

方向性結合器: その動作と応用

Urvashi Sengal ウルヴァシ センガル

Applications Engineer, Mini Circuits アプリケーションエンジニア, ミニ・サーキット

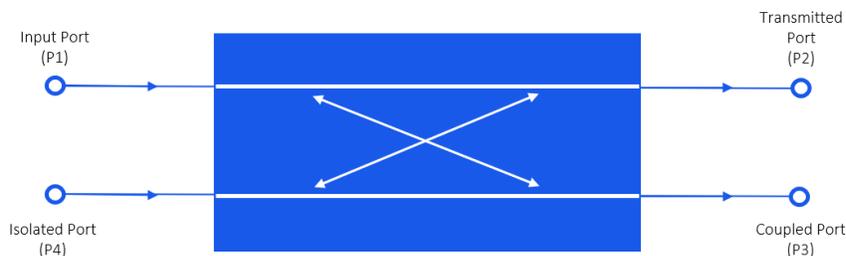
方向性結合器は重要な信号処理デバイスの一つです。その基本機能は、信号ポートとモニターポート間を高いアイソレーションで所定の結合度により RF 信号をモニタすることで、各種アプリケーションの分析、測定、処理をサポートします。

方向性結合器は受動素子のため逆方向でも動作し、この場合デバイスの方向性と結合度に応じて信号はメインパスの信号と結合します。以下に示すように、方向性結合器の構成には以下に示すようにいくつかのバリエーションがあります。

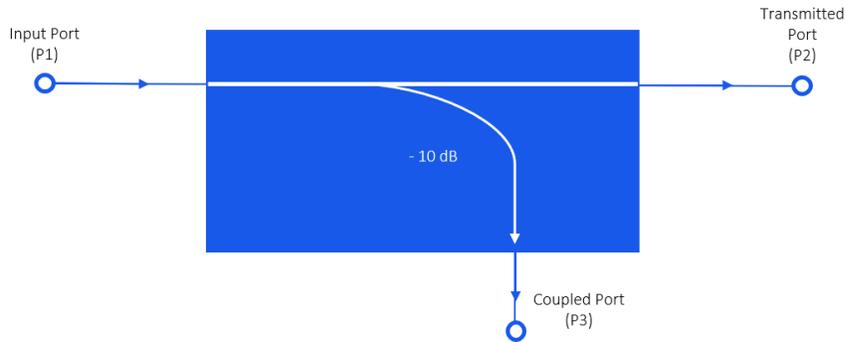
定義

方向性結合器は、理想的には無損失でマッチングが取れていて正逆双方向で動作します。3ポートおよび4ポート方向性結合器の基本的特性は、分離（アイソレーション）、結合（カップリング）および方向性であり、その値は方向性結合器の性能を表します。理想的な方向性結合器は、目的とするアプリケーションに必要な結合度と、無限の方向性とアイソレーションを備えています。

図1の機能図は方向性結合器の動作を示し、その後に関連する性能パラメータについて説明しています。上の図は4ポートの方向性結合器で、結合（順方向）ポートと分離（逆方向、または反射）ポートの両方が含まれています。下の図は3ポート構造で、分離ポートが除かれています。これは単一の順方向結合出力のみを必要とするアプリケーションで使用されます。3ポートカプラは逆方向にも接続可能で、この場合は結合ポートは分離ポートになります。



Directional / Bi-directional / Dual Directional Couplers



(図 1：方向性結合器の基本的構成)

性能特性:

1. **結合度:** 結合ポート P3 に出力される入力電力 (P1) の割合を示します。
2. **方向性:** 結合 (P3) ポートと分離 (P4) ポートで測定される順方向に伝搬する電力 (入射波) と逆方向に伝搬する電力 (反射波) を分離する方向性結合器の性能の尺度です。
3. **アイソレーション:** 非結合負荷 (P4) に出力される電力を示します。
4. **挿入損失:** 入力電力 (P1) が伝送 (P2) ポートに出力される割合を示し、これは結合ポートと分離ポートから出力される電力を引いた値になります。

これらの特性を dB 単位で表すと以下ようになります:

$$\text{結合度} = C = 10 \log\left(\frac{P_1}{P_3}\right)$$

$$\text{方向性} = D = 10 \log\left(\frac{P_3}{P_4}\right)$$

$$\text{アイソレーション} = I = 10 \log\left(\frac{P_1}{P_4}\right)$$

$$\text{挿入損失} = L = 10 \log\left(\frac{P_1}{P_2}\right)$$

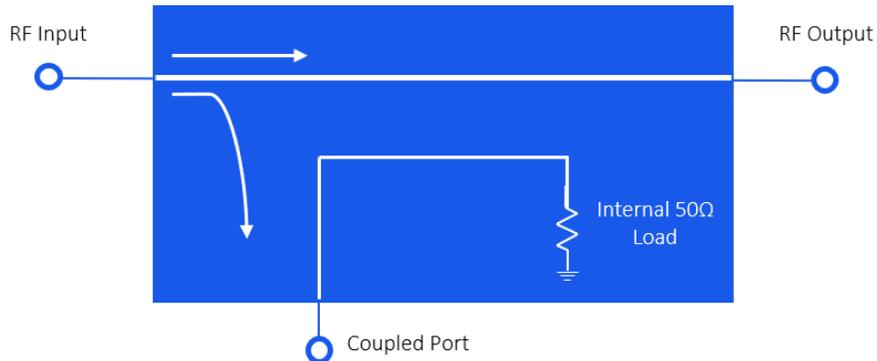
結合器の種類

方向性結合器:

このタイプの結合器には図 2 に示すように接続可能なポートが三つあり、4 番目のポートは最大限の方向性が得られるように内部で終端されています。方向性結合器の基本的な性能はアイソレートされた (逆) 信号をモニタすることです。典型的な応用例としては、反射電力 (または間接的に VSWR) の測定があります。逆方向に接続することも可能ですが、このタイプの結

Directional / Bi-directional / Dual Directional Couplers

合器では正逆で特性は異なります。結合ポートの一つは内部で終端されているため、使用できる結合信号は一つだけです。順方向（図を参照）では、結合ポートは反射波をモニタしますが、逆方向（右側が RF 入力）に接続される場合には結合ポートは入射波のモニタとなり、結合度は減少します。この接続では、デバイスは信号測定用のモニタとして、あるいは出力信号の一部をフィードバック回路に供給するために使用できます。



(図 2 50Ω 方向性結合器)

長所:

1. 順方向パスの性能を最適化できる
2. 高い方向性とアイソレーション
3. 結合器の方向性は、絶縁ポートの終端によるインピーダンス整合の影響を強く受け、その終端を内部にもつことで高性能が保証される

短所:

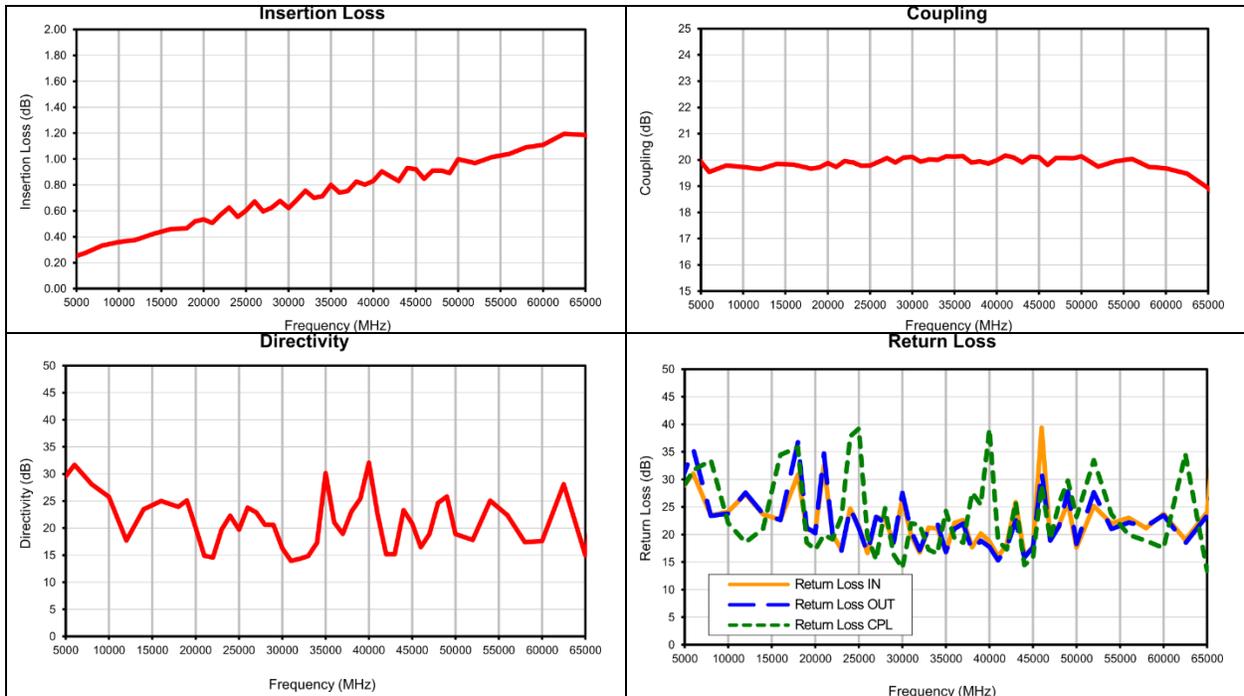
1. 結合は順方向パスのみで使用可能
2. 結合ラインがない
3. 結合ポートから入力された電力は内部の終端でほぼすべてが消費されるため、結合ポートの定格電力は入力ポートより小さくなる

例:



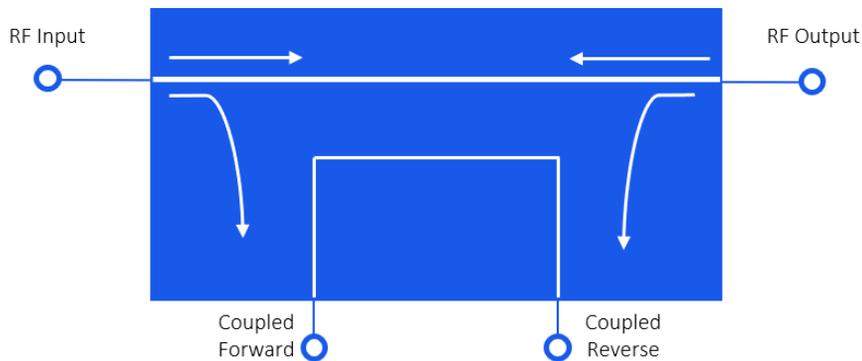
Mini-Circuits ZCDC20-E18653+ は 18~65GHz の周波数範囲において公称 20dB の結合度を備えた同軸タイプの方向性結合器です。このモデルは最大 12W の RF 電力、最大 0.48A の DC 電流を入力できます。

Directional / Bi-directional / Dual Directional Couplers



双方向性結合器:

このタイプの結合器には四つのポートがあり、すべてのポートを利用することができます。対称設計のため、順方向信号と逆方向信号を同時にモニタできます。両結合ポートは適切にマッチングまたは終端して使用してください。



(図 3. 双方向性結合器)

長所:

1. 対称設計
2. 入力ポートと出力ポートは入れ替え可能
3. 2系統の伝送ラインがあり、結合ラインはメインのラインと同じように機能する

Directional / Bi-directional / Dual Directional Couplers

4. 順方向と逆方向のカップリングがある

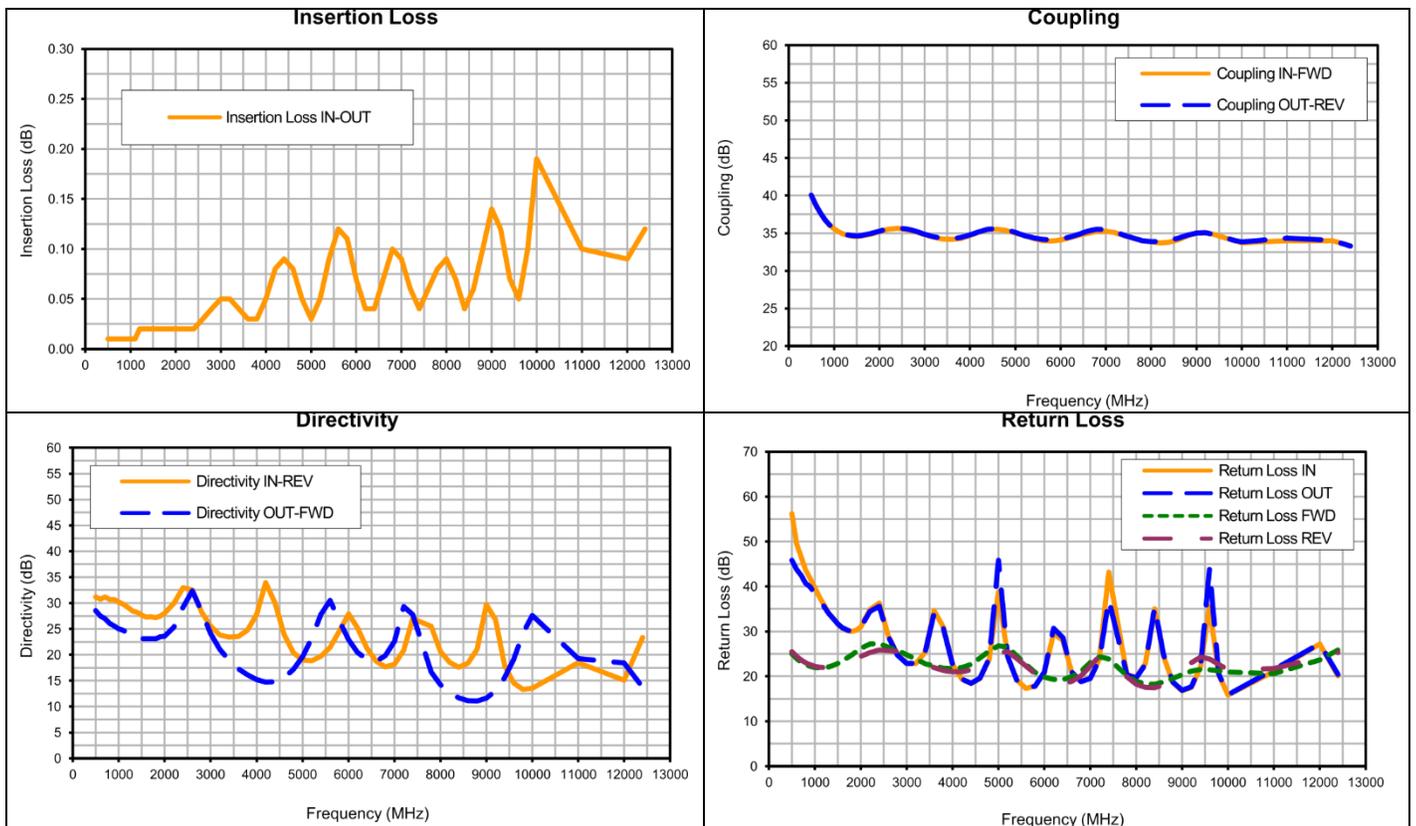
短所:

1. 双方向で良好な性能を得るためにクリティカルな設計が必要.
2. 結合器の方向性は分離ポートの終端により左右される

例:



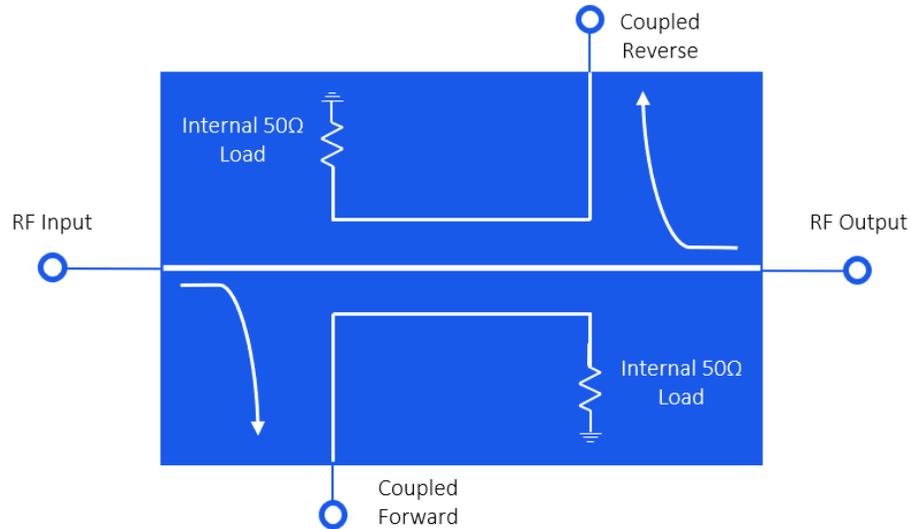
Mini-Circuits' ZGBDC35-93HP+ は 900~9000MHz の周波数範囲において公称 35dB の結合度を備えた同軸タイプの双方向性結合器です。このモデルは最大 250W の RF 電力、最大 3A の DC 電流を入力できます。



デュアル方向性結合器:

三つ目は、メインのラインがカスケードに接続された二つの 3 ポート結合器に内部終端ポートが向き合う形で接続された結合器の組み合わせです。この構成では双方向で結合器が利用でき、結合ポートは独立して利用できます。主な利点としては、一方のポートのミスマッチングが、もう一方のポートに影響を与えないことが挙げられます。

Directional / Bi-directional / Dual Directional Couplers



(図 4. デュアル方向性結合器)

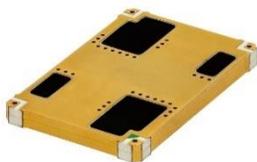
長所:

1. 性能は順方向パスと逆方向パスの両方で最適化できる
2. より高い方向性とアイソレーションを実現できる
3. 順方向でも逆方向でも結合が得られる
4. 一方のパスの方向性は、もう一方のパスのミスマッチングに影響を受けない
5. システムの順方向電力と逆方向電力の両方を同時に監視するためにも使用できる

短所:

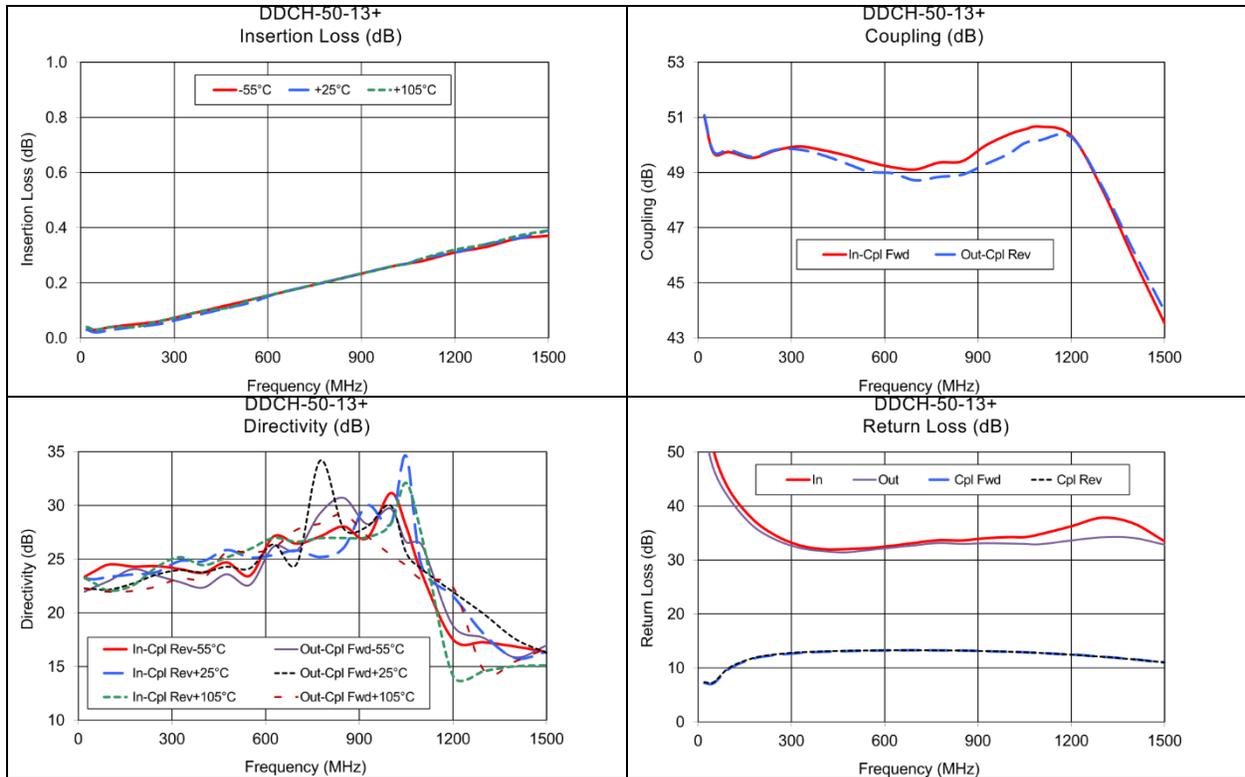
1. 通常、一対の方向性結合器で構成される
2. 方向性結合器や双方向性結合器に比べるとサイズが大きい
3. 結合ラインがない（両端で接続できない）
4. 単方向および双方向性結合器よりも挿入損失が大きい

例



Mini-Circuits DDCH-50-13+ は 20～1000MHz の周波数範囲において公称 50dB の結合度を備えたマイクロストリップラインベースの表面実装デュアル方向性結合器です。このモデルは最大 120W の RF 電力、最大 4A の DC 電流を入力できます。

Directional / Bi-directional / Dual Directional Couplers

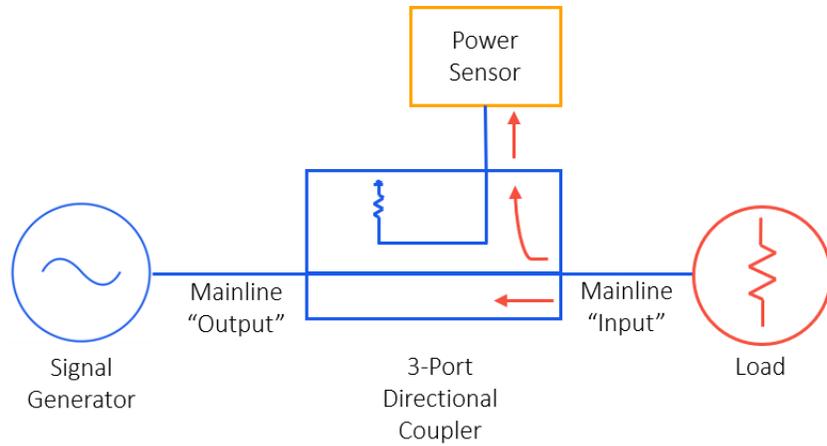


方向性結合器の応用例

反射率計

図 2 に示すように接続すると、結合器は結合ポートでの反射波をモニタできます。これにより、負荷のミスマッチングの程度を表す反射電力の測定が可能になります。送信機の出力をこのように構成すると、測定と監視の両方でアンテナシステムの **VSWR** をモニタできます。多くの RF システムでは **VSWR** が最小になるように調整し、過大な **VSWR** を検出すると回路保護のために電力を低減するかシャットダウンするシステムもあります。

Directional / Bi-directional / Dual Directional Couplers

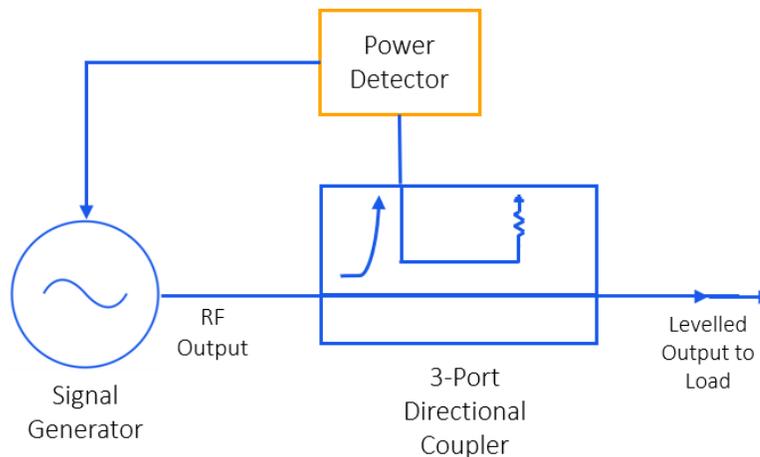


順方向モニタ

逆に接続すると、結合ポートには結合度によって減衰された出力（順方向信号）がモニタされます。このモニタ信号は、波形監視、スペクトル分析、およびその他のテストや測定機能に使用できます。

レベルジェネレータ

モニタ信号はフィードバック回路を駆動するためにも使用できます。重要な応用例の一つとしてシグナルジェネレータの振幅を一定にしてテストシステムに信号を供給するレベルジェネレータ

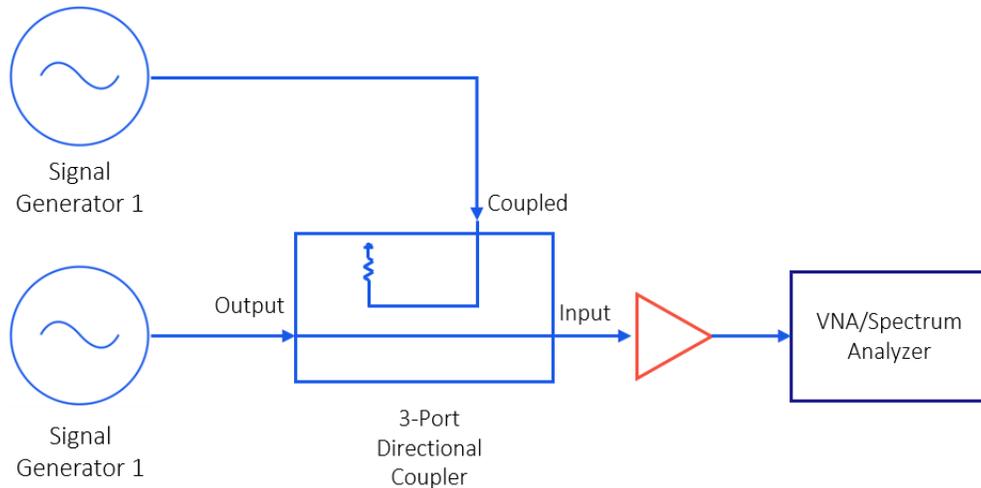


ータが挙げられます。

受信機の相互変調試験の設定

2 信号試験に必要なテスト信号は、方向性結合器または電力合成器のいずれかで作られます。どちらの方法でも信号源間で必要なアイソレーションは得られます。

Directional / Bi-directional / Dual Directional Couplers



双方向性結合器の応用例

順方向および逆方向モニタ

反射電力または V_{SWR} は重要ですが、順方向信号と反射信号の両方を同時にモニタする方が便利な場合があります。この機能は、出力電力（順方向）と反射電力（逆方向）の監視または測定を可能にする双方向性結合器によって得られます。ビルトインテスト（BIT）システム、プロダクション試験、および日常的な運用監視はすべて、双方向性結合器により実現できます。

反射率計

この回路構成では入射電力と反射電力が測定できます（通常は V_{SWR} として測定）。これは RF の実験室や生産現場レベルで一般的で有用な試験機能です。反射率計は、単独で電力/ V_{SWR} 測定器のモニタ部分に使用される場合や、試験システム、通信機器、またはその他の RF システム（MRI や高周波加熱など）内でコンポーネントとして実装される場合があります。

デュアル方向性結合器の応用例

順方向および逆方向モニタ

上記、および図 4 のように、デュアル方向性結合器は双方向性結合器として機能しますが、順方向と逆方向の結合パスは別々になっています。これにより一方のパスのアイソレーションは、もう一方のパスのミスマッチングの影響を受けません。

反射率計 (双方向性結合器よりさらに正確な結果が得られる)

双方向性結合器およびデュアル方向性結合器の典型的な使用例が反射率計です。デュアル方向性結合器を使用した場合には、結合ポートのいずれかに大きなミスマッチングがある場合に精度が向上します。

要約

方向性結合器は、RF システムの中では重要なデバイスです。順方向または逆方向のいずれかの伝送信号をモニタする機能により、試験、測定、監視、フィードバック、および制御における幅広い応用が可能になります。このメモは、システム設計者が結合器の機能、アーキテクチャ、およびパフォーマンスを理解し、特定の応用に適したタイプの結合器を選択するのに役立ちます。