

借助差分接口改善射频收发器设计性能

作者：Mingming Zhao

简介

传统收发器设计中，50 Ω 单端接口广泛用于射频和中频电路。当电路进行互连时，应全部具有匹配的 50 Ω 输出和输入阻抗。然而在现代收发器设计中，差分接口常用在中频电路中以获得更好的性能，但实际设计过程中，工程师需要处理几个常见问题，包括阻抗匹配、共模电压匹配以及复杂的增益计算。了解发射机和接收机中的差分电路对优化增益匹配和系统性能很有帮助。

差分接口优势

差分接口有三大主要优势。首先，差分接口可抑制外部干扰和接地噪声。其次，它可以抑制偶次阶输出失真。这对于零中频(ZIF)接收机非常重要，因为出现在低频信号中的偶次阶成分无法滤除。第三，输出电压可达到单端输出的两倍，从而将给定电源上的输出线性度提高 6 dB。

本文论述三种情况下的接口解决方案：ZIF 接收机、超外差式接收机和发射机。这三种架构广泛用于射频拉远单元(RRU)、数字直放站和其他无线测试仪器中。

ZIF 接收机接口设计和增益计算

在零中频(ZIF)接收机设计中，IF 信号是复信号，直流和低频率信号来提供有用信息。典型解调器在驱动 200 Ω 至 450 Ω 负载时可提供最佳性能，同时 ADC 驱动器的输入阻抗一般并非 50 Ω，因此设计系统时采用直流耦合很重要也很困难。

图 1 显示了一个ZIF接收机配置，它使用两个低噪声放大器(LNA) ADL5523、一个 400MHz至 6000MHz正交I/Q解调器 ADL5380、一个作为本振(LO)的宽带频率合成器 ADF4350以及一个双通道数字可编程可变增益放大器(VGA) AD8366。表 1 显示了相关ADL5380 接口和增益参数。

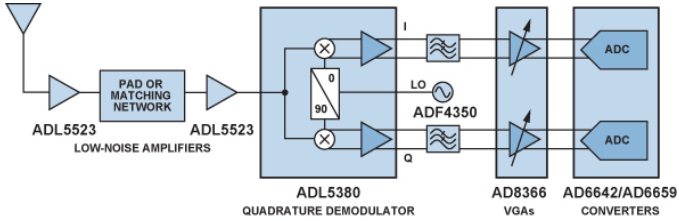


图 1. ZIF 接收机框图

表 1. ADL5380 接口和增益参数

测试条件	$V_S = 5\text{ V}$, $T_A = 25^\circ\text{C}$, $f_{LO} = 900\text{ MHz}$, $f_{IF} = 4.5\text{ MHz}$, $P_{LO} = 0\text{ dBm}$, $Z_{IN} = 50\ \Omega$	
参数	值	备注
电压转换增益	6.9 dB	I 和 Q 输出上具有 450 Ω 差分负载
	5.9 dB	I 和 Q 输出上具有 200 Ω 差分负载
共模输出电压	2.5 V	ADJ连接至 V_S
I/Q 差分输出阻抗	50 Ω	

与具有 217 Ω 差分输入阻抗的AD8366 接口时，ADL5380 具有 5.9 dB电压增益和-0.5 dB功率增益[5.9 dB - 10log (217/50)]。为获得最佳性能，将ADL5380 ADJ引脚连接至 V_S ，使ADL5380 与AD8366 间的共模电压设置为 2.5 V。在ADL5380 与AD8366 间放置具有 0.5 dB插入损耗的差分四阶巴特沃兹低通滤波器，以便抑制噪声和高频干扰成分。虽然滤波器会输入和输出阻抗并不匹配，但在基带频率下这些不匹配是可以忽略的。

表 2. AD8366 接口和增益参数

测试条件	$V_S = 5\text{ V}$, $T_A = 25^\circ\text{C}$, $Z_S = 200\ \Omega$, $Z_L = 200\ \Omega$, $f = 10\text{ MHz}$	
参数	值	备注
电压转换增益	4.5 dB	最小数字增益设置
	20.25 dB	最大数字增益设置
共模输出电压	1.5 V	最小值
	2.5 V	最大值或输入自偏置
差分输入阻抗	217 Ω	
共模输出电压	1.6 V	最小值
	3 V	最大值
	2.5 V	VCMA 和 VCMB 保持浮空
差分输出阻抗	28 Ω	
线性输出摆幅	6 V p-p	1 dB 增益压缩

AD8366 的共模输出电压可设置为 2.5 V；当 VCM 保持浮空时其线性度最佳。遗憾的是，AD6642 在 0.9 V 共模输入电压(0.5 × AVDD)下具有最佳性能。由于 AD8366 的共模输出电压必须介于 1.6 V 与 3 V 之间，因此 AD6642 VCM 和 AD8366 VCM 引脚无法直接连接，必须使用电阻将 AD8366 共模输出电压分压至 0.9 V。

为获得最佳性能，AD8366 应驱动 200 Ω 负载。要实现所需的共模电平和阻抗匹配，可在 AD8366 后添加 63 Ω 串联电阻和 39 Ω 并联电阻。这一电阻网络将使信号功率衰减 4 dB。

AD8366 的输出摆幅可达 6 V p-p，但电阻网络提供的 4 dB 衰减使 AD6642 得到的电压限于 2.3 V p-p，避免了较大干扰尖峰或增益的失控对 ADC 带来损害。

在 AD8366 与 AD6642 间放置具有 1.5 dB 插入损耗的差分六阶巴特沃兹低通滤波器，可以滤除高频干扰成分。I 或者 Q 通道的完整差分接口如图 2 所示。

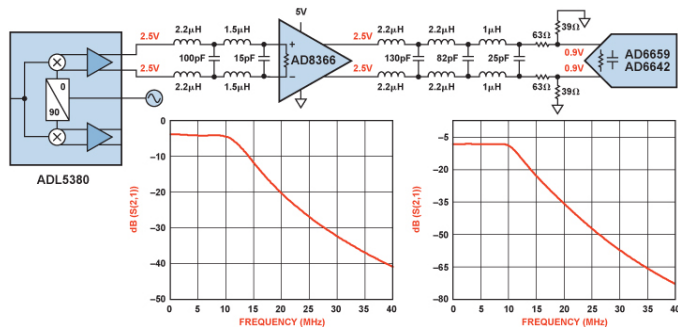


图 2. ZIF 接收机接口框图和仿真滤波器特性

为保留足够的余量来应付整个温度范围内的增益变化，AD8366 在正常模式下的增益设置为 16 dB。

采用这种配置，整个信号链的增益如下：

$$5.9 \text{ dB} - 10 \log (217/50) - 0.5 \text{ dB} + 16 \text{ dB} - 10 \log (200/217) - 1.5 \text{ dB} - 4 \text{ dB} = 9.9 \text{ dB}.$$

在 ADL5380 之前以级联方式插入的两个 LNA 实现了 32 dB 的射频增益。由于模数转换器被配置为 2 V p-p 满幅摆幅和 78 Ω 等效输入阻抗，它可以接收最大 -34 dBm 的单音 RF 输入信号。如果输入信号是具有 10 dB 峰均比(PAR)的调制信号，在不改变 VGA 设置情况下，接收机可以接收的最大输入信号为 -41 dBm。

换言之，电压增益可用于计算信号链链路预算。当输入端口阻抗等于输出端口阻抗时，电压增益等于功率增益。整个信号链的电压增益为：

$$32 \text{ dB} + 5.9 \text{ dB} - 0.5 \text{ dB} + 16 \text{ dB} - 1.5 \text{ dB} - 8 \text{ dB} = 43.9 \text{ dB}.$$

对于单音信号输入，要获得 2 V p-p 摆幅范围，正确的输入功率为：

$$8 \text{ dBm} - 43.9 \text{ dB} + 10 \log (78/50) = -34 \text{ dBm}.$$

用电压增益计算的结果与功率增益计算出结果是相同的。

某些应用中，ADL5380 可能需要直接连接至 AD6642，这种情况下，可为 AD6642 差分输入添加 500 Ω 电阻以改善匹配。ADL5380 电压增益为 6.9 dB，且具有与 AD8366 相同的共模问题。所以应使用 160 Ω 串联电阻和 100 Ω 并联电阻来实现 500 Ω 负载和所需的共模电压。同样，电阻网络可将电压增益衰减 8 dB（功率则衰减 4 dB）。

在 ADL5380 与 AD6642 间放置具有 1.5 dB 插入损耗的低通滤波器，从而滤除干扰频率成分。整个链路的输入阻抗为 50 Ω ，输出阻抗为 500 Ω 。采用这种配置，整个信号链的增益如下：

$$6.9 \text{ dB} - 10 \log (500/50) - 1.5 \text{ dB} - 4 \text{ dB} = -8.6 \text{ dB}.$$

超外差式接收机接口设计和增益计算

超外差式接收机设计中，系统使用交流耦合，因此设计超外差接收机电路时不必考虑直流共模电压匹配。

许多混频器，例如 ADL535x 和 ADL580x，具有 200 Ω 的差分输出阻抗，因此不同输出阻抗呈现不同功率增益和电压增益。

图 3 显示了超外差式接收机的一个通道，该器件采用以下元件：低噪声放大器 ADL5523；具有 LO 缓冲器、IF 放大器和 RF 巴伦的双通道平衡混频器 ADL5356；带通或者低通滤波器；双通道、超低失真 IF VGA AD8376；另一个低通或者带通抗混叠滤波器；双通道 IF 接收机 AD6642。

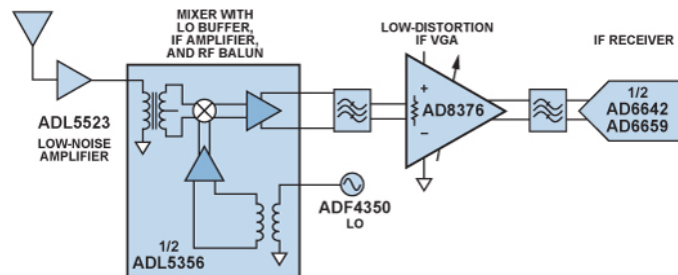


图 3. 超外差式接收机框图（仅显示一个通道）

该设计使用 140 MHz 中频和 20 MHz 带宽，因此器件连接时可采用交流耦合。

AD5356 在 200 Ω 负载下具有最佳性能，而 AD8376 的输入阻抗为 150 Ω 。因此，为了抑制混频器输出杂散并提供良好的阻抗匹配，差分 LC 滤波器必须具有 200 Ω 的输入阻抗和 150 Ω 的输出阻抗。在某些应用中，需要通过过渡带极窄滤波器抑制频带外信号，可使用差分 SAW 滤波器来实现，但这会给接收机信号链引入过大的损耗和群延迟。四阶差分带通巴特沃兹滤波器可适合许多无线接收机，因为前端 RF 滤波器可以为带外干扰提供足够的衰减。

表 3. ADL5356 和 AD8376 接口和增益参数

ADL5356 测试条件	$V_S = 5 \text{ V}$, $T_A = 25^\circ\text{C}$, $f_{RF} = 1900 \text{ MHz}$, $f_{LO} = 1760 \text{ MHz}$, LO 功率 = 0 dBm	
参数	值	备注
电压转换增益	14.5 dB	$Z_{SOURCE} = 50 \Omega$ 差分 $Z_{LOAD} = 200 \Omega$ 差分
功率转换增益	8.2 dB	包括 4:1 IF 端口变压器和 PCB 损耗

AD8376 测试条件	$V_S = 5 \text{ V}$, $T_A = 25^\circ\text{C}$, $R_S = R_L = 150 \Omega$ (140 MHz 时)	
参数	值	备注
差分输入电阻	150 Ω	
电压转换增益	-4 dB	最小数字设置
	20 dB	最大数字设置
输出阻抗	16 k Ω 0.8 pF	

AD8376 的电流输出型电路具有高输出阻抗，因此其差分输出需要接 150 Ω 电阻实现电压输出。另一个差分滤波器放置在 AD8376 和 ADC 之间，用于衰减二阶和三阶谐波失真成分，因此该 150 Ω 负载可以被分成两部分。首先将 300 Ω 电阻安装于 AD8376 的输出端。另一个 300 Ω 电阻由两个 165 Ω 电阻和 ADC 的 3 k Ω 输入阻抗构成。两个 165 Ω 电阻同时为 ADC 输

入提供直流共模电压。LC 滤波器的输入和输出阻抗均为 300 Ω 。对于高中频应用，信号源和负载的阻抗的完美匹配是非常重要的。完整接口如图 4 所示。

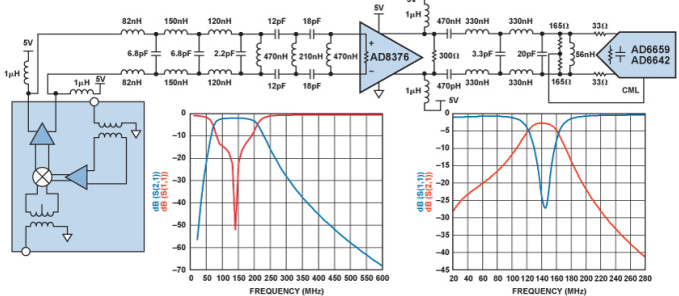


图 4. 超外差式接收机接口框图和滤波器仿真结果

此接收机中，混频器之前放置一个 20 dB LNA。混频器之后的滤波器具有 2 dB 插入损耗；AD8376 与 ADC 之间的滤波器具有 1.2 dB 插入损耗。AD8376 增益设置为 14 dB，以便提供足够的余量来应对温度变化。接收机的总体增益为：

$$20\text{ dB} + 8.2\text{ dB} - 2\text{ dB} + 14\text{ dB} - 1.2\text{ dB} = 39\text{ dB}.$$

为将 ADC 输入电压限制在 2 V p-p 以下，传输到 150 Ω 电阻(300 $\Omega \parallel (165\text{ } \Omega \times 2) \parallel 3\text{ k } \Omega$)的功率应小于 5.2 dBm。因此对于单音信号，接收机最大输入功率为-33.8 dBm。如果输入信号是 10 dB PAR 调制信号，使用此增益设置的最大输入信号为-40.8 dBm。

发射机接口设计和增益计算

对于发射通道设计，ZIF 和超外差式架构具有相似的接口特性，均需要在 TxDAC[®] 与调制器间执行直流耦合。大多数调制器的中频输入电路需要外部提供直流偏置；TxDAC 输出可为直流耦合模式下的调制器提供直流偏置。大多数高速 DAC 是电流输出架构，因此需要外输出电阻才能为调制器产生输入电压。

图 5 显示了超外差式或 ZIF 发射机，该器件采用以下元件：TxDAC AD9122、低通滤波器、正交调制器 ADL537x、另一个 RF 滤波器、频率合成器 ADF4350、数字控制 VGA ADL5243、功率放大器、用于控制功率放大器 (PA) 栅极电压的 DAC AD562x。

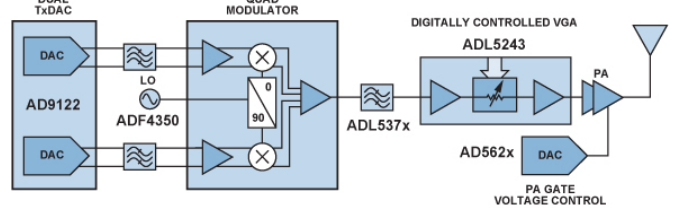


图 5. 发射机框图

对于 AD9122，满量程输出电流可设置在 8.66 mA 与 31.66 mA 之间。对于大于 20 mA 的满量程电流，无杂散动态范围(SFDR)会变差，但 DAC 的输出功率和 ACPR 也随着满量程电流降低而减小。适当折衷的方案是将 20 mA 交流电流叠加于 10 mA 直流电平上，得到 0 mA 至 20 mA 的电流输出。

表 4. AD9122 和 ADL5372 接口和增益参数

AD9122 测试条件			AVDD33 = 3.3 V, DVDD33 = 3.3 V, DVDD18 = 1.8 V, CVDD18 = 1.8 V	
参数	值	备注		
满量程输出电流	8.66 mA	最小数字满量程设置		
	31.66 mA	最大数字满量程设置		
输出电阻	10 M Ω			

ADL5372 测试条件			$V_S = 5\text{ V}$, $T_A = 25^\circ\text{C}$, $f_{LO} = 1900\text{ MHz}$, $f_{IF} = 140\text{ MHz}$	
参数	值	备注		
输出功率	7.1 dBm	$V_{IQ} = 1.4\text{ V p-p}$ 差分		
I 和 Q 输入偏置电平	0.5 V	推荐		
差分输入阻抗	2900 k Ω			

ADL5372 的输入电路需要 0.5 V 共模电压，由流经 50 Ω 电阻的 10 mA 直流电流提供。0 mA 至 20 mA 交流电流由两个 50 Ω 电阻和一个 100 Ω 电阻共享。因此调制器输入的交流电压为 20 mA $\times ((50 \times 2) \parallel 100) = 1\text{ V p-p}$ 。TxDAC 与调制器之间的滤波器用于去除高频杂散和谐波成分。滤波器的输入和输出阻抗为 100 Ω 。完整接口如图 6 所示。

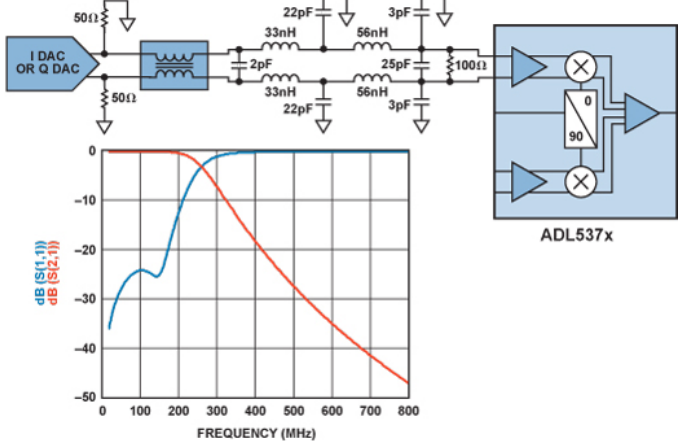


图 6. 直流耦合发射机 IF 接口框图和滤波器仿真结果

采用 50 Ω 输出时，ADL5372 的电压转换增益为 0.2 dBm。使用 13 dB PAR 调制器信号时，平均功率必须至少减小 15 dB，以便适应 Tx 数字失真过程。ADL5372 具有 1 V p-p 单音输入时，平均调制器输出功率为 7.1 dBm - 2.9 dB = 4.2 dBm。如果考虑低通滤波器的 2.2 dB 插入损耗，平均输出功率为 4.2 dBm - 2.2 dB = 2 dBm。这种状态下，调制器输出端平均输出功率为-10dBm。

为了保证发射链路提供 11 dBm 平均发射功率，Tx 信号链内后端需要具有 26 dBm 的 P-1dB 的 PA 驱动器。如果需要 2 dB 插入损耗的 RF 滤波器以抑制 LO 馈通和调制器边带输出，那么增益模块和 PA 驱动器必须提供 23 dB 的总增益。针对此应用，建议使用具有集成式增益模块、数字控制衰减器和 PA 驱动器的 VGA ADL5243。

结束语

本文介绍了 ZIF 和超外差式接收机解调器、IF VGA、混频器和 ADC 模拟端口差分设计，以及 TxDAC 与 FMODE 之间的发射机差分接口，其中均使用 ADI 器件作为信号链有源部分。另外还提供了设计用于这些电路的应用滤波器的增益计算和仿真结果。本振差分接口设计以及其他相关设计详情请参阅以下参考文献。

参考文献

Circuit Note [CN-0018](#), *Interfacing the ADL5372 I/Q Modulator to the AD9779A Dual-Channel, 1 GSPS High-Speed DAC*.

Circuit Note [CN-0134](#), *Broadband Low Error Vector Magnitude (EVM) Direct Conversion Transmitter*.

Calvo, Carlos. “[The differential-signal advantage for communications system design](#).” *EE Times*.

作者简介

Mingming Zhao [mingming.zhao@analog.com] 是ADI北京分公司的一名现场应用工程师，主要负责RF和高速转换器产品应用。他于中国科学院获得电磁和微波技术专业硕士学位之后，在大唐移动通信设备有限公司担任RF工程师两年多，随后在2010年加入ADI公司。

