	1339.3897.02
R&S®ZNA の In-Situ De-embedding (ISD) 、 IEEE Std 370 の要件に適合	R&S®ZNA-K220	1339.3900.02
R&S®ZNA の Smart Fixture De-embedding (SFD) 、 IEEE Std 370 の要件に適合	R&S®ZNA-K230	1339.3916.02

### R&S ZNB ベクトル・ネットワーク・アナライザ

品名	タイプ	オーダー番号
R&S®ZNB の Eazy De-embedding (EZD) 、 IEEE Std 370 の要件に適合	R&S®ZNB-K210	1328.8592.02
R&S®ZNB の In-Situ De-embedding (ISD) 、 IEEE Std 370 の要件に適合	R&S®ZNB-K220	1328.8605.02
R&S®ZNB の Smart Fixture De-embedding (SFD) 、 IEEE Std 370 の要件に適合	R&S®ZNB-K230	1328.8611.02

### R&S ZNBT ベクトル・ネットワーク・アナライザ

品名	タイプ	オーダー番号
R&S®ZNBT の Eazy De-embedding (EZD) 、 IEEE Std 370 の要件に適合	R&S®ZNBT-K210	1328.8634.02
R&S®ZNBT の In-Situ De-embedding (ISD) 、 IEEE Std 370 の要件に適合	R&S®ZNBT-K220	1328.8640.02
R&S®ZNBT の Smart Fixture De-embedding (SFD) 、 IEEE Std 370 の要件に適合	R&S®ZNBT-K230	1328.8657.02

### R&S ZND ベクトル・ネットワーク・アナライザ

品名	タイプ	オーダー番号
R&S®ZND の Eazy De-embedding (EZD) 、 IEEE Std 370 の要件に適合	R&S®ZND-K210	1328.8670.02
R&S®ZND の In-Situ De-embedding (ISD) 、 IEEE Std 370 の要件に適合	R&S®ZND-K220	1328.8686.02
R&S®ZND の Smart Fixture De-embedding (SFD) 、 IEEE Std 370 の要件に適合	R&S®ZND-K230	1328.8692.02

## Rohde & Schwarz

Rohde & Schwarz エレクトロニクスグループは、テスト／測定、放送／メディア、セキュリティー通信、サイバーセキュリティー、モニタリング、ネットワークテストの分野で革新的なソリューションを提供しています。本社をドイツのミュンヘンに構え、設立から 80 年以上にわたり、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](http://www.rohde-schwarz.com/jp)

Certified Quality Management

**ISO 9001**

### ローデ・シュワルツのセミナー／トレーニング

[www.rohde-schwarz.co.jp](http://www.rohde-schwarz.co.jp)

### ローデ・シュワルツのお客様サポート

[www.rohde-schwarz.com/support](http://www.rohde-schwarz.com/support)

