

无源I/Q单边带镜像抑制混频器简介

An Introduction to Passive I/Q, Single Sideband and Image Reject Mixers

Marki Microwave 公司

在射频微波电路领域，I/Q 混频器架构是工程师所发明的模拟硬件中最精细、复杂和有用的结构之一。早在 1900 年代，著名的通信理论家 John Carson 就通过计算得出结论幅度调制波包含两个重复边带。十一年后电子研究员 Ralph V. L. Hartley 获得了一项关键结构的专利，其至今仍然是这类调制器的基础。¹ 从那以后大量应用都采用了基本的哈特莱结构，从噪声性能有所提高的镜像抑制下变频到简化了滤波的单边带上变频，乃至用于复杂无线数字通信的 I/Q 调制。由于含有对同相、反相和正交信号的微妙处理和重组，I/Q 混频器结构虽然能用电路原理图轻松表示，然而用实际电路搭建起来却异常困难。设计具有高性能宽频带的紧凑 I/Q 结构是一项富有挑战性的任务，而且仍是处于不断研发中的主题。

本文回答了关于 I/Q、单边带 (SSB) 和镜像抑制 (IR) 混频器的最普遍的问题。我们描述了这些混频器各有什么作用，如何构建无源实现，以及它们各自的一般应用和考虑。我们从 Marki 的教程“混频器基础入门”²

和“功分器耦合器入门”³ 中参考了双平衡混频器和用于构成这些器件的正交混合网络的基本特性。

I/Q-SSB-IR混频器有何作用？

单边带上变频

在“混频器基础入门”中讨论过，一个基本混频器能将频率为 f_{in} 的输入信号转化成频率为 $f_{out}=f_{lo} \pm f_{in}$ 的两个信号（见图 1）。其中一个信号（称其为“边带”是因为它们在示波器上出现在 LO 的两边）位于所需频率，另一个“无用边带”需要被滤除以免信号影响到邻近信道。一个理想单边带混频器能只保留一个位于 $f_{LO} - f_{in}$ 或 $f_{LO} + f_{in}$ 的边带，省去了对无用边带的滤波要求。

镜像抑制下变频器

相反地，如果一个输出为 f_{out} 的基本混频器的输入信号为 $f_{in} = f_{LO} \pm f_{out}$ ，那么这两个频率 $f_{LO} - f_{out}$ 和 $f_{LO} + f_{out}$ 的信号都会被转化至同一输出频率。通常其中一个为所需信号，而另一个不需要的“镜像”必须在混频前被滤波。那么理想镜像抑制混频器 (IR 混频器) 则只转化一个边带且可以在没有混频前滤波器的情况下消除镜像信号（见图 2）。

I/Q 信号传输

I/Q 混频器的功能描述起来更为复杂。可以通过数学的或实验的方法来说明，如果两个边带都被发射到基本混频器的接收端，需要一个锁相环才能解调输入信号。如果接收

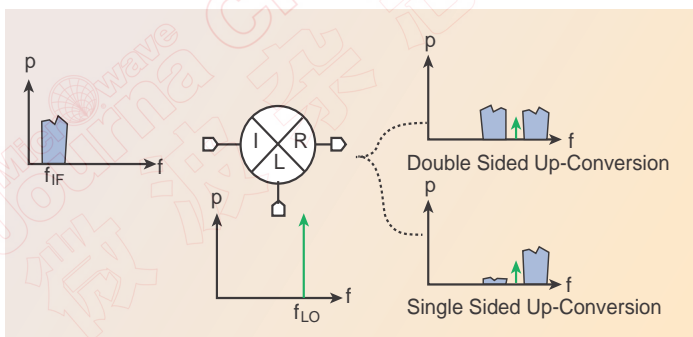


图 1. 单边带和双边带上变频频谱。

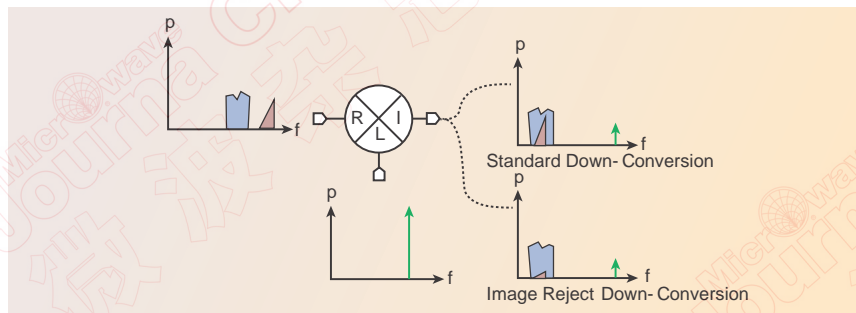


图2. 普通和镜像抑制下变频。

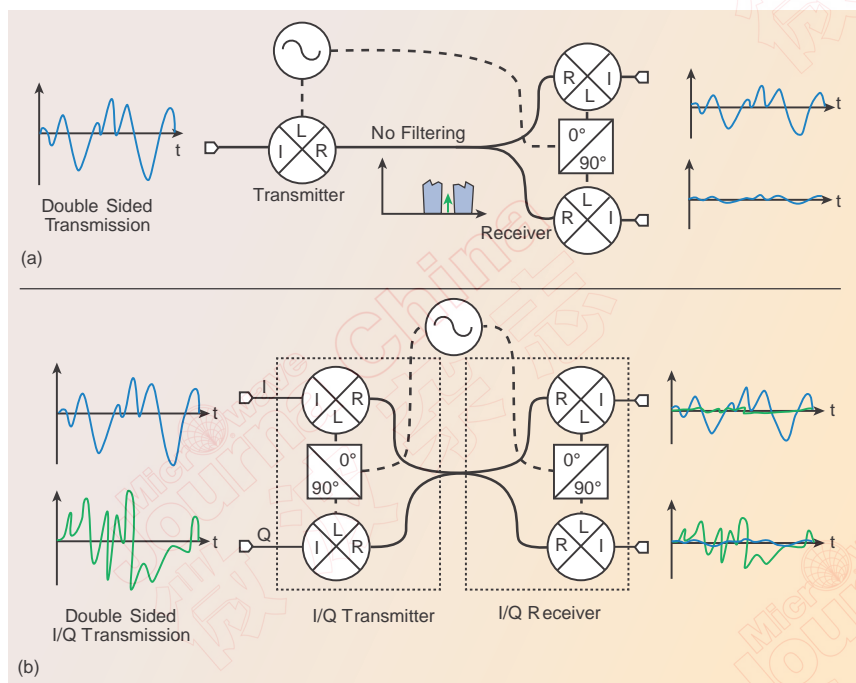


图3. 双边带 (a) 和 I/Q (b) 信号传输。

端与发射端的 LO 具有 90° 的相位差 (正交), 由于继承了 LO 的相位, 两个边带就会相互抵消, 导致看不到输出信号 (见图 3)。

I/Q 混频器利用这一现象来发射两路数据, 一路同相 (I) 另一路正交 (Q), 无需对两个边带进行滤波。如图 3 所示, I 路通过同相的 LO 进行调制和解调, Q 路通过 90° 相位差的 LO 进行调制和解调。

I/Q, SSB和IR混频器/调制器的不同?

被动单边带和镜像抑制混频器是一样的, 但单边带混频器用于上变频

而镜像抑制混频器用于下变频。虽然每个被动 SSB/IR 混频器都包含 I/Q 混频器结构 (见下节), 它们的用途却不同。I/Q 调制通常产生双边带信号, I/Q 解调器通常同时转化两个边带。术语“调制器”通常指集成了 LO 放大器甚至 LO 信号发生器的器件, 而“混频器”通常不包含 LO 信号产生。有时 I/Q 混频器或调制器被厂商宣称镜像抑制混频器, 但是用户需要自行供应 IF 正交合路器。

I/Q-SSB-IR混频器如何工作?

纵观微波、射频乃至光工程, 利

用移相功分器和合路器来抵消不希望有的产物是一种通行的方法。双平衡混频器采用巴伦和魔 T 来抵消直通的 LO 和杂散混频产物。三平衡混频器本质上是两个驱动在推挽模式的双平衡混频器用以覆盖 LO、RF 和 IF 频段。²

I/Q、SSB 和 IR 混频器在平衡混频器的 180° 相移基础之上使用 90° 相移拓展了矢量抵消的概念。两个一样但相位相差 180° 的信号合在一起会相互抵消, 从而在混频器中获得隔离和杂散抵消。I/Q-SSB-IR 混频器巧妙地利用 90° 相移的组合, 对不同边带施加不同相移, 实现了无用分量的抵消。

最简单的理解 I/Q 混频器工作原理的途径是想象一个混频器对两路输入信号进行简单的乘法变化 (见图 4)。这样, 一路在发射机处与同相 LO 相乘的信号可以无失真地出现在具有同相 LO 和低通滤波器的接收机处, 但是如果与反相 LO 相乘则不会出现。图 5 是 Marki 的 I/Q 混频器所采用的实现形式。

理解 I/Q 混频器的另一途径是假设 IF 端输入的是正弦信号而不是任意时变函数。这对理解 SSB-IR 混频器很有用。在 I/Q 上变频中, 反相的 LO 导致上边带与输入信号相差正 90° , 下边带信号与输入信号相差负 90° 。在接收端, 同相的 LO 将使它们抵消, 因为其相位差正好为 180° 。正交的 LO 使得它们旋转回原位置并正向相加。现在你能看到因为两个边带具有 180° 相位差, 我们可以通过同时使两个边带旋转正或负 90° 来消除其中一个而不影响另一个, 然后将它们叠加回来从而得到一个未旋转的原信号副本 (即通过同相 LO 变化而来)。当然这是由 SSB-IR 混频器中的 IF 混合网络所实现的功能。

这个额外的位于 I 和 Q 端口的正

结构	复杂度	组件	优点	中频带宽限制	LO/RF带宽限制
双平衡混频器	中	1巴伦, 1魔T或双工器	杂散对消	魔T(IF双工)	魔T(RF/LO双工)
三平衡混频器	高	5巴伦, 2功分器	杂散对消	IF巴伦	RF/LO巴伦(可以是铁氧体或四分之一波长)
同相/正交(I/Q)混频器	高	2混频器, 1正交混合网络, 1同相功分器	正交信号调制/解调	混频器中频带宽	LO正交混合网络
单边带(SSB)混频器	很高	2混频器, 2正交混合网络, 1同相功分器	上变频边带对消	IF正交混合网络	LO正交混合网络
镜像抑制(IF)混频器	很高	2混频器, 2正交混合网络, 1同相功分器	下变频镜像对消	IF正交混合网络	LO正交混合网络

交混合网络使其中一路信号再次相移90°,然后将这两个大小一样但反相的信号相叠加起来。在额外的相位旋转后,一个边带相位差为180°,另一个边带相位相同,使得一组边带正向相加而另一组边带反向抵消。

看似简单的原理框图掩盖了这些结构所采用元器件蕴藏的高深的复杂性。让我们依次考查各部件,主要关注这些电路小型化,集成化,平面化和宽频带的形式(见表1)。

射频同相功分器:这显然是该结构中最简单的组件了。I/Q混频器要求在RF工作频段具有优秀的相位一致性和低损耗,并且需要隔离度来减小杂散产物。阻性功分器可行但是损耗比电抗性的T型结高。然而,明显的解决方案就是Wilkinson功分器,它能提供低损耗,相位匹配和高隔离,尽管它含有占用大量区域的电阻和1/4传输线。

匹配的混频器:混频器的选择余地很大(单管二极管、平衡FET、吉尔伯特单元、三平衡等等),但是对大多数微波应用来讲,最容易想到的选择是双平衡二极管混频器。该混频

器能被平面化,实现高隔离和杂散抑制、高1dB压缩点、良好的相位延迟可重复性,以及幅度平衡和在所有三个端口单端工作。一个缺点是它的工作频率受限于IF端口的魔T结构,

但这还不算是I/Q-SSB-IR混频器中最主要的频率限制因素。

本振正交混合网络:从集成角度而言,事情开始变得难上加难了。用微带电路设计数倍频程的Wilkinson功分器是可能的,双平衡混频器所需的数倍频程的巴伦也已在平面形式的MMIC电路中实现,大部分是在Microlithic平台实现。⁴然而,正交混合网络(本质上是一个具有90°相移的3dB定向耦合器)实现起来就很困难了,尤其是带宽超过一倍频程的。目前只有Microlithic平台曾达到过。大多为平衡放大器设计的可用的表贴正交混合网络都是窄带的。然而,现在有很多合理的方法来获得正交信号,所以我们预期未来会在微波频段有更多实现形式。

IF正交混合网络:这里开始集成简直就是不可能的事情了。IF频率

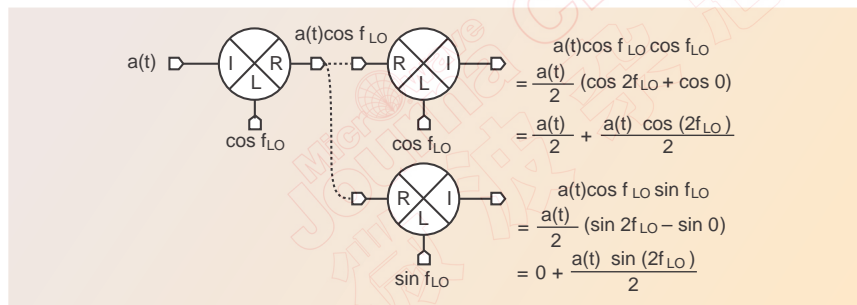


图4. 具有同相和反相LO的双边带信号传输。

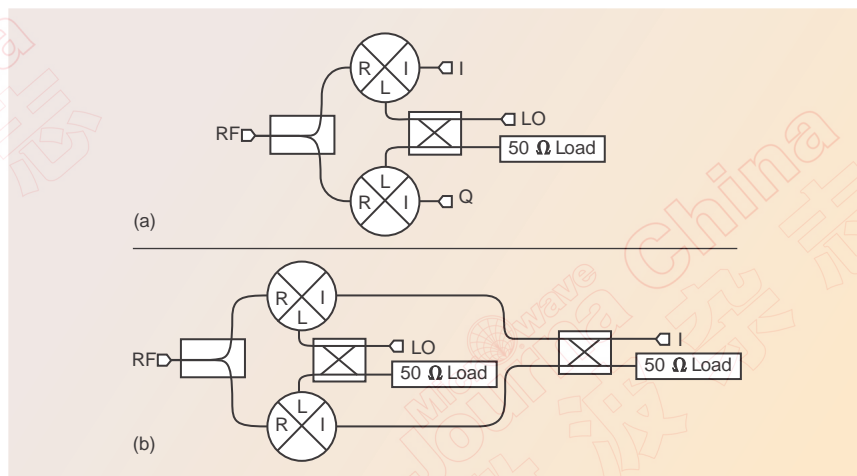


图5. I/Q混频结构(a)和镜像抑制/单边带混频结构(b)。

比 LO 低, 意味着 $1/4$ 波长急剧增加。这使得实现一个带线正交混合网络更加困难, 通常工程师需要借助磁性材料。铁氧体和吸波材料不能集成到平面结构中, 因此被动 SSB-IR 结构通常需要外部 IF 混合网络。对于这个问题的首选方案是将 I 和 Q 端口直接连接至高速数模转换器 (DAC), 其能够数字化地实现相移。这也使得校准和补偿 I/Q 结构中的不平衡性成为可能。

什么时候采用 I/Q-SSB-IR 混频器?

上变频的主要难点是将输入的低频信号变化成无失真的高功率高频输出信号, 而下变频的主要难点是将高频信号变化成具有最大动态范围的低频输出。这里的问题是混频器 (有时候是放大器) 会产生需要被滤除的杂散分量, 使得外差和超外差结构必须有足够高的中频才能保证无用的镜频和边带能被充分滤除且需要的信号不被过分衰减。SSB-IR 传输系统通过平衡结构对消镜像/边带信号省去了滤波要求, 从而省掉了要占用很大空间和成本的滤波器。对于 IF 频率远远低于 LO 频率, 两个输出的边带太近以致难以滤除, 所以更需要 SSB-IR 混频器。IR 混频通过消除边带噪声也能将系统的噪声系数提高 3dB。

但是, 不要简单的认为 SSB-IR 是万能的 (见图 6)。SSB 混频器在单边带上变频时不能提高 LO 到 RF 隔离, 并且 $2IF \times 1LO$ 的交调仅仅因为功分而被抑制了 3dBc。⁵ 因为 LO 直通和 $2IF \times 1LO$ 交调只和所需边带相差 f_{IF} , 这样就有两个杂散紧挨着所需边带信号, 比无用边带相隔 $2f_{IF}$ 还近。如果需要比 LO 隔离所需的杂散抑制还高, 那么就需要外差结

构。类似地 $2RF \times 2LO$ 的杂散也没有被镜像抑制混频器抑制。这需要一个低通滤波器来将其滤除, 限制了超低 IF 系统的动态范围。最后, 镜像和有用边带只被抑制了 20~50dB (对于窄带、频率较低的系统更多而对于宽带系统较少)。这主要受限于混频器随着频率、温度和时间变化的幅度相位平衡性。尽管如此, IR/SSB 混频器对于多普勒天气雷达和量子计算仍然非常重要, 它们使用低中频频率且动态范围要求合理。

I/Q 传输系统从另一途径解决杂散和镜像产物的问题。因为他使用两个边带来调制 RF 信号, 所以没有滤

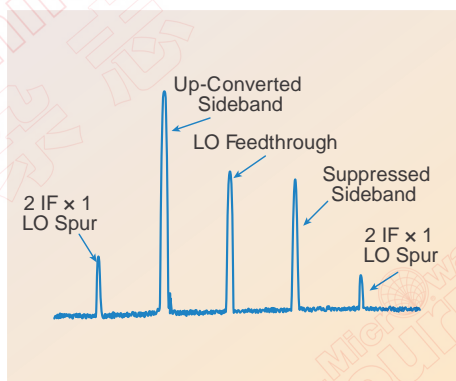


图 6. 实际单边带上变频频谱。

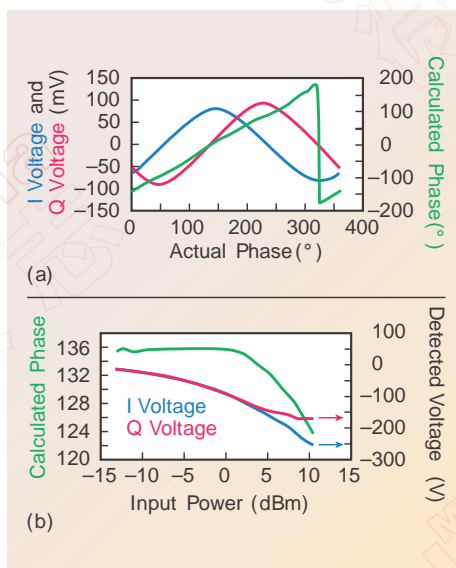


图 7. 一个用于鉴相器的 I/Q 混频器的所得相位与 IQ 电压 (a) 和输入功率 (b) 的关系。

除镜像和无用边带的要求。该系统的主要限制是 I 通道会泄漏至 Q 输出, 反之亦然, 从而将动态范围限制在与边带抑制比有关的抑制比上。该抑制程度一般来说远远小于杂散、多音交调或者其他噪声源, 所以杂散不是个问题。相似的, 有些未抑制的载波直通是将接收机 LO 锁定为发射机 LO 时所必须的, 所以 LO 到 RF 抑制也不是特别重要。所有这些都将限制动态范围, 但是对于大多数通信系统来讲, 省去滤波器和附加变频级所带来的成本节省大大超过 I/Q 混频器给系统带来的动态范围限制 (尤其是经过补偿后)。这就是为什么每个现代主流通信系统, 包括所有移动电话和 Wi-Fi 标准, 都采用一些高级 I/Q 调制的变种, 例如 QAM, QPSK 或 OFDM。

我能用 I/Q-SSB-IR 做什么?

I/Q 混频器最显而易见的应用就是通信。然而, 这些产品也有许多其他应用空间, 包括:

综合器 / 脉冲 / 信号发生器: 一个单边带混频器能与固定的高 LO 和可调的低频信号发生器组合起来形成易用的综合器 / 高频任意波形发生器 (AWG)。这在有支持该应用的双通道 DAC 时尤其有效。

宽带扫描仪: 这与综合仪应用正好相反。高性能综合仪和扫描仪一般都采用多级变频, 并含有开关滤波器库和复杂的频率方案。动态范围要求不太高的应用场合可以使用单个镜像抑制混频器来扫描整个 RF/LO 带宽, 以 Microlithic 为例范围可达 2~18GHz。

鉴相器: 如前所述, I/Q 混频器被频繁用于通信系统中的相位调制器 (例如 QPSK)。双平衡混频器经

常用作锁相环中的鉴相器，因为它们具有产生误差信号以使两个信号保持正交的能力。但是它们只能获得部分信息，因为一个给定电压输出可以对应两个不同相位值，且这个值随输入功率变化。然而，这个模糊性可以通过采用 I/Q 混频器来解决。两个输出信号可以被用来确定两个输入信号幅度和特定相位（见图 7）。

光传输系统：在很多方法中，光传输网络都是 I/Q 系统理想的传输媒质。因为杂散光不会耦合进光纤系统，唯一的损害就来自信号自身。这对 I/Q 混频器非常有利，因为不需要对杂散光进行滤除（通常采用某些滤波来应对自生的和放大器的噪声）。这意味着在带宽与双边带传输相同的情况下能够获得两倍效率。这也是众多在高速率光通信系统中采用 I/Q 数

据传输方案的原因之一。

I/Q混频器的未来在哪里？

在几乎所有情形下，I/Q 结构的主要限制就是在很宽频带范围内产生良好匹配的正交相位信号的能力。因此，未来 I/Q 混频器将要求正交信号产生的进步。随着数字信号产生在更高频率的实用，我们预期看到更多的电路将那些最好的数字电路（带有补偿的优良的相位幅度平衡性）和最好的被动模拟电路（高功率容量和单端工作）组合在一起。高速模数转换器（ADC）和 DAC 已经导致大部分 IF 混合网络被淘汰了，并且没有迹象表明这个趋势会停止。

未来最完美的 I/Q 混频器将拥有在巨大的带宽内具有惊人的镜像抑制效果，同时具有难以置信的杂散抑制、

线性度和功率容量，并且所有这些实现在很小的封装中。■

参考文献

1. R. V. L. Hartley, "Modulation System," Patent No. 1,666,206, April 17, 1928.
2. F. Marki and C. Marki, "Mixer Basics Primer - A Tutorial for RF & Microwave Mixers," www.markimicrowave.com/Assets/appnotes/mixer_basics_primer.pdf, 2010.
3. Marki Microwave, "Microwave Power Dividers and Couplers Tutorial - Overview and Definition of Terms," www.markimicrowave.com/Assets/appnotes/microwave_power_dividers_and_couplers_primer.pdf.
4. Marki Microwave, www.markimicrowave.com/2770/Mixers.aspx?ShowTab=113.
5. B.C. Henderson and J.A. Cook, "Image-Reject and Single-Sideband Mixers," WJ Communications, Vol. 12, No. 3, May/June 1985.

自主 研发&生产 DC to 67 GHz



微波 毫米波 精密测试

电缆组件 校准件 适配器

- 小驻波
- 低损耗
- 长寿命
- 高稳定性



南京安崇电子有限公司
www.arance-rf.com



sales@arance-rf.com tech@arance-rf.com
Tel: 86-25-58817997 Fax: 86-25-58072397