

# 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

2022年11月30日 | エンジニアリングリソース、周波数ミキサー、変調器/復調器

Radha Setty, Technical Advisor

## はじめに

スーパーヘテロダイン受信機や送信機では、周波数ミキサーが周波数変換の重要な機能を果たします。ダウンコンバータでは、信号処理を容易にするために、入力された無線周波数(RF)信号は中間周波数(IF)にダウンコンバートされます。ミキサーは一般的に広帯域デバイスであり、不要なイメージ周波数も必要な信号成分と同じ IF 周波数に変換してしまいます。これは好ましくありません。ミキサーは、直交ハイブリッドと組み合わせてイメージ除去ミキサー(IRM)を形成します。これを以下に説明します。

アップコンバータ・アプリケーションでは、ミキサーは IF 信号と局部発振信号(L0)を組み合わせ、出力に和と差の周波数( $L0 \pm IF$ )を生成します。ミキサーの広帯域特性を考えると、どちらも変換損失はほぼ同じです。シングルサイドバンド(SSB)アプリケーションでは、アップコンバートされた信号( $L0-IF$  または  $L0+IF$ )の片方だけが必要であり、残る信号は不要な影響を回避することと、システムの要求仕様を満たすためにフィルタで除去する必要があります。IF 信号の周波数が L0 信号の周波数に比べて低い場合は、シャープなバンドパスフィルタが必要ですが、多くの場合は大きさのなど制約により実用的ではありません。シングルサイドバンドアップコンバータが助けになります。

IRM ミキサーと SSB ミキサーはどちらも同じ回路構成です。これらはどのポートが、どの信号に対して使用されるかのみが異なります。重要な構成要素は、IRM ミキサー、SSB ミキサーのどちらも I&Q ミキサーです。このデバイスには、 $90^\circ$ のスプリッタと  $0^\circ$ のスプリッタ/コバイナを備えた 2 つの同一のミキサが組み込まれており、同相および直交信号を生成します(いわゆる I&Q)。また、ありふれた周波数ミキサーに外部  $90^\circ$ ハイブリッドを追加することで、IRM ミキサーや SSB ミキサーを構築することもできます。

IRM および SSB ミキサーの性能を最適化する際の多くの難しさは、スプリッタ、ハイブリッド、およびミキサーの接続に関連するインピーダンスの不整合と寄生成分に起因します。周波数が高いほど接続に関する作業は難しくなります。システム設計者のこの作業を軽減するために、Mini-Circuits は、超広帯域 I&Q ミキサー、[SMIQ653HD+](#)をダイ形式で開発しました。シングルチップで RF および LO ポートでは 18 ~ 65 GHz、IF ポートで DC ~ 20 GHz の周波数範囲をカバーします。どちらのミキサーもシングルチップで実現されているため、ほぼ同等の性能(変換損失と変換位相)を提供します。

これらのミキサーをオンチップの LO 90° ハイブリッドおよび RF 0° スプリッタ/コンバイナとさらに統合することで、相互接続ラインが短く、寄生成分が最小限の小型チップが実現します。

この記事では、イメージ除去ダウンコンバージョンアプリケーションとシングルサイドバンドアップコンバージョンアプリケーションの両方で I&Q ミキサーがどのように機能するかの基礎を説明します。

## 周波数ミキサーの基礎

IRM ミキサーと SSB ミキサーの詳細に入る前に、ミキサーの基本を確認しましょう。図 1 は、ダブルバランスドミキサーの概略回路図です。この回路構成は、Mini-Circuits の最初の製品の 1 つである SRA-1+ から、20~65GHz で動作する最近の MDB-653H-D+ MMIC ミキサーまで、多くの Mini-Circuits 製ミキサーで使用されています。すべてのダブルバランスドミキサーには、局部発振周波数(L または LO)、無線周波数(R または RF)、中間周波数(I または IF)の 3 つのポートがあります。

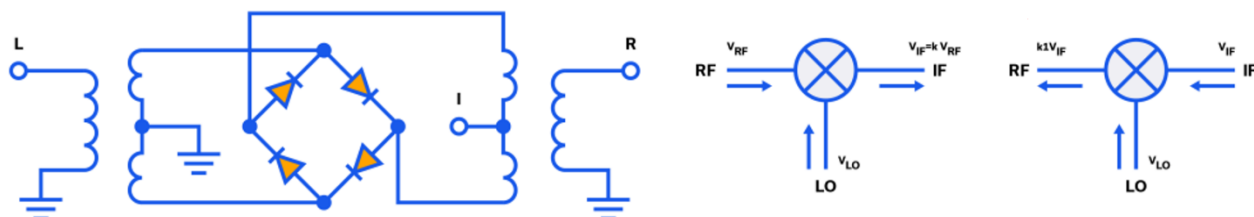


図 1: 概略回路図(左)とダウンコンバータ(中央) アップコンバータ(右)として使用されるダブルバランスドミキサーの記号。

## ダウンコンバータとしてのミキサー

今日の世界では、周波数スペクトルは完全に埋め尽くされており、不要なイメージ信号が常に存在します。隣接帯域のアプリケーションからの放射は、特定の帯域のイメージ周波数にあたることが多くあります。この放射成分は、目的の IF を妨害する可能性があります。ダウンコンバータアプリケーションでは、RF ポートは信号入力として使用され、IF ポートは出力として使用されるため、次のようになります。

$$f_{IF} = f_{RF2} - f_{LO} \text{ OR } f_{LO} - f_{RF1}$$

ここで  $f_{IF}$ 、 $f_{RF1}/f_{RF2}$ 、および  $f_{LO}$  は、それぞれ IF、RF、および LO 周波数です。 $f_{RF1}$  が目的の信号である場合、目的信号とイメージの両方がミキサーによって同じ IF 周波数に変換されるため、 $f_{RF2}$  はイメージです(またはその逆)。

$V_{RF1}$  が RF1 信号の振幅である場合、IF 信号の振幅は  $V_{IF} = k * V_{RF1}$  ( $k$  は 1 未満)であり、ミキサの変換損失に比例し、対数形式で表されます(図 1b を参照)。

図 2 は、周波数領域の LO、RF、および IF 信号を表しています。

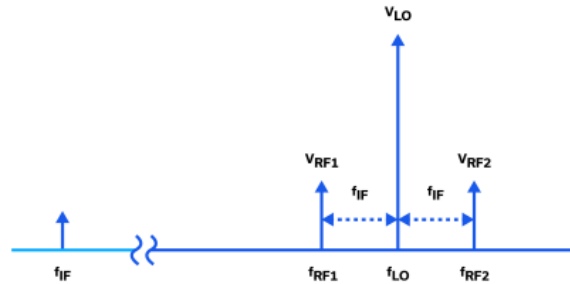


図 2: ダウンコンバータアプリケーションにおけるミキサ出力のスペクトル表現

図 2 に示すように、目的の RF 信号とイメージはそれぞれ LO 周波数から IF 周波数と同じ距離だけ離れています。RF1 が目的の信号である場合、RF2 がイメージであり、その逆も同様です。ミキサは本来広帯域であり、目的の RF 信号とイメージ信号の両方で同様の変換損失を示すため、両方とも同じ IF 周波数に変換され、ミキサ出力で分離することは不可能です。そのため、イメージ信号を抑制するために RF ポートにシャープなバンドパスフィルタが使用されることがあります。ただし、IF 周波数が低くなると、RF 信号とイメージの間の距離も短くなり、さらに鋭い選択度を持つフィルタが必要になることに注意してください。このようなフィルタは通常、大きく、高価で、通過帯域の挿入損失が大きいため、ほとんどの設計には実用的ではありません。I&Q ミキサは、これから説明するように、位相キャンセルを使用してこの問題に対処するための実用的な代替手段を提供します。

## アップコンバータとしてのミキサ

アップコンバータアプリケーションでは、ミキサの IF ポートが信号入力として使用され、RF ポートが出力として使用されます。前述のように、ミキサは  $LO + IF$  周波数と  $LO - IF$  周波数の両方の RF 出力を生成します。これらは、それぞれ上側波帯と下側波帯と呼ばれます。

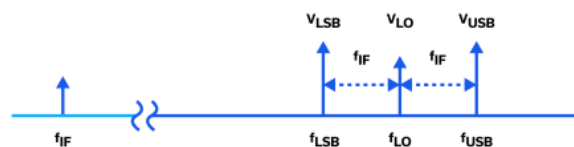


図 3: アップコンバータアプリケーションにおける、ミキサ出力のスペクトル

$$f_{USB} = f_{LO} + f_{IF} \text{ and } f_{LSB} = f_{LO} - f_{IF}$$

ここで、 $f_{USB}$  は上側波帯信号、 $f_{LSB}$  は下側波帯信号です。この場合、上側波帯信号を目的の信号とします。今度はミキサー出力で不要な信号を除去するため、再びシャープな選択度を備えたバンドパスフィルタが必要です。LO 周波数からの側波帯信号の上下の距離は、まさに IF 周波数です。IF 周波数が低いほど、ミキサー出力の二つの信号の距離は互いに近くなり、シャープなフィルタ特性が要求されます。この場合も、IF 周波数が低いシステムに、ミキサと直列にディスクリット・フィルタを使用すると、システムにコスト、サイズ、および挿入損失が増加します。LO が可変できる場合は、フィルタリングの複雑さは何倍にも増加します。

SSB ミキサーは位相キャンセルを用い、外部フィルタなしでこれらの問題を解決しています。I&Q ミキサーはすべての SSB ミキサーの心臓部です。

## I&Q ミキサー

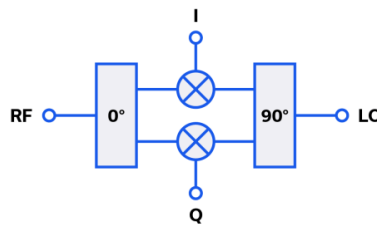


図 4 : I&Q ミキサーの概略回路図

I&Q ミキサーは、同一ミキサの組み合わせで、図4のように 90°ハイブリッドと 0°スプリッターが接続されています。I&Q ミキサーは、従来のミキサーのような1つの IF ポートに代わり、同相と直交位相の2つの IF ポートを備えています。理論的には、LO ポートと RF ポートを交換することができます。しかし 90°ハイブリッドは 0°スプリッターよりも、一般的に振幅のアンバランスが大きくなります。ミキサーは小さな LO 電力変動を許容するため、90°スプリッタを LO ポートとして接続すると、アンバランスな出力信号の影響を最小限に抑えられます。

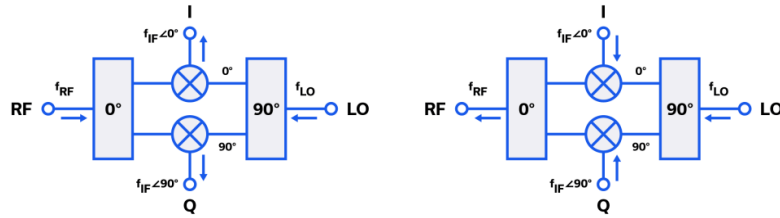


図 5：ダウンコンバータ(左)およびアップコンバータ(右)アプリケーションにおける I&Q ミキサーポート構成と信号の流れ

図 5 は I&Q ミキサーを、ダウンコンバータ(図 5a)およびアップコンバータ(図 5b)として示しています。ダウンコンバージョンの場合、ミキサーは 1 つの RF 入力を互いに  $90^\circ$  位相がずれた 2 つの IF 出力に変換します。アップコンバージョンの場合は、その逆となります。ここまでは良いとして、次に I&Q 信号の利点の活用方法を見てみましょう。

以下では、イメージ除去および単側波帯アプリケーションにおけるこのデバイスの効果を示すために、簡単な計算を行います。

## イメージ除去ミキサー

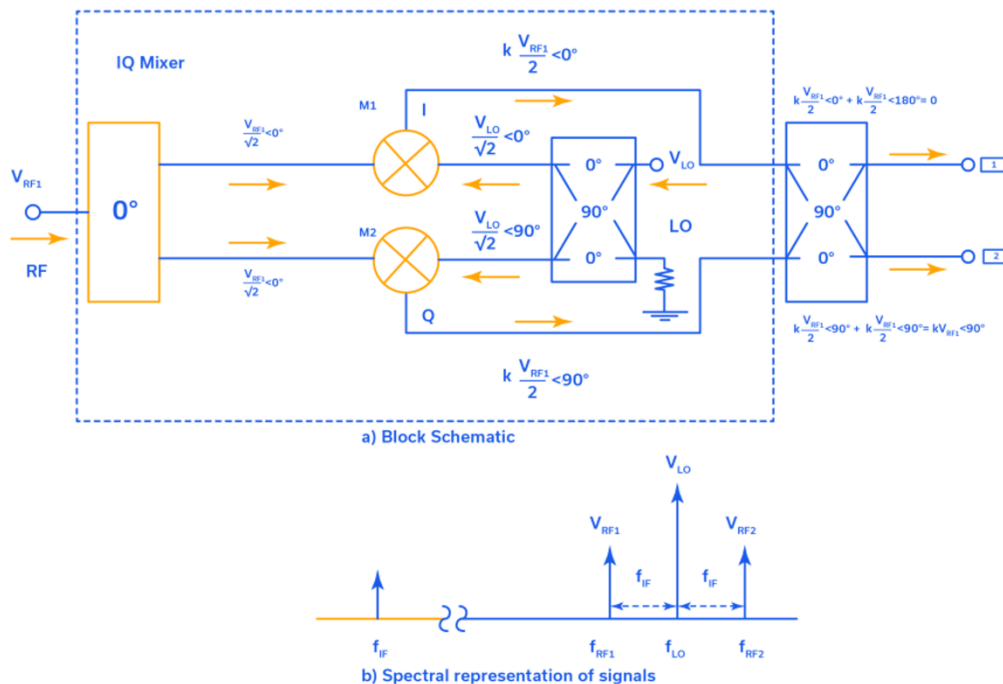


図 6：イメージ除去ミキサーの回路図と、目的の RF 信号(RF1)に対するスペクトル表示

図 6 に、イメージ除去ミキサー(IRM)を示します。 I&Q ミキサーと IF 周波数で動作する外部 90°ハイブリッドで構成されています。 回路を通るさまざまな信号経路も示します。ここでは順を追って、簡単に説明します。

1. 入力された RF 信号の RF1 は、0°パワースプリッタで同相の等しい振幅信号に2分割されます。
2. LO 信号は、I&Q ミキサー内部の 90°ハイブリッドにより、位相が 90°異なる等振幅の 2 つの信号に分割されます。
3. 入力された RF 信号は、両経路のミキサーで IF 信号に変換されます。下側ミキサー (M2)の LO 信号は、上側ミキサー(M1)の LO 信号に対して 90°の位相差があるため、結果として得られる 2 つの IF 信号は、振幅は等しくなりますが、位相が 90°ずれます。
4. I&Q ミキサー出力のこれら 2 つの IF 信号は、外部の 90°ハイブリッドに印加されます。外部 90°ハイブリッドの出力は、位相キャンセルによりポート 1 は無信号となり、ポート 2 はシングルミキサーのように完全な IF を出力します。

しかし、同じイメージ除去ミキサー内で、イメージ周波数信号 RF2 はどうなるのでしょうか。

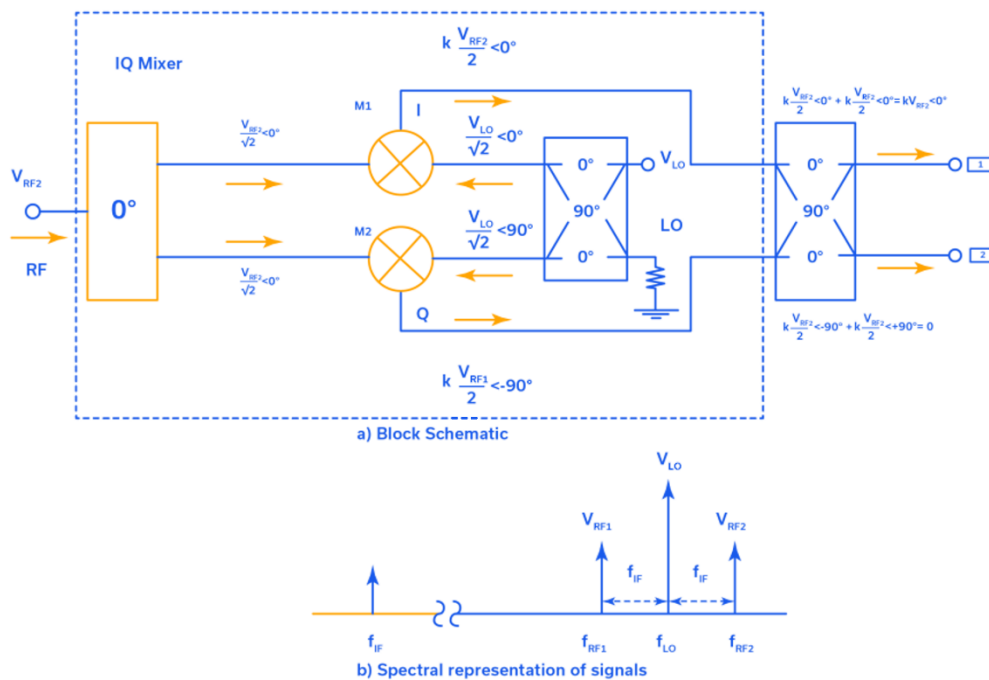


図 7: イメージ除去ミキサーの回路図と、不要なイメージ信号(RF2)のスペクトル表現

1. 入力されたイメージ信号 RF2 は、目的の RF 信号 RF1 と同様に、0°パワースプリッタの出力で、同相の等しい振幅信号に2分割されます。
2. LO 信号は、図 6 に示すように、内部の 90°ハイブリッドにより位相が 90°異なる等振幅の 2 つの信号に分割されます。
3. 入力されたイメージ信号は両方のミキサーで IF 信号に変換され、振幅はそれぞれ等しくなりますが、位相が-90°異なります (RF1 の場合は+90°)。
4. I&Q 出力のこれら 2 つの IF 信号は、外部の 90°ハイブリッドに印加されます。外部ハイブリッドの出力では、位相キャンセルによりポート 2 は無信号となり、ポート 1 はシングルミキサーであるかのように完全な IF を出力します。

図 6 から、RF1 による目的の IF 信号はポート 2 に出力され、図 7 からイメージ側の不要な IF 信号はポート 1 に出力されることがわかります。これにより、設計者は外部 90°ハイブリッドのポート 1 で不要な信号を 50Ω で終端し、目的の IF 信号はポート 2 から取り出すことができます。

## 振幅と位相のアンバランスがイメージ除去に及ぼす影響

現実的な世界では、物事は決して完璧ではありません。ミキサーごとにわずかに変換損失や位相が異なる場合があります。パワースプリッタ(0°および 90°)にも固有の振幅と位相のアンバランスがあります。これら不完全なカスケード効果は、振幅アンバランス A(dB)と位相アンバランス(θ°)として表すことができます。イメージ除去に対する A と θ の影響は、次のように計算できます[1]。

$$\text{Image Rejection (dB)} = -10\log\left(\frac{1+A^2-2A\cos\theta}{1+A^2+2A\cos\theta}\right) \text{ Where } A = 10^{-\left(\frac{A(\text{dB})}{20}\right)}$$

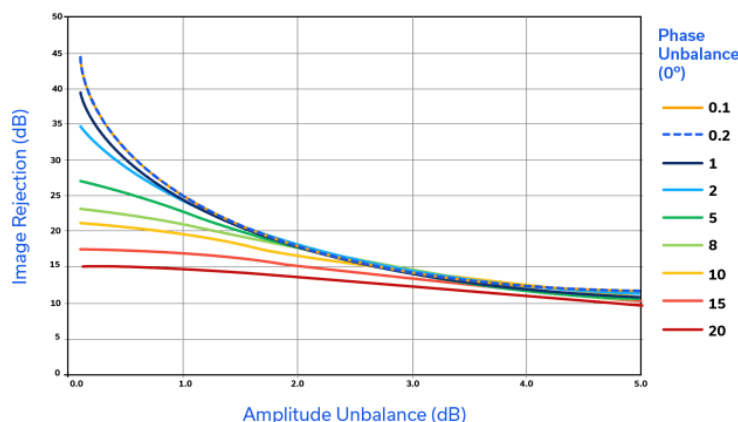


図 8 : イメージ除去 対 振幅および位相のアンバランス



図 8 のグラフから、 $10^\circ$  の位相アンバランスと 1dB の振幅アンバランスでも、20dB のイメージ除去率を得ることが簡単にできます。

図 9 は、SMIQ-65H-D+を 200MHz の IF 周波数で測定した時のイメージ除去率を示しています。これは、ほとんどの帯域で 20dB、40~52GHz では通常 25dB 以上と優れています。

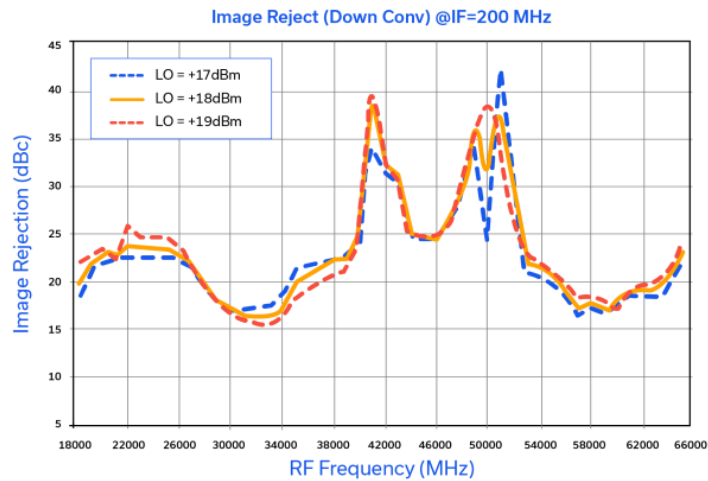


図 9 : SMIQ-653H-D+の測定されたイメージ除去。

この図は、このような広帯域にわたる IRM アプリケーションでの優れた性能を示していますが、この性能をディスクリート部品の構成で実現することは、ほぼ不可能です。

## 単側波帯(SSB)ミキサー

単側波帯(SSB)ミキサー・アプリケーションでは、I&Q ミキサーも極めて重要な役割を果たします。SSB ミキサーのブロック図は IRM ミキサーのブロック図と同じですが、IF 信号が外部  $90^\circ$  スプリッタに印加され、下側波帯(LSB)信号と上側波帯(USB)信号が RF ポートから取り出されている点が異なります。SSB ミキサーは、永らく間 RF システム設計の主力でしたが[2]、送信機では依然として広く使用されています。



## 下側波帯 (LSB) SSB ミキサー

図 10 のブロック図を参照してください。

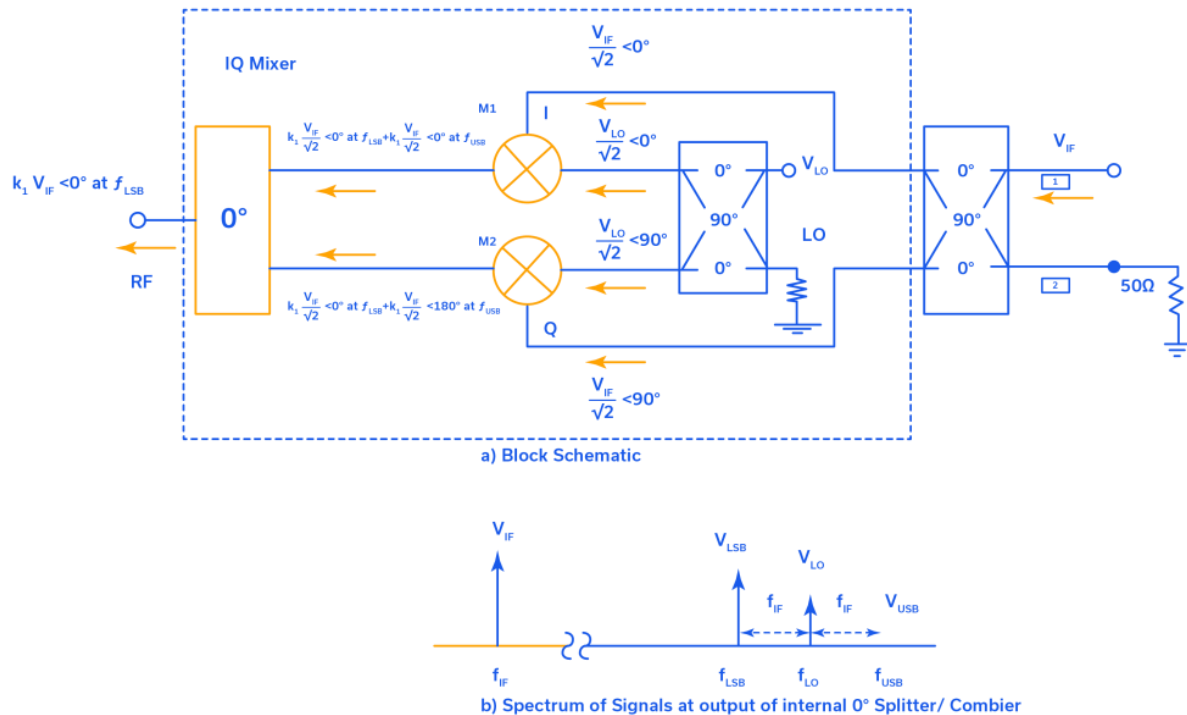


図 10 : LSB 出力を備えた SSB ミキサー。

1. IF 信号は外部 90°ハイブリッドのポート 1 に印加され、位相が 90°オフセットされた同相、等振幅の信号に分割されます。
2. LO 信号は、IQ ミキサーの内部 90°ハイブリッドで位相が 90°異なる等振幅信号に 2分割されます。
3. 入力された IF 信号は、ミキサ M1 と M2 で等振幅の LSB 信号と USB 信号に変換されます。LSB 信号は同相で、USB 信号は 90°位相がずれています。
4. これらの 2 つの信号は、内部の 0°スプリッタ/コンバイナに印加されます。LSB 信号は加算され、フルパワーで出力されます。USB 信号は内部の 0°スプリッタ/コンバイナに接続された単独の抵抗で終端されます。

# 上側波帯(USB)ミキサー

図 11 のブロック図を参照してください。

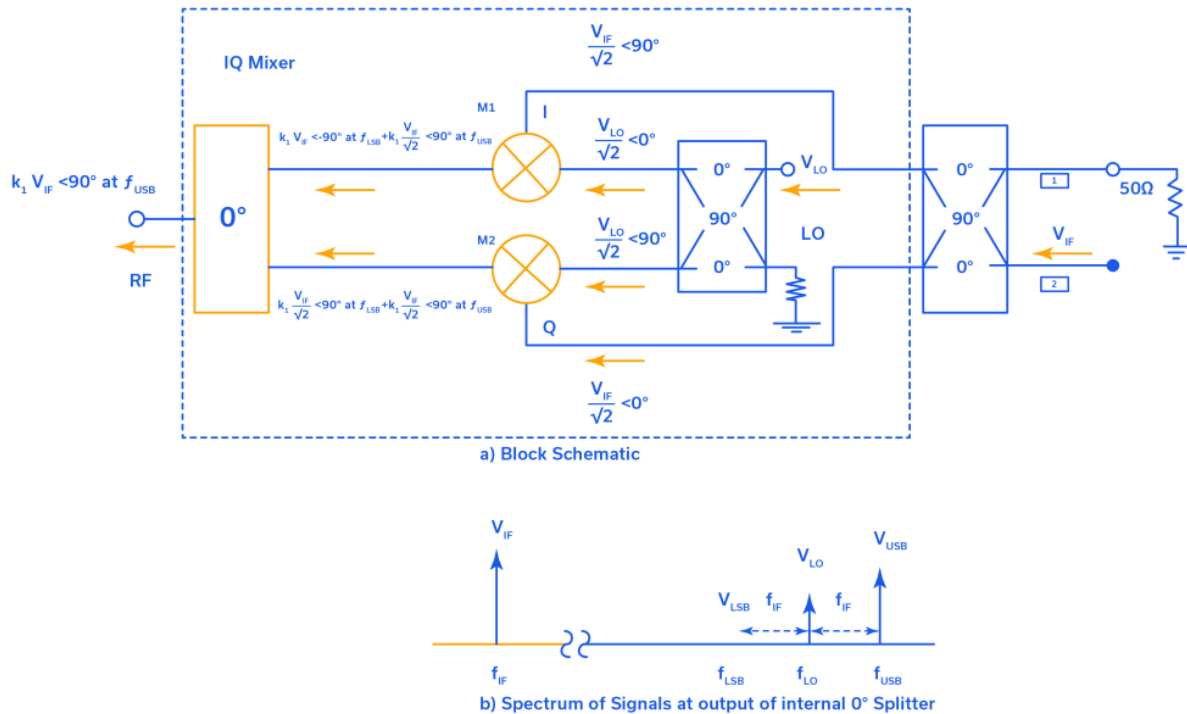


図 11 : USB 出力を備えた SSB ミキサー。

1. IF 信号は、外部 90°ハイブリッドのポート 2 (LSB 動作のポート 1 ではなく)に印加され、同位相、と直交位相の 2 つの等しい振幅信号に分割されます。
2. LO 信号は、IQ ミキサー内部の 90°ハイブリッドで、位相が 90°異なる 2 つの等振幅信号に分割されます。
3. 入力された IF 信号は、ミキサー M1 と M2 で同振幅の LSB 信号と USB 信号に変換されます。LSB 信号は 90° 位相がずれており、USB 信号は同相(互いに相対的)です。
4. これらの 2 つの信号は、内部の 0°スプリッタ/コンバイナに印加されます。USB 信号は加算されて出力され、LSB 信号は内部 0°スプリッタ/コンバイナに接続された単独の抵抗で終端されます。

要約すると、SSB ミキサー動作では、ポート 1 に IF 信号を印加すると、LSB 信号が出力され、ポート 2 に IF 信号を印加すると USB 信号が出力される、というように簡単です。なお、LO 信号のレベルを低く設定してあるため、製品のデータシートに示されているように IQ ミキサーの LO-RF アイソレーションが強化されています。

## 結論

フィルタリングの代わりに、位相キャンセルによって周波数混合による不要波を抑制する素子を組み合わせることにより、I&Q ミキサーは IRM ミキサーと SSB ミキサーの構築を簡単にします。Mini-Circuits は、カタログモデルや特殊な要求に対応するカスタム品など、さまざまなアプリケーション向けの I&Q ミキサーを長年にわたり提供してきました。最近発売された SMIQ-65H-D+ MMIC I&Q ミキサーは、18~65GHz で動作し寸法は 2.67 x 1.9mm のダイ形状です。広帯域なアプリケーションで使用が可能で、お客様のチップやワイヤハイブリッドアセンブリに統合することができます。

この記事では、このようなアプリケーションで SMIQ ミキサーをお客様が使用できるようにするための、IRM ミキサーと SSB ミキサーの動作原理について説明しました。