

# 混频器件面貌之变迁

Abhishek Kapoor和Assaf Toledano  
ADI公司

## 摘要

半导体工艺和RF封装技术的不断创新完全改变了工程师设计RF、微波和毫米波应用的方式。RF设计人员需要比以往任何时候都更具体、更先进的技术和设计支持。设计技术持续发展，RF和微波器件的性质在不久的将来将大不相同。本文介绍各种类型的混频器、各自的优缺点，以及在不同市场中应用的演变。本文讨论不同混频器件（主要是混频器）不断变化的面貌，以及技术进步如何改变不同市场的需求。

## 简介

在RF和微波设计中，混频是信号链最关键的部分之一。过去，很多应用都受制于混频器的性能。混频器的频率范围、转换损耗和线性度，决定了混频器能否用于特定应用。频率高于30 GHz的设计很难实现，此等频率的器件封装更是难上加难。大部分时候，简单的单、双和三平衡混频器满足了一般市场的需求。但是，随着企业开发出的应用越来越先进，并希望提高每dB的性能，传统混频器便显得捉襟见肘。当今和未来的市场需要这样的混频解决方案：针对各种应用专门定制，性能优化，并且支持基于通用平台的设计以便重复使用。

根据应用类型和最终市场，如今的设计人员会有非常不同的需求。一般而言，现在大多数设计人员需要宽带性能、更高线性度、与信号链中其他器件更高的集成度，以及更低的功耗。但是，细分市场不同，以上各种需求的优先级也大不相同。

## 不同种类的混频器和频率转换器

讨论混频器和频率转换器在不同市场中的应用之前，了解不同类型混频器的基本特性会很有用。顾名思义，混频器将两个输入信号混合，产生其频率之和或频率之差。利用混频器产生比输入信号高的输出频率时（两个频率相加），称为上变频。利用混频器产生比输入信号低的输出频率时，称为下变频。

下一节说明各类常用混频器的高层次设计和优缺点。

### 单/双/三平衡无源混频器

最常见的混频器类型是无源混频器。此类混频器有不同的设计样式，如单端、单平衡、双平衡和三平衡等。使用最广泛的架构是双平衡混频器。这种混频器很受欢迎，因为其性能出色，实现和架构简单，性价比高，并能提供多种选项。

无源混频器通常以简易性而出名，不需要任何外部直流电源或特殊设置。此类混频器还有其他为人所称道的特性，包括宽带宽性能、良好的动态范围、低噪声系数(NF)以及端口间良好的隔离。此类混频器的设计及其无外部直流电源要求的优势，使得混频器输出端的噪声系数很低。一个较好的经验法则是，无源混频器的噪声系数等于其转换损耗。此类混频器非常适合有低噪声系数要求的应用，而有源混频器无法满足这一要求。此类混频器擅长的另一个领域是高频和宽带宽设计。从RF一直到毫米波频率，它们都能提供良好的性能。混频器的另一个重要特性是不同端口之间的隔离。此特性往往决定了具体应用可使用何种混频器。三平衡无源混频器的隔离性能通常最佳，但其架构复杂，而且其他特性（如线性度等）有些不足。双平衡无源混频器的端口间隔离性能良好，同时架构较简单。对大多数应用而言，双平衡混频器实现了隔离度、线性度和噪声系数的最佳组合。

就信号链整体而言，线性度（也常用三阶交调截点IIP3来衡量）是RF和微波设计的最重要特性之一。无源混频器通常以高线性度性能而出名。遗憾的是，为了实现最佳性能，无源混频器需要高LO输入功率。多数无源混频器使用二极管或FET晶体管，需要大约13 dBm到20 dBm的LO驱动，这对某些应用情形来说是相当高的。高LO驱动要求是无源混频器的最大弱点之一。无源混频器的另一个弱点是混频器输出端的转换损耗。此类混频器是无增益模块的无源元件，故而混频器输出端往往有很高的信号损耗。例如，若混频器的输入功率为0 dBm，且混频器有9 dB的转换损耗，则混频器输出将是-9 dBm。总的来说，此类混频器非常适合测试测量和军用市场，稍后将予以讨论。

#### 无源混频器的优势

- ▶ 宽带宽
- ▶ 高动态范围
- ▶ 低噪声系数
- ▶ 高端口间隔离

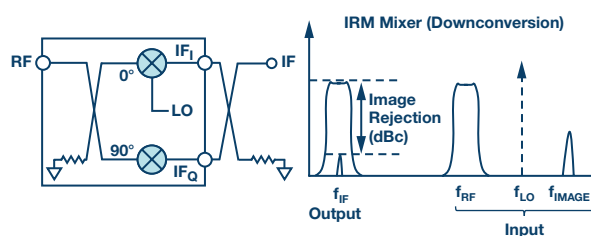


图1. I/Q混频器框图和镜像抑制频域图

#### I/Q镜像抑制(IRM)混频器

I/Q混频器是一类无源混频器。它不但拥有常规无源混频器的优势，还具备其他优势，即不通过任何外部滤波便可消除不需要的镜像信号。此类混频器用作下变频器时也称为IRM（镜像抑制混频器），用作上变频器时则称为SSB（单边带混频器）。I/Q混频器由两个双平衡混频器构成，LO信号一分为二，然后经过相移而相差90°（一个混频器为0°，另一个混频器为90°）。通过此相移，混频器得以仅产生一个边带（需要的）的信号，而抑制不需要的信号。

图2在同一频谱图上显示了I/Q混频器（紫色线）和双平衡混频器（蓝色线）的性能。可以看到，I/Q混频器通过提供45 dB抑制来抑制不需要的低边带，而双平衡混频器同时产生了高边带和低边带。

像双平衡无源混频器一样，I/Q混频器也需要高LO输入功率。从架构看，I/Q混频器采用两个双平衡混频器，因此与两个双平衡混频器相比，所需的LO驱动往往要多出大约3 dB。I/Q混频器对精密平衡的相位和幅度输入匹配很敏感。输入信号、混合结构、系统板或混频器本身的任何偏离90°的相移或幅度失衡，都会直接影响镜像抑制水平。通过外部校准混频器以改善性能，可以校正这些误差的影响。

由于边带抑制特性，I/Q混频器常用于需要消除边带但不通过外部滤波的应用，同时它能提供非常好的噪声系数和线性度。此类市场的常见例子是微波点对点回程通信、测试测量仪器仪表和军事用途。

#### I/Q混频器的优势

- ▶ 固有的镜像抑制
- ▶ 无需昂贵的滤波
- ▶ 良好的幅度和相位匹配

#### 有源混频器

另一种常见混频器是有源混频器。有源混频器主要有两类：单平衡和双平衡（也称为吉尔伯特单元）混频器。有源混频器的优势是LO端口和RF输出端内置增益模块。此类混频器会为输出信号提供一定的转换增益，并且输入LO功率要求较低。有源混频器的典型LO输入功率是0 dBm左右，远低于大多数无源混频器。

有源混频器常常还集成LO倍频器，用来将LO频率倍乘到更高的频率。此倍频器对客户非常有利，无需高LO频率便可驱动混频器。有源混频器通常具有很好的端口间隔离。然而，其缺点是噪声系数较高，而且多数情况下线性度较低。对输入直流电源的需求影响了有源混频器的噪声系数和线性度。有源混频器常用于通信和军用市场，低LO驱动和集成转换增益的需求对此类市场可能很重要。在测试测量市场，有源混频器主要用作IF子部分的第三级或最后一级混频器，或用于低端仪表（集成化和高性价比设计比噪声系数更重要）。

#### 有源混频器的优势

- ▶ 高集成度、小尺寸
- ▶ LO驱动要求低
- ▶ 集成LO倍频器
- ▶ 良好的隔离，但线性度和噪声系数不佳

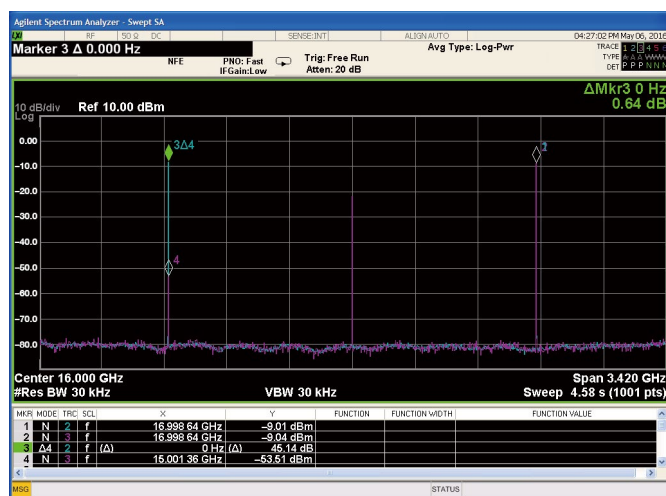


图2. HMC773A无源混频器和HMC8191 I/Q混频器的频谱图，IF输入为1 GHz，LO输入为16 GHz。

## 集成频率转换混频器

由于客户需要更完整的信号链解决方案，还有一类混频器变得颇受欢迎，那就是集成频率转换器。此类器件由不同功能模块构成，这些模块连接在一起形成一个子系统，使得客户的最终系统设计更简单。此类器件在同一封装或芯片中集成不同模块，例如混频器、PLL（锁相环）、VCO（压控振荡器）、倍频器、增益模块、检波器等。可将此类器件制作成SIP（系统化封装），即把多个裸片组装到同一封装中，或一个裸片包括所有设计模块。

通过将多个器件集成到一个芯片或封装中，频率转换器可以给设计人员带来很大好处，比如：尺寸更小、器件更少、设计架构更简单，更重要的是，产品上市时间更快。

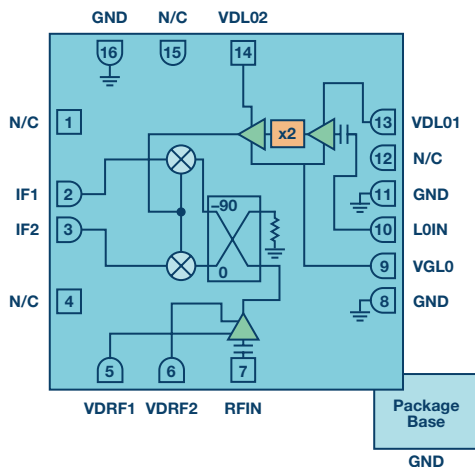


图3. 集成频率转换混频器HMC6147A的功能框图

## 混频器在不同市场中的应用

了解各类常用混频器及其优缺点之后，我们便可讨论其在不同市场中的应用。

### 蜂窝基站和中继器市场

对于蜂窝基站和中继器市场，成本和集成度是最大的考量因素。随着全球3G、LTE和TDD-LTE网络的快速增长，运营商需要开发能在多个采用不同频段的地区性市场重复利用的RF硬件平台。在技术上和资金上，各地区性市场的需求是不同的。因此，蜂窝基站所用的混频器必须能覆盖多个蜂窝频段，达到大量部署所要求的低价位水平，并提供更高的集成度以便加快开发和降低成本。所以，宽带、有源、高集成度混频器（频率转换器）常用于这一市场。

一级、二级和蜂窝基站供应商常常使用ADI公司基于SiGe的BiCMOS混频器，其集成LO/IF放大器和PLL/VCO。[ADRF6655](#)（集成PLL/VCO的0.1 GHz至2.5 GHz宽带混频器）、[AD8342](#)（LF至3 GHz宽带有源混频器）和[ADL5811](#)（集成IF和宽带LO放大器的0.7 GHz至2.8 GHz混频器）是蜂窝基站和接收机设计常用的混频器。这些混频器混合使用有源和无源混频器技术，以低成本集成多个RF器件，并提供宽带性能。

### 点对点微波回程（通信基础设施）

通信基础设施（有线和无线）制造商正在转向集成度更高的设计，且特别注重高性能，以支持数据吞吐所需的最高调制。为了支持更高的数据速率，回程无线电必须具有非常高的性能。二二十年前，大多数OEM（原始设备制造商）采用平衡混频器和外差架构，通用混频器即可很好地满足多种点到点无线电设计需求。后来，OEM开始采用I/Q（或IRM）混频器来改善性能并减少滤波电路。如上所述，消除镜像频率是I/Q混频器的固有能力，因此无需进行成本高昂的干扰边带滤波。ADI公司提供种类广泛的I/Q混频器，可覆盖所有商用微波频段。这些混频器大大简化了基站设计，并显著提高了系统性能以支持更高的QAM。

现在，产品上市时间越来越短，对点到点回程性能的要求越来越高，因此OEM开始采用集成度更高的I/Q上变频器和下变频器。ADI公司的典型上变频器（如[HMC7911LP5E](#)和[HMC7912LP5E](#)）将I/Q混频器、2倍有源倍频器和RF输出端的驱动放大器集成在同一封装中。因此，无需再选择多款匹配器件并优化各器件的性能，设计人员现在可以只选择一款上变频器，并把更多时间投入到优化信号链的整体性能上。

类似地，ADI公司的I/Q下变频器（如[HMC1113LP5E](#)、[HMC977LP4E](#)和[HMC6147ALC5A](#)）将I/Q混频器、LNA、2倍有源倍频器和LO放大器集成在同一封装中。ADI公司的下变频器提供业界卓越的性能，全频段的镜像抑制高达40 dBc，噪底低至2.5 dB，适合所有商用微波回程接收机设计。ADI公司是业界唯一提供全系列上变频器和下变频器产品的公司，这些产品支持从6 GHz到42 GHz的所有商用微波频段。

微波回程无线电市场的性能和集成度竞争非常激烈。几年前，多数OEM聚焦于某些特定频段，仅针对这些频段来研发解决方案。如今，随着全球无线需求的增长和新频谱的分配，多数OEM计划开发支持6 GHz到42 GHz的所有商用微波频段的无线电。因此，基站设计不再依赖于分立器件或部分集成的器件。新设计要求采用平台化方法，以便能将常见器件用于多个频段。



因此，多数OEM现在期望通过一个通用混频平台来覆盖多个无线电频段，并获得最佳性能和规模经济。ADI公司的ADRF6780（6 GHz至24 GHz I/Q调制器）便是在这一方向上取得的一大进步。现在利用单个I/Q调制器或I/Q解调器，OEM便能设计支持6 GHz到24 GHz的九个不同频段的微波回程无线电。如图4所示，ADRF6780将I/Q混频器、可选的LO倍频器、VVA、对数检波器和SPI可编程的四通道分离缓冲器集成在同一封装中。这款器件功能灵活，OEM既可将其用于传统的外差架构中（IF为0.8 GHz至3.5 GHz，无需多个器件），也可将其用于直接变频架构（零中频架构）中（一个器件支持RF至基带）。由于集成了LO倍频器和缓冲器，减少了对高输入频率和功率的需要。此器件还具有VVA增益控制功能，需要时可提供恒定的输出增益。此器件的所有与增益设置、镜像抑制、校准等有关的功能，都可以通过SPI总线控制，设计人员在设计中使用起来更简便。

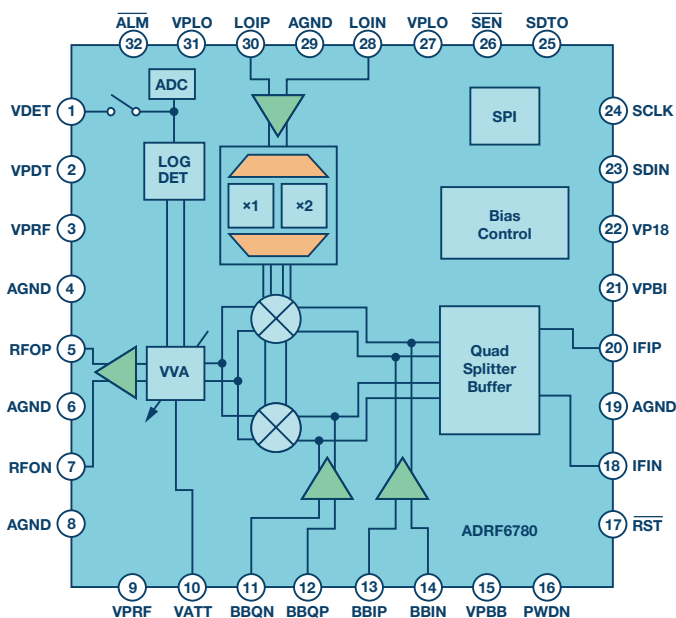


图4. 宽带微波上变频器ADRF6780功能框图

图5显示了ADRF6780校准后的边带抑制性能，并突出反映了即使在宽带情形下，这款新一代器件也能提供先进的RF性能。

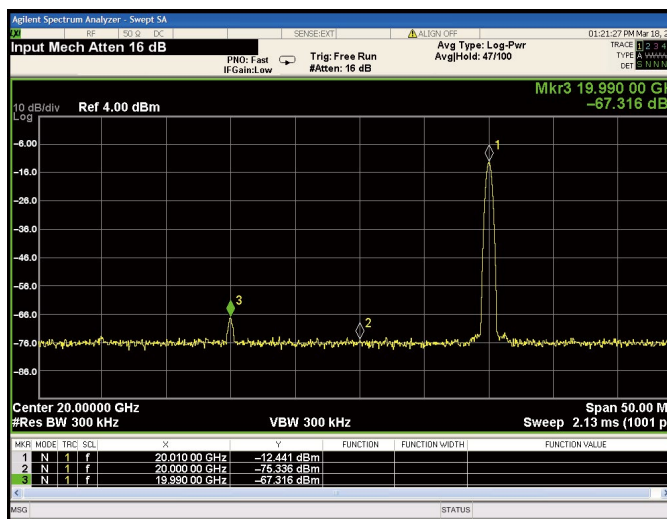


图5. ADRF6780边带抑制和载波馈通调零

新转换器重新定义了设计人员设计微波基站信号链的方法。利用这款转换器，RF设计人员现在可以把更多时间花在信号链性能优化和软件升级上，而传统的匹配各器件的方法只能实现系统基本特性。

#### 测试测量仪器仪表和军用

测试测量(T&M)仪器仪表和军用市场对宽带性能一直有着非常独特的需求。此类市场中的大部分应用（如电子战、雷达、频谱分析仪等）是高度定制化的，需要极其出色的信号完整度和精度。这些应用通常还跨越广泛的频谱（宽带要求），需要能够检测超低保真度信号（低噪声系数和高线性度）。ADI公司市场营销总监Duncan Bosworth于2015年6月发表了一篇文章“[多功能：困境抑或现实？](#)”，详细讨论了军工客户的宽带需求。

宽带、设计灵活性和高性能的需求，使得测试测量和军工客户更喜欢使用能够个别定制和优化以达到特定设计目标的分立混频器。如上所述，无源混频器的线性度和噪声系数优于集成或有源混频器。顺带说一句，即便在无源混频器中，宽带和最优RF性能（线性度、噪声系数、杂散等）也像一枚硬币的两面。传统上，半导体公司用带宽来交换RF性能，或者相反。结果，军工和测试测量设计人员并联使用多个窄带器件来覆盖宽频率范围。通过这种方法，他们能在各窄带中提供最佳性能。这样的解决方案是有效的，但设计极其复杂、昂贵且难以维护。

随着技术和工艺的进步，ADI等公司现在能够简化设计。利用宽带混频器，测试测量和军工客户可以获得与窄带器件相当或更好的性能，而且一个器件就能覆盖多个频段。2009年以来，ADI公司推出了最齐全的无源宽带混频器系列，包括单/双/三平衡混频器、I/Q混频器、高IP3和次谐波混频器。设计人员再也不需要牺牲性能来实现宽带设计。ADI公司业务开发总监Chandra Gupta最近发表了一篇文章“[探究宽带频率转换器](#)”，详细讨论了ADI公司如何利用宽带频率转换器简化测试测量和军用设计。图6突出展示了宽带器件（包括宽带混频器）如何简化测试测量和军工应用的整个信号链。

虽然其他市场大多已开始转向集成混频器以降低成本并简化设计，但诸如HMC773ALC3B（6 GHz至26 GHz双平衡混频器）和HMC1048LC3B（2 GHz至18 GHz双平衡混频器）之类的分立混频器在测试测量和军工客户中仍然占有突出地位。对于频谱分析仪和信号分析仪等高精度测试测量仪器仪表应用，以及对于先进雷达和电子战应用，I/Q混频器开始受到欢迎。这些混频器无需外部滤波，同时仍有良好的镜像抑制性能。

过去，业界中的大部分I/Q混频器受窄带限制。但现在，随着ADI公司通过创新不断突破RF和微波的限制，业界将拥有两款新型宽带I/Q混频器——HMC8191LC4（6 GHz至26 GHz I/Q混频器）和HMC8193LC4（2.5 GHz至8.5 GHz I/Q混频器）。测试测量和军工客户可以用这两款混频器取代最多八个窄带I/Q混频器，同时仍能

实现同样的应用设计目标。设计人员再也不需要放弃性能来换取宽带性能。

未来几年, 测试测量和军用市场可能会继续使用分立式混频解决方案。然而, 随着便携式和低功耗需求的增长, 我们很快会看到这些应用将逐渐提高集成度并降低功耗。无源混频器先天具有更高的线性度、更好的噪声系数和更低的功耗, 但集成灵活性有限。有源混频器具有高集成度, 但功耗和噪声系数不如人意。我们预期在这个方向上会有更多创新和更先进的研发成果。或许有一天, 我们会拥有两全其美的混频器——既能提供高线性度和宽带性能, 又有较低的功耗和较小的尺寸。这一天不会太远。

## 总结

微波行业不断取得令工程界惊讶的技术进步。现在对微波混频器件的需求变得比以往更加多样化, 与特定市场应用的关系更加密切。过去的通用混频器产品将不再适用不同市场中的新型应用。OEM更多地以平台和应用为中心来看待其设计。半导体业者必须能够为每个细分市场提供混频解决方案。OEM需要开始与ADI公司等半导体行业的先锋企业密切合作, 以开发混频解决方案, 而不只是混频器件。

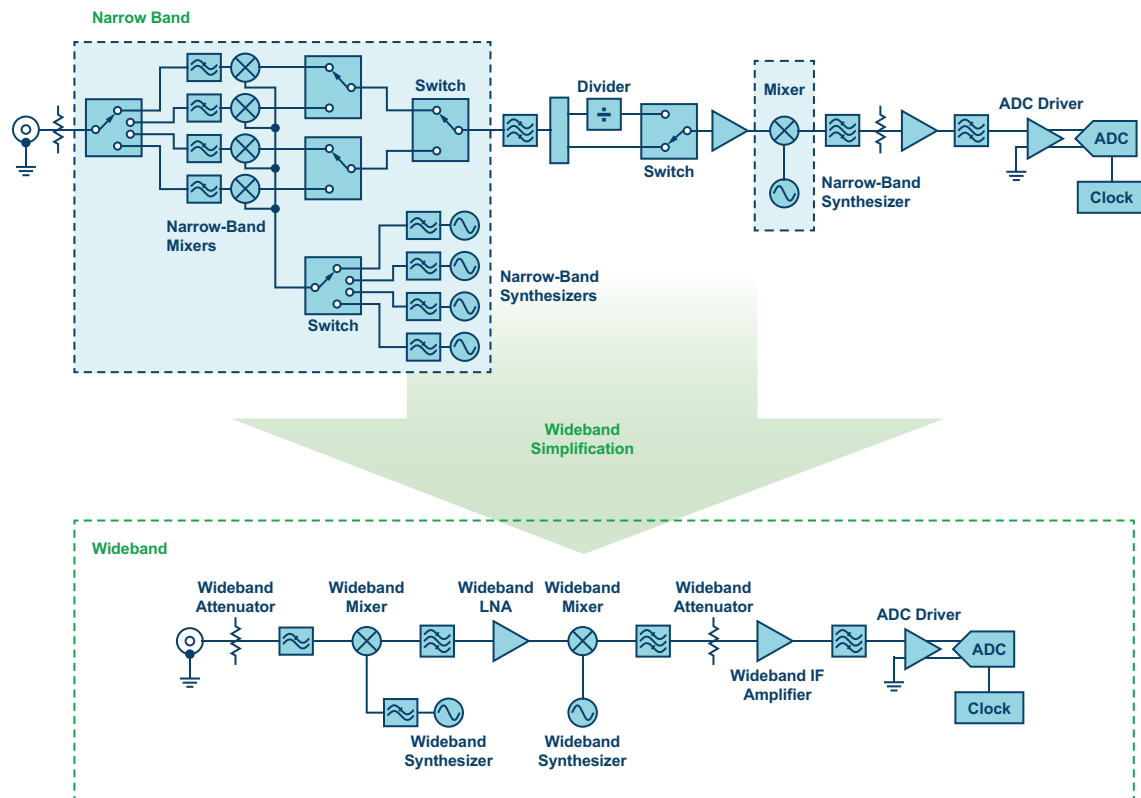


图6. 宽带器件简化测试测量和军工应用的整个信号链

| 技术规格    | HMC8193 |     |     | HMC8191 |     |      | 单位  |
|---------|---------|-----|-----|---------|-----|------|-----|
|         | 最小值     | 典型值 | 最大值 | 最小值     | 典型值 | 最大值  |     |
| RF和LO范围 | 2.5     |     | 8.5 | 6       |     | 26.5 | GHz |
| IF范围    | dc      |     | 3.5 | dc      |     | 5    | GHz |
| 转换损耗    |         | 8   | 10  |         | 9   | 12   | dB  |
| 镜像抑制    | 23      | 32  |     | 20      | 25  |      | dB  |
| 输入IP3   | 17      | 21  |     | 15      | 20  |      | dBm |
| LO至RF隔离 | 37      | 45  |     | 40      | 45  |      | dB  |
| LO至IF隔离 | 30      | 40  |     | 35      | 40  |      | dB  |

## 作者简介

Abhishek Kapoor是ADI公司射频与微波部(RFMG)的市场开发经理。他负责制定射频与微波部的整体市场策略,以及在新兴市场赢得业务。在其职业生涯中,他从事过射频和半导体行业的工程设计、产品管理、销售、市场营销和业务开发等多种工作。他于2007年获得弗吉尼亚理工学院电气工程学士学位,2013年获得北卡罗来纳大学Kenan-Flagler商学院(Chapel Hill)工商管理硕士学位。

Assaf Toledano是ADI公司射频与微波部的应用工程经理。他于2004年获得麻省大学洛威尔分校电气工程学士学位(B.S.E.E.),2009年获得美国东北大学电气工程硕士学位(MSEE)。他于2004年加入ADI公司,做过两年测试应用工程师。随后被调往高速数模转换器部,作为产品工程师工作了七年。他在ADI公司内部和外部发表过多篇技术文章。

## 在线支持社区

访问ADI在线支持社区,与ADI技术专家互动。提出您的棘手设计问题、浏览常见问题解答,或参与讨论。



请访问[ezchina.analog.com](http://ezchina.analog.com)

**全球总部**  
One Technology Way  
P.O. Box 9106, Norwood, MA  
02062-9106 U.S.A.  
Tel: (1 781) 329 4700  
Fax: (1 781) 461 3113

**大中华区总部**  
上海市浦东新区张江高科技园区  
祖冲之路 2290 号展想广场 5 楼  
邮编: 201203  
电话: (86 21) 2320 8000  
传真: (86 21) 2320 8222

**深圳分公司**  
深圳市福田中心区  
益田路与福华三路交汇处  
深圳国际商会中心  
4205-4210 室  
邮编: 518048  
电话: (86 755) 8202 3200  
传真: (86 755) 8202 3222

**北京分公司**  
北京市海淀区西小口路 66 号  
中关村东升科技园  
B-6 号楼 A 座一层  
邮编: 100191  
电话: (86 10) 5987 1000  
传真: (86 10) 6298 3574

**武汉分公司**  
湖北省武汉市东湖高新区  
珞瑜路 889 号光谷国际广场  
写字楼 B 座 2403-2405 室  
邮编: 430073  
电话: (86 27) 8715 9968  
传真: (86 27) 8715 9931

©2016 Analog Devices, Inc. All rights reserved. Trademarks and registered trademarks are the property of their respective owners. Ahead of What's Possible is a trademark of Analog Devices. TA14770sc-0-9/16

[analog.com/cn](http://analog.com/cn)

