

ミキサー トポロジーのクイックガイド

2022 年 3 月 7 日 | [エンジニアリングリソース](#)、周波数ミキサー

[キット・コックス](#)、フィールドアプリケーションエンジニア、Mini-Circuits Japan 株式会社

すべてのスーパーヘテロダイン RF 受信機、送信機、またはトランシーバシステムの中心には RF/マイクロ波ミキサーがあり、これはベースバンド信号を RF(送信機内) または RF をベースバンド信号(受信機内)に変換するために不可欠な要素です。

すべてのミキサーには 3 つのポートがあります。

1. **IF:** 中間周波数ポート(ベースバンドポートとも呼ばれます)
2. **LO:** 局部発振器ポート(キャリアポートとも呼ばれます)
3. **RF:** 無線周波数ポート

受信機で使用する場合、ミキサーの LO ポートと RF ポートに信号が各々入力され、ダウンコンバージョンと呼ばれるミキシングプロセスで、IF ポートに出力が生成されます。

逆に、送信機で使用する、信号はミキサの LO ポートと IF ポートに入力され、アップコンバージョンと呼ばれるミキシングプロセスで、RF ポートに出力が生成されます。

パッシブミキサーはどちらにでも使用できます。どちらの場合も、2 つの入力信号が「混合」され、出力ポートに 2 つの新しい信号が生成されます: 1 つは入力の和の周波数(つまり、 $LO + (RF \text{ または } IF)$)で、もう 1 つは入力の差の周波数(つまり、 $LO - (RF \text{ または } IF)$)。ほとんどのアプリケーションでは、これら 2 つの信号のうちの 1 つだけが必要で、もう 1 つは抑圧する必要があります。

基本的な RF ミキサのブロック図と、理想的なダウンコンバージョンとアップコンバージョンの例を図 1 に示します。

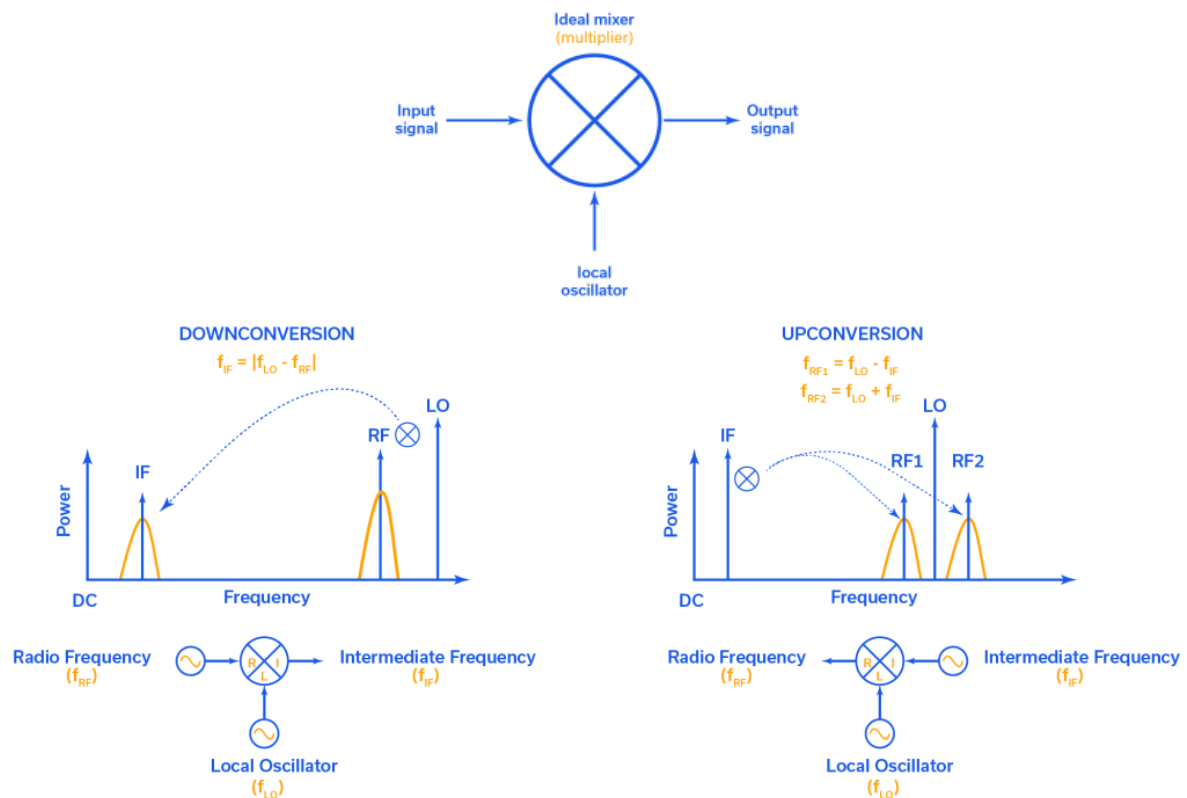


図1: RF ミキサの概略回路図と理想的なダウンコンバージョンおよびアップコンバージョンの例

ミキサーは、創業者ハービー・ケイリーが、[ロゴマーク](#)もなっている大ヒット商品、「SRA-1」を生み出したときから、Mini-Circuits の主力事業として始まり、[現在も製造](#)し続けています。何十年にもわたって、Mini-Circuits はミキサーの専門知識を活用し、6種類の回路トポロジーを持つ数百ものユニークなミキサーモデルを提供するまでに成長しました。このように設計者の [ミリ波](#) までを含めたあらゆるアプリケーションの要求に応じたオプションを提供します。しかし、これらすべてのミキサー設計の違いを理解した上で、すべてのオプションを使用することは、部品選択のプロセスが複雑になります。…そこで、この記事の登場です。

今回は、バランス型とアンバランス型製品の両方を含む、さまざまなミキサートポロジーについて幅広く紹介します。なお、理論的にはどのような非線形デバイスを使用してもミキサーを作れますが、非線形デバイスとしてはショットキーダイオードと電界効果トランジスタ(FET)が最も一般的です。Mini-Circuits は、ダイオードベースとFET ベースのミキサーの両方を設計していますが、ここでは、わかりやすくするためにダイオードミキサーを使用したトポロジーを紹介します。ただし、同じ原理を他の技術に応用することもできます。

アンバランス(シングルダイオード)ミキサ

シングルダイオードのアンバランスミキサーは、最も単純で最も古いミキサートポロジィです。シングル・ダイオード・ミキサーは基本的に2ポート・デバイスであり、RFとLOを重畳してダイオードに印加し、IFはダイオードの反対側から取り出します。このトポロジィの回路図と時間領域の応答特性を図2に示します。

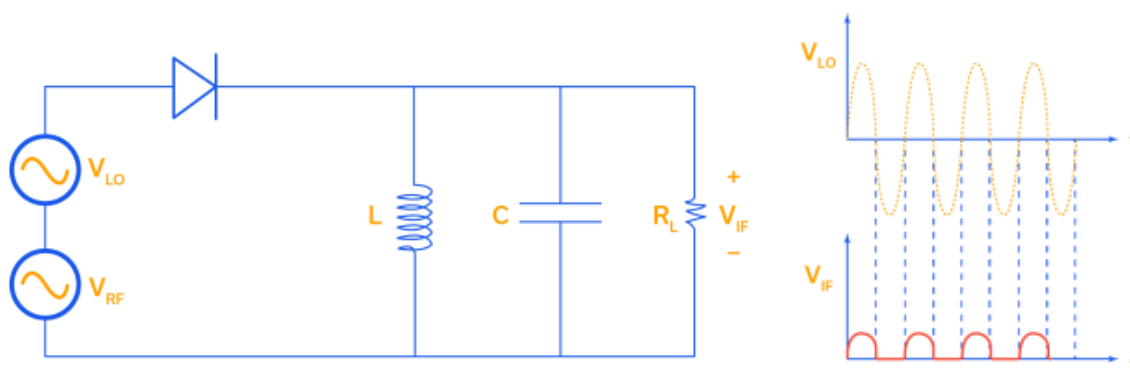


図2: アンバランス/シングルダイオードミキサーの回路図と時間領域応答特性

アンバランスミキサーの制約の1つは、希望するIF周波数(和または差)に加えて、出力信号のスペクトルにRFおよびLO信号成分が含まれるため、このRFおよびLO周波数成分を除去するための狭帯域IFフィルタが必要になることです。図2の出力部にあるRLCによるタンク回路は、IF周波数に合わせて調整されています。つまり、シングルデバイスミキサーはポートが独立していないため、IF帯域はかなり狭くなります。シングル・ダイオード・ミキサーは安価な受信機のフロントエンドに使用され、入力と出力にバンドパス・フィルタを使用することでLO、RF、IF信号の分離が可能です。ただし、RF周波数帯域とLO周波数帯域が重なると、フィルタリング要件が難しくなり、問題が発生する可能性があります。

アンバランスダイオードミキサーの利点と欠点

利点

- ミリ波帯で非常に実用的
- 安価
- 低LOレベルでの動作

欠点

- アイソレーションなし
- 狭動作帯域でのフィルタリング結果
- LOのAMノイズや、相互変調成分の除去は不可

シングルバランスミキサー

シングル・バランスド・ミキサーは、2つのダイオードと180°ハイブリッド・カップラを balan として使用することにより、フィルタを使用せず IF 出力から LO または RF 成分を除去することができます。

初期の広帯域受信機は、RF と LO を分離する 90°ハイブリッドコンバイナを使用していました。その効果はダイオードのインピーダンスマッチングの程度に左右されました。180°ハイブリッドカップラはこの問題を解決しました。この手法により RF ポートと LO ポートが独立し、不要な相互変調積を低減します。図 3 に示すように、RF 信号と LO 信号はハイブリッドの和入力、差入力ポートに印加され、対応する 2つのハイブリッド出力はそれぞれにダイオードに給電します。2つのダイオードの出力側端子は互いに接続され、IF 出力となります。

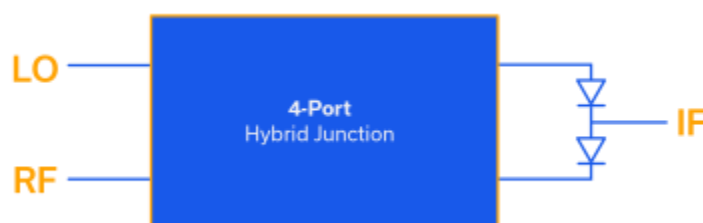


図3: シングルバランス型ダイオードミキサーの簡単なブロック図

ハイブリッドの 180°ポート(LO ポートまたは RF ポートのいずれかに設定可能)に印加された信号は、バランスされているため IF 出力には現れません。

図 4 にシングルバランスミキサーの回路例を示します。RF および LO 入力ポートに 180°ハイブリッド、IF 出力ポートに(L1, C2, C3 ネットワーク)のローパスフィルタ (LPF) を配置します。

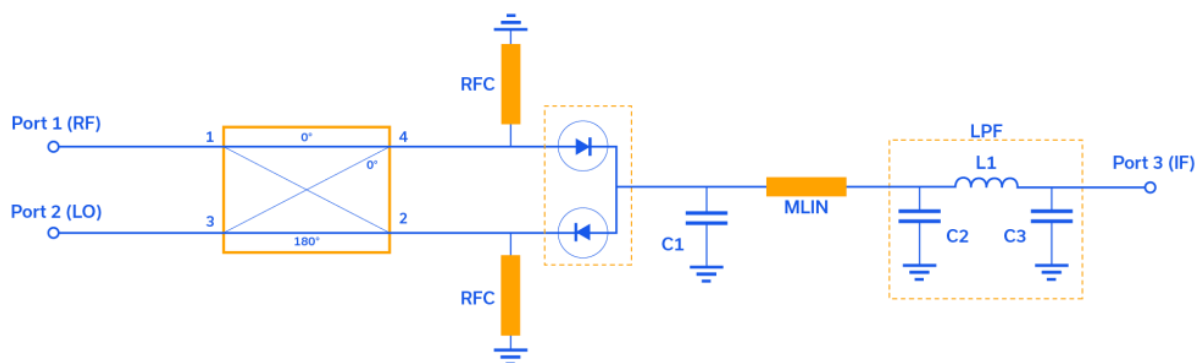


図4: シングルバランス型ダイオードミキサーの詳細な回路図

LO は 180°ポートに印加されるため、IF ポートではバランスされることで抑圧されます。それでも、ショットキーダイオードのオン/オフ動作を駆動してミキシング動作を行います。

RF 信号は、グラウンドへ接続されたコンデンサ(C1)と専用に設計されたローパスフィルタ(LPF)によって IF 出力から除去されます。

L0 電力が高くなると、ダイオードが自己バイアスする可能性があり、[変換損失やアイソレーション](#)の悪化が起こります。これを避けるために、カプラとダイオードの間の RF チョーク(RFC)で、L0 電力のバイアス成分をグラウンドに逃がします。

バランス型ミキサー・トポロジーのうち、シングル・バランス型ミキサーは最も少ない L0 電力で動作できます。IF 出力での L0 または RF 除去率は、標準で 20~30dB です。

シングルバランスミキサーの利点と欠点

利点

- バランス型では、最小の L0 レベルで動作が可能。
- L0 からの AM ノイズの抑圧が可能 (アンバランスを除く)。

欠点

- フィルタリング無しでは、アイソレーションは RF または L0 のみである。
- フィルタリングにより動作帯域が狭くなる。
- アンバランスよりも多くの L0 電力が必要となる。
- ダブルバランスよりも直線性が劣る。
- ダブルバランスよりも変換損失が大きい。

ダブルバランスミキサー

ダブル・バランスド・ミキサーのトポロジーは、リングまたはスター構成の 4 つのダイオードと、2 つの balan(RF と L0 用に各一つ)を備え、IF 出力では L0 と RF の両方の成分を除去することができます。これは、すべてのポートがフィルタリングを必要とせず、本質的に互いが分離されていることを意味します。これは、リングダイオード回路と、広帯域 balan の組み合わせによる特性です。

ダブルバランスダイオードミキサはシングルバランスドミキサと比較して、直線性が高く、スプリアス放射が少なくなります。また IF ポートでのフィルタリングが不要なため変換効率がよく、より広い帯域幅を確保できる傾向があります。ただし、このミキサーには、より高い L0 ドライブレベルが必要であり、ポートはリアクタンス成分のある終端には非常に敏感です。

ダブルバランスド・ミキサーの理想的なアプリケーションは、適度な L0 パワーで利用でき、RF と IF の周波数が重ならない低コストのアプリケーションです。

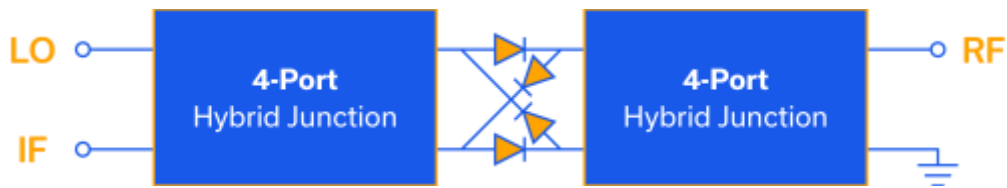


図5: ダブルバランスダイオードミキサーの簡略ブロック図

図5のブロック図の、ダブルバランスミキサーの回路図例を図6に示します。

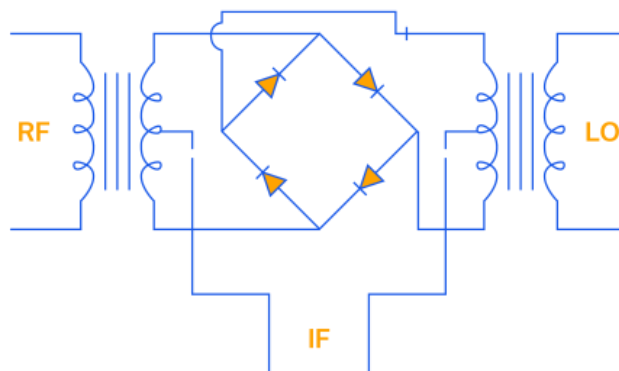


図6: ダブルバランスダイオードミキサーの詳細回路図

IF信号は、LO バランと RF バランの両方からのタップから取り出します。RF ポートと LO ポートに別々のバランを使用することで、RF ポートと LO ポートが分離され、アンバランスミキサーに比べて相互変調の成分が低減されます。

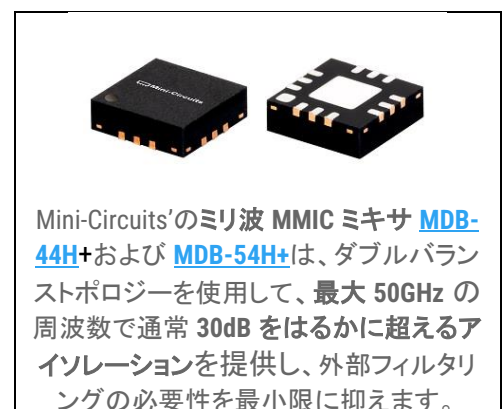
ダブルバランスミキサーの利点と欠点

利点

- RF と LO 間の特有のアイソレーション
- シングルバランスよりも優れた直線性
- シングルバランスよりも低スプリアス
- 広帯域(フィルタリング不要)
- トリプルバランストポロジーよりも低変換損失

欠点

- シングルバランスよりも大きな LO 電力が必要
- ポートが、リアクタンス性終端に敏感



トリプルバランスミキサー

トリプル・バランスド・ミキサー・トポロジーは、ダブル・バランス設計の直線性をさらに向上させますが、動作にはさらに高い LO 電力レベルが必要です。トリプルバランスドミキサーは、8 つのダイオードといくつかのバランを使用します。プッシュプル構成の 2 つのダブルバランスドミキサーで構成することから、「ダブルダブルバランス」と呼ばれることもあります。

図 7 にトリプルバランスドミキサーのブロック図を、より詳細な回路図を図 8 に示します。RF ポートと LO ポートには、2 つのハイブリッドが必要で、IF ポートにはハイブリッドカップラが 1 つ必要です。

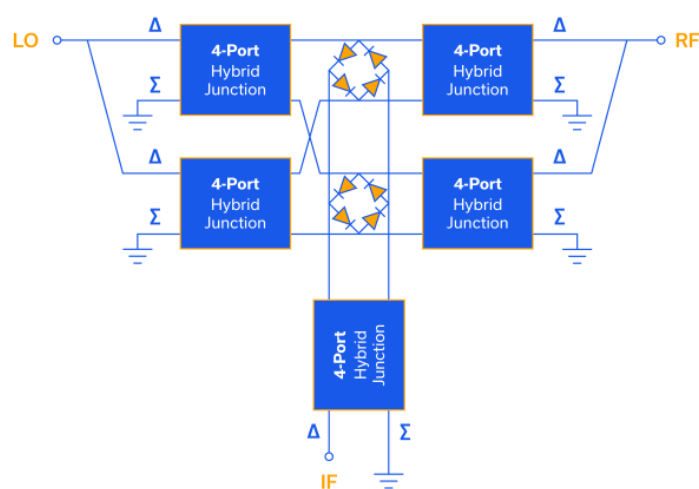


図7: トリプルバランス型ダイオードミキサーのブロック図

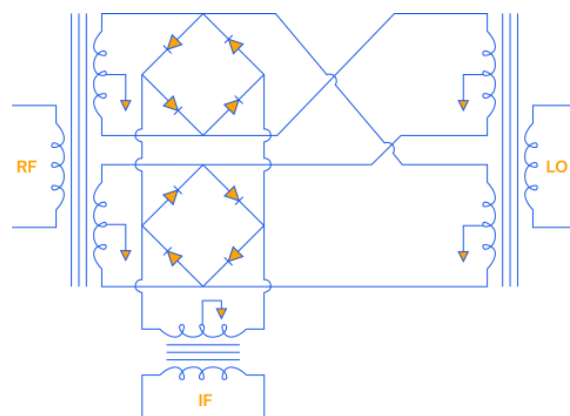


図8: トリプルバランスドダイオードミキサーの詳細な回路図

この製品は、ダブル・バランスド・ミキサー・トポロジーよりも優れたアイソレーションで、低スプリアス、低相互変調です。またトリプルバランスドミキサーは、IF 帯域幅も広いです。トリプル・バランスド・ミキサーは、広帯域信号をある周波数帯から別の周波数帯へ、相互変調を最小限に抑えながら変換する必要があるアプリケーションに最適です。

トリプルバランスミキサーの利点と欠点

利点

- 最高の直線性
- 広帯域アプリケーションに最適
- RF/IF がオーバーラップする場面に最適

欠点

- 大きな LO 電力が必要



アンバランスミキサーとポロジータンとバランスミキサーとポロジータンの概要比較

以下の表は、これまでに発表されたすべてのバランス型ミキサーのポロジータンを大まかに比較したものです。

Parameter	Unbalanced	Balanced		
		Single	Double	Triple
Inherent isolation	None	RF or LO	RF and LO	
Filtering required	Yes		No	
Broadband	No		Yes	
LO level required	Lowest	Lower	Greater	Greatest
Linearity	Worst	Worse	Better	Best
Spurs	Worst	Worse	Better	Best
LO AMP suppress	No	Yes		
Cost	Lowest	Lower	Greater	Greatest
Complexity	Lowest	Lower	Greater	Greatest

IQ ミキサー

IQ の「I」は「同相」を表し、「Q」は「直交」を表します。IQ ミキサーは、直交変調を使用して、2つの周波数の側波帯を別々に処理することができるので、位相を変数としたデータ伝送を可能にします。直交変調は、各側波帯に異なる情報を持つことが可能なため、両側波帯で伝送する情報量は2倍になります。図9にIQミキサーのブロック図を示します。

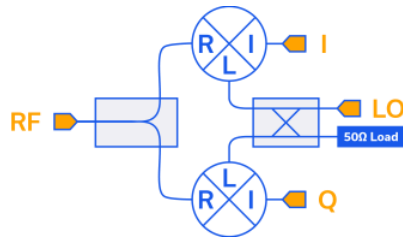
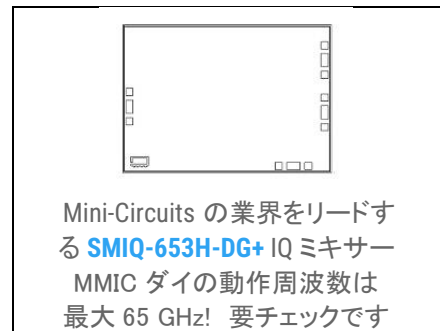


図9: IQ ミキサーのブロック図

IQ ミキサーは 2 つのミキサーで構成されています。LO はハイブリッドカプラから供給され、互いの位相が 90°シフトしています。1 つのミキサーは同相 LO 成分を処理し、もう 1 つのミキサーは直交成分を処理します。I および Q 入力信号は、送信用の RF 信号に混合されるベースバンド信号です。受信機ではプロセスが逆で、RF 信号が I と Q のベースバンド・チャンネルに分離されます。ここで説明するアンバランスやバランスミキサートポロジーのいずれも、IQ ミキサーを構成することができます。



Mini-Circuits は、IQ ミキサー製品の多くを、モジュレーター/デモジュレーターという用語で分類しています。ウェブサイトの[“Modulators/Demodulators”](#)セクションで確認することができます。

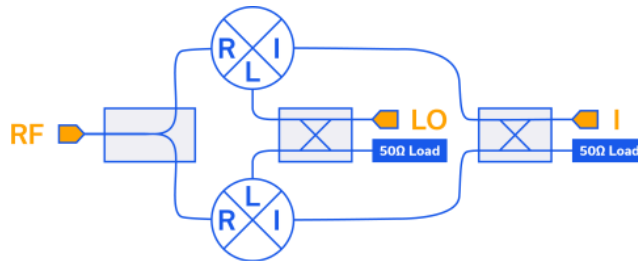


図10: イメージ除去/単側波帯ミキサーのブロック図

IR/SSB ミキサーは、I ポートと Q ポートに、ハイブリッドカプラを追加接続した IQ ミキサーです。この追加カプラの目的は、終端することで側波帯ポートの 1 つをキャンセルすることです。残りのカプラポートはミキサーの出力(IR/受信)として、または入力(SSB/送信)として使用されます。前述のアンバランスまたはバランスミキサートポロジーのいずれかを使用して、IR/SSB ミキサーを構成することができます。

IQ ミキサーと、単側波帯(SSB)およびイメージ除去アプリケーションでの使用の詳細については、関連するブログ [「I&Q ミキサー、イメージ除去ダウンコンバージョン&シングルサイドバンド\(SSB\)アップコンバージョン」](#)をご覧ください。

まとめ

Mini-Circuits では、この記事で取り上げたすべてのトポロジーを含む [RF およびマイクロ波ミキサー](#) を、業界で最も幅広く取り揃えています。このカタログをご覧になり、必要な最適なモデルをお探してください。