零中频射频接收机技术

作者：东南大学射频与光电集成电路研究所 李智群 王志功

2004 年 7 月 A 版

摘　　要：零中频(Zero IF)或直接变换(Direct-Conversion)接收机具有体积小、成本低和易于单片集成的特点，正成为射频接收机中极具竞争力的一种结构。本文在介绍超外差(Super Heterodyne)结构与零中频结构性能和特点的基础上，重点分析零中频结构存在的本振泄漏(LO Leakage)、偶次失真(Even-Order Distortion)、直流偏差(DC Offset)、闪烁噪声(Flicker Noise)等问题，并给出零中频接收机的设计方法和相关技术。

关键词：　零中频；超外差；本振泄漏；自混频

引言

近年来随着无线通信技术的飞速发展，无线通信系统产品越来越普及，成为当今人类信息社会发展的重要组成部分。射频接收机位于无线通信系统的最前端，其结构和性能直接影响着整个通信系统。优化设计结构和选择合适的制造工艺，以提高系统的性能价格比，是射频工程师追求的方向。由于零中频接收机具有体积小、成本低和易于单片集成的特点，已成为射频接收机中极具竞争力的一种结构，在无线通信领域中受到广泛的关注。本文在介绍超外差结构和零中频结构性能和特点的基础上，分析零中频结构可能存在的问题，并给出零中频接收机的设计方法和相关技术。

超外差接收机

超外差(Super Heterodyne)体系结构自 1917 年由 Armstrong 发明以来，已被广泛采用。图 1 为超外差接收机结构框图。在此结构中，由天线接收的射频信号先经过射频带通滤波器(RF BPF)、低噪声放大器(LNA)和镜像干扰抑制滤波器(IR Filter)后，进行第一次下变频，产生固定频率的中频(IF)信号。然后，中频信号经过中频带通滤波器(IF BPF)将邻近的频道信号去除，再进行第二次下变频得到所需的基带信号。低噪声放大器(LNA)前的射频带通滤波器衰减了带外信号和镜像干扰。第一次下变频之前的镜像干扰抑制滤波器用来抑制镜像干扰，将其衰减到可接受的水平。使用可调的本地振荡器(LO1)，全部频谱被下变频到一个固定的中频。下变频后的中频带通滤波器用来选择信道，称为信道选择滤波器。此滤波器在确定接收机的选择性和灵敏度方面起着非常重要的作

用。第二下变频是正交的，以产生同相(I)和正交(Q)两路基带信号。

超外差体系结构被认为是最可靠的接收机拓扑结构，因为通过适当地选择中频和滤波器可以获得极佳的选择性和灵敏度。由于有多个变频级，直流偏差和本振泄漏问题不会影响接收机的性能。但镜像干扰抑制滤波器和信道选择滤波器均为高 Q 值带通滤波器，它们只能在片外实现，从而增大了接收机的成本和尺寸。目前，要利用集成电路制造工艺将这两个滤波器与其它射频电路一起集成在一块芯片上存在很大的困难。因此，超外差接收机的单片集成因受到工艺技术方面的限制而难以实现。

零中频接收机

由于零中频接收机不需要片外高 Q 值带通滤波器，可以实现单片集成，而受到广泛的重视。图 2 为零中频接收机结构框图。其结构较超外差接收机简单许多。接收到的射频信号经滤波器和低噪声放大器放大后，与互为正交的两路本振信号混频，分别产生同相和正交两路基带信号。由于本振信号频率与射频信号频率相同，因此混频后直接产生基带信号，而信道选择和增益调整在基带上进行，由芯片上的低通滤波器和可变增益放大器完成。

零中频接收机最吸引人之处在于下变频过程中不需经过中频，且镜像频率即是射频信号本身，不存在镜像频率干扰，原超外差结构中的镜像抑制滤波器及中频滤波器均可省略。这样一方面取消了外部元件，有利于系统的单片集成，降低成本。另一方面系统所需的电路模块及外部节点数减少，降低了接收机所需的功耗并减少射频信号受外部干扰的机会。

不过零中频结构存在着直流偏差、本振泄漏和闪烁噪声等问题。因此有效地解决这些问题是保证零中频结构正确实现的前提。

本振泄漏(LO Leakage)

零中频结构的本振频率与信号频率相同，如果混频器的本振口与射频口之间的隔离性能不好，本振信号就很容易从混频器的射频口输出，再通过低噪声放大器泄漏到天线，辐射到空间，形成对邻道的干扰，图 3 给出了本振泄漏示意图。本振泄漏在超外差式接收机中不容易发生，因为本振频率和信号频率相差很大，一般本振频率都落在前级滤波器的频带以外。

偶次失真(Even-Order Distortion)

典型的射频接收机仅对奇次互调的影响较为敏感。在零中频结构中，偶次互调失真同样会给接收机带来问题。如图 4 所示，假设在所需信道的附近存在两个很强的干扰信号，LNA 存在偶次失真，其特性为 y(t)=a1x(t)+a2x2(t)。若 x(t)=A1cosw1t+A2cosw2t，

则 y(t)中包含 a2A1A2cos(w1-w2)t 项，这表明两个高频干扰经过含有偶次失真的 LNA 将产生一个低频干扰信号。若混频器是理想的，此信号与本振信号 coswLOt 混频后，将被搬移到高频，对接收机没有影响。然而实际的混频器并非理想， RF 口与 IF 口的隔离有限，干扰信号将由混频器的 RF 口直通进入 IF 口，对基带信号造成干扰。

偶次失真的另一种表现形式是，射频信号的二次谐波与本振输出的二次谐波混频后，被下变频到基带上，与基带信号重叠，造成干扰，变换过程如图 5 所示。

这里我们仅考虑了 LNA 的偶次失真。在实际中，混频器 RF 端口会遇到同样问题，应引起足够的重视。因为加在混频器 RF 端口上的信号是经 LNA 放大后的射频信号，该端口是射频通路中信号幅度最强的地方，所以混频器的偶次非线性会在输出端产生严重的失真。

偶次失真的解决方法是在低噪放和混频器中使用全差分结构以抵消偶次失真。

直流偏差(DC Offset)

直流偏差是零中频方案特有的一种干扰，它是由自混频(Self-Mixing)引起的。泄漏的本振信号可以分别从低噪放的输出端、滤波器的输出端及天线端反射回来，或泄漏的信号由天线接收下来，进入混频器的射频口。它和本振口进入的本振信号相混频，差拍频率为零，即为直流，如图 6(a)所示。同样，进入低噪放的强干扰信号也会由于混频器的各端口隔离性能不好而漏入本振口，反过来和射频口来的强干扰相混频，差频为直流，如图 6(b)所示。

这些直流信号将叠加在基带信号上，并对基带信号构成干扰，被称为直流偏差。直流偏差往往比射频前端的噪声还要大，使信噪比变差，同时大的直流偏差可能使混频器后的各级放大器饱和，无法放大有用信号。

经过上述分析，我们可以来估算自混频引起的直流偏差。假设在图 6(a)中，由天线至 X 点的总增益约为 100 dB，本振信号的峰峰值为 0.63 V(在 50 Ω中为 0 dBm)，在耦合到 A 点时信号被衰减了 60 dB。如果低噪放和混频器的总增益为 30 dB，则混频器输出端将产生大约 7 mV 的直流偏差。而在这一点上的有用信号电平可以小到 30 μVrms。因此，如果直流偏差被剩余的 70 dB 增益直接放大，放大器将进入饱和状态，失去对有用信号的放大功能。

当自混频随时间发生变化时，直流偏差问题将变得十分复杂。这种情况可在下面的条件下发生：当泄漏到天线的本振信号经天线发射出去后又从运动的物体反射回来被天线接收，通过低噪放进入混频器，经混频产生的直流偏差将是时变的。

由上述讨论可知，如何消除直流偏差是设计零中频接收机时要重点考虑的内容。

交流耦合(AC Coupling)

将下变频后的基带信号用电容隔直流的方法耦合到基带放大器，以此消除直流偏差的干扰。对于直流附近集中了比较大能量的基带信号，这种方法会增加误码率，不宜采用。因此减少直流偏差干扰的有效方法是将欲发射的基带信号进行适当的编码并选择合适的调制方式，以减少基带信号在直流附近的能量。此时可以用交流耦合的方法来消除直流偏差而不损失直流能量。缺点是要用到大电容，增大了芯片的面积。

谐波混频(Harmonic Mixing)

谐波混频器的工作原理如图 7 所示。本振信号频率选为射频信号频率的一半，混频器使用本振信号的二次谐波与输入射频信号进行混频。由本振泄漏引起的自混频将产生一个与本振信号同频率的交流信号，但不产生直流分量，从而有效地抑制了直流偏差。图 8 给出一个 CMOS 谐波混频器，本振信号的二次谐波可通过 CMOS 晶体管固有的平方律特性得到。晶体管 M3 和 M4 组成的电路将差分本振电压 Vlo+和 Vlo-转换为具有二次谐波的时变电流，本振信号的基频和奇次谐波在漏极连接处被抵消，产生谐波混频器所需的本振信号的二次谐波电流，实现谐波混频。

闪烁噪声(Flicker Noise)

有源器件内的闪烁噪声又称为噪声，其大小随着频率的降低而增加，主要集中在低频段。与双极性晶体管相比，场效应晶体管的噪声要大得多。闪烁噪声对搬移到零中频的基带信号产生干扰，降低信噪比。通常零中频接收机的大部分增益放在基带级，射频前端部分的低噪放与混频器的典型增益大约为 30 dB。因此有用信号经下变频后的幅度仅为几十微伏，噪声的影响十分严重。因此，零中频结构中的混频器不仅设计成有一定的增益，而且设计时应尽量减小混频器的噪声。

图 8 所示的谐波混频器中晶体管 M1 和 M2 由射频差分信号 Vrf+和 Vrf-驱动，M1 和 M2 是噪声的主要来源，注入电流 Io 的作用是减少晶体管 M1 和 M2 中的电流，从而减小噪声。

I/Q 失配(I/Q Mismatch)

采用零中频方案进行数字通信时，如果同相和正交两支路不一致，例如混频器的增益不同，两个本振信号相位差不是严格的 90o，会引起基带 I/Q 信号的变化，即产生 I/Q 失配问题。以前 I/Q 失配问题是数字设计时的主要障碍，随着集成度的提高，I/Q 失配虽已得到相应改善，但设计时仍应引起足够的重视。

结语

本文讨论了超外差和零中频两种结构的特点，分析了零中频结构存在的本振泄漏、偶次失真、直流偏差、闪烁噪声等问题产生的原因，并给出了零中频接收机的设计方法

和相关技术。■

参考文献：

1． Behzad Razavi,“Design Considerations for Direct-Conversion Receivers’, IEEE Transactions on Circuits and Systems-II: Analog and Digital Signal Processing, Vol. 44, No. 6, June 1997.

2． Asad A. Abidi,‘Direct-Conversion Radio Transceivers for Digital Communications’, IEEE Journal of Solid-State Circuits, Vol. 30, No. 12, Dec. 1995.

3． Zhaofeng Zhang, Zhiheng Chen, Jack Lau, ‘A 900MHz CMOS Balanced Harmonic Mixer for Direct Conversion Receivers’, IEEE 2000.

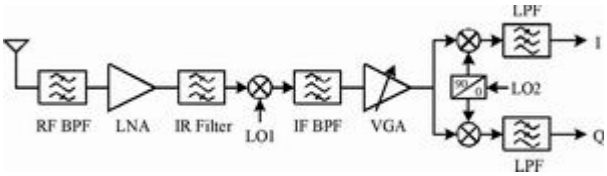

图 1 超外差接收机结构框图

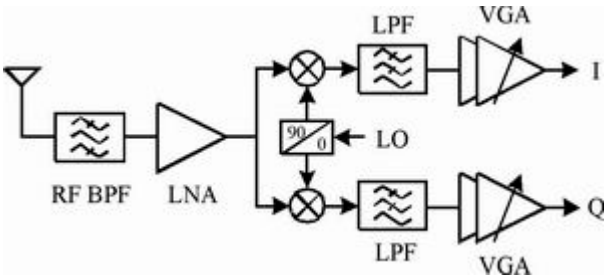

图 2 零中频接收机结构框图

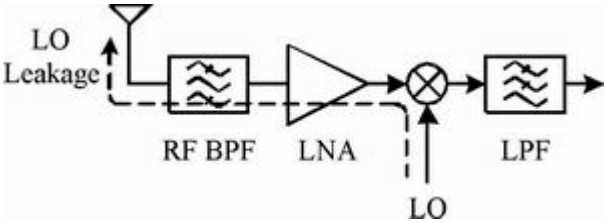

图 3 零中频本振泄漏示意图

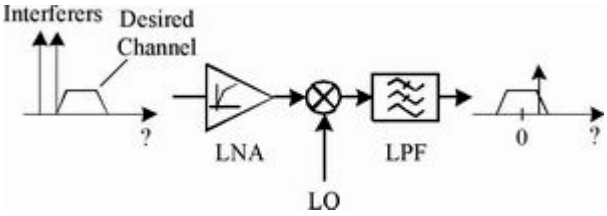

图 4 强干扰信号在偶次失真下产生的干扰

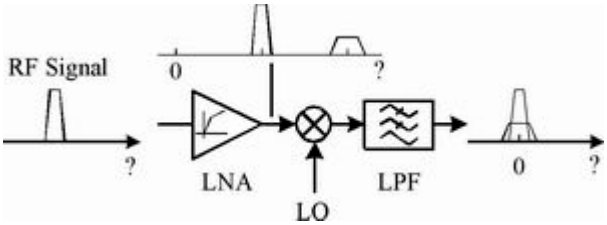

图 5 射频信号在偶次失真下产生的干扰

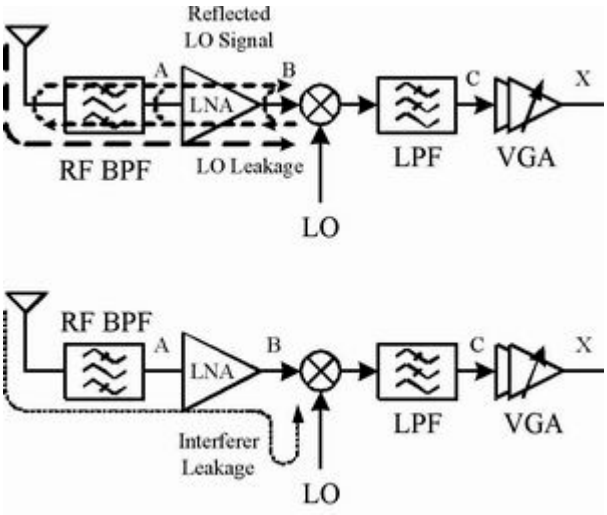

图 6 (a)本振泄漏自混频 (b)干扰自混频

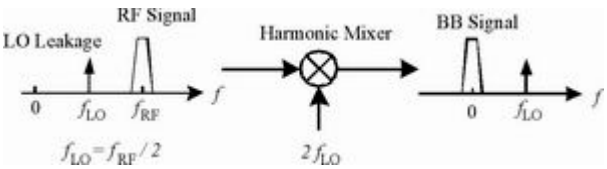

图 7 谐波混频路工作原理