

# 接收机的射频前端设计

2001-12-3

现代民用及军用设施使用电子设备繁多，电磁环境复杂，相互干扰严重。一般地，车、船和飞机上的通信设备收发机都集成在一起。以短波通信设备为例，发射机的残余信号在接收机输入端产生的电平达 120dBmV(即 13dBm)或更高。而接收机所需接收的微弱信号电平可能仅-6 ~ 0dBmV(即-117 ~ -113dBm)。因此，要求接收机处理的信号动态范围高达 120 ~ 126dB。另外，高电平干扰信号与所接收信号频率仅相距数十 KHz，所以，高电平干扰信号和它们在接收机中产生的互调分量会严重影响接收机的输出信噪比。为了降低这种影响，就要求接收机具有以下特性：

- 高选择性，接收机的动态范围尽可能要大；
- 高线性，在信道滤波之前，降低带外高电平干扰信号在信道滤波器通带内产生的互调分量；
- 极低的本振相位噪声，以免邻近的干扰信号将本振噪声转换到接收机信道带宽内。

作为接收机重要组成部分的接收机射频前端是接收机动态性能的关键部件，它工作于中频放大器之前。诸如动态范围、互调失真、-1dB 压缩点和三阶截获点等，都直接影响接收机前端的性能。

接收机前端电路有几种不同的结构。图 1 示出了一种最简单的形式。这种结构没有射频放大器，在带通滤波器之后，只有混频器和本机振荡器。带通滤波器的输入来自天线，其输出经过混频器到达中频放大器进行后续处理。

这种结构的主要特点是：所需成本比其它结构低；避免由于处理无用能量而消耗混频器的动态范围。

带通滤波器在通频带范围内具有良好的前向性能和良好的反向隔离性能。这样可以防止本振信号到达天线，进而避免天线发射这些信号。带通滤波器有三个主要任务：

- 限制输入信号的带宽以使互调失真最小；
- 削弱寄生响应，主要是镜象频率和 1/2 中频频率问题；
- 抑制本振能量，以防止其到达天线。

第二种前端结构在带通滤波器与混频器之间增加了一个射频放大器。该射频放大器的增益较低——一般低于 20dB。高于 20dB 的增益可能会使系统稳定性受到损害，并且不能获得截获点。

射频放大器的目的是隔离混频器，同时在混频之前将信号放大。这种放大可以补偿混频器和带通滤波器中的损耗。射频放大器的主要优点是改进了混频器/本振电路与天线电路之间的隔离。

第三种结构如图 2 所示。与上述两种结构相似，该结构也有混频器和本振电路，或者是包含混频器和本振的变频器。该结构与前一种结构的不同之处是增加了一个带通滤波器。

两个滤波器可以有同样的中心频率，但这并不是最好的设计方法。一般将第二个带通滤波器调谐于镜象频率，该频率是射频加上或减去 2 倍的中频，并与射频信号分别位于本振频率的两边。这样一来，该镜象频率与射频信号一样，在混频器

中经过同样处理，当作了有效信号通过系统。

为解决这一问题，可以再添加一个滤波器来抑制镜干扰，从而仅让有用的频率通过。

第二个带通滤波器也能削弱接收机的其它寄生响应和直接中频提取。此外，还削弱了在射频放大器中产生的噪声，防止噪声到达混频器。同时，第二个带通滤波器抑制了在射频放大器中产生的二次谐波能量，从而改进了接收机的二阶截获点性能。

在高频范围，该滤波器没有回波响应。主要原因是混频器对于接收机频率的奇次谐波几乎没有响应，因此它们可以通过系统。射频带通滤波器的属性由第一中频和本振信号的注入端共同决定。如果选择低端注入，某些寄生信号可能在射频信号的低端产生。

在高端注入恰恰相反：所有的寄生信号会处于射频信号的高端。在插入损耗和滤波器的选择性之间通常应该做一些权衡，以便减少第一个带通滤波器的插入损耗，但是会削弱第二个带通滤波器的作用。

第一个混频器的性能对于接收机的性能至关重要。它是一个非线性器件，而且，还会用到系统中最高的信号频率 - 本振频率。因此，它需要有非常高的截获点。

单器件有源混频器价格便宜，但是它们性能最差。一般来说，无源、双均衡混频器的性能最好。它们通常有最高的截获点，而且相对于大多数混频器设计，有更好的噪声平衡特性。表 1 列出了混频器性能参数和受之影响的接收机性能。

有时，在混频器和本振之间还会有一个带通滤波器。这个本振滤波器用于削弱宽带噪声和本振频率附近的谐波，而这些谐波会降低混频器的二阶截获点性能。在接收机内所使用的混频器电路类型都需要仔细权衡。无源混频器比有源混频器有更好的互调失真性能。然而它们不能提供任何变频增益，事实上是有损耗的器件。

有源混频器对本振功率的要求较低，但其噪声性能不如无源混频器。而且，在高温状态下，有源混频器的三阶截获点性能会降低。混频器中频输入和中频放大器之间通常放置一个双工器网络。这个双工器网络会吸收一些频率，同时让其它频率通过。双工器网络不能反射本振频率的倍频信号。否则，那些频率会被反射回混频器，导致其性能下降。

本振的单边带相噪性能对于接收机临近信道的选择性是很重要的。宽带噪声经常影响接收机的灵敏度。本振信号能够产生自身的谐波。因此，应尽可能保持其纯净以防止接收机中的寄生响应。

本振必须能正常工作，而不受温度和电源电压变化的影响。如果接收机遭受机械震动或碰撞，其输出也应保持稳定。

所有的射频接收都是对系统的信噪比(SNR)的一系列处理。有鉴于此，混频器、本振、带通滤波器和射频放大器产生的噪声应该降至最小。

对于无源、有损耗的器件，例如滤波器或某些混频器，噪声系数由下式给出：

(1)

其中， $F$  是器件的噪声系数， $L$  是器件的损耗( $1/G$ )， $T$  是器件的绝对温度，单位是 K。某些双平衡混频器可以有稍高一点的噪声系数。

决定系统噪声系数的方程是：

(2)

其中,  $F$  是等效的噪声系数,  $F_1$ 、 $F_2$ 、 $F_3$  是第 1、2、3 级的噪声系数,  $F_N$  是第  $n$  级的增益,  $G_1$ 、 $G_2$ 、 $G_3$  是第 1、2、3 级的增益,  $G_{N-1}$  是第  $N-1$  级的增益。

接收机的整体噪声系数由系统内各级的噪声性能共同决定。

寄生响应是一种不希望出现的响应。在超外差接收机中, 这些寄生频率在混频器中产生。多数接收机的寄生频率都是接收机外差的结果, 如下式所示:

$$FIF = mFRF \pm nFLO \quad (3)$$

其中,  $FIF$  是中频,  $FRF$  是射频,  $FLO$  是本振频率,  $m$  和  $n$  是整数。

从式(3)求解  $FRF$ , 可得到两个可能产生的寄生射频信号。也就是:

(4)

以及

(5)

最常见的寄生频率有:

- 镜象频率
- 1/2 中频
- 直接中频提取
- 本振频率的倍频
- 本振寄生频率
- 第二混频器寄生频率 (只在双变频接收机中)

在全双工接收机(即同时发射和接收)中, 必须要考虑到两个额外的响应: 全双工镜象和半双工镜象。定义如下:

$$\text{全双工镜象} = Fr - f \quad (6)$$

半双工镜象 =  $Fr + f/2$  (7) 这里的  $Fr$  是发射机频率,  $f$  是发射机频率和接收机频率之差。

截获点是电路线性度的量度。通过它可以从输入信号电平计算出互调失真电平。截获点影响信号的动态范围, 截获点越高, 信号的动态范围越小; 反之, 截获点越低, 信号动态范围越大。在理论上, 截获点有  $n$  阶, 但一般起主要作用的是二阶和三阶截获点。见图 3, 截获点表示的是一个输入振幅, 在该点上所需基波频率与无用信号的振幅相等。

二阶截获点(SOIP)取决于信号的二阶分量, 而且基波电平提高 1dB, SOIP 则提高 2dB。可以根据二阶截获点计算出混频器的 1/2 中频响应。1/2 中频截获点取决于射频信号和本振信号的二次谐波, 两者都是内部产生的( $2FRF \pm 2FLO$ )。

1/2 中频抑制由下式给出:

$(IP2-S-C)/2$  (8) 其中,  $IP2$  是二阶截获点,  $S$  是接收机灵敏度, 单位为 dBm,  $C$  是截获比或同信道抑制, 单位为 dB。

例如, 假设接收机的二阶截获点为 45dBm, 灵敏度为-120dBm, 同信道抑制为 6dB, 则半中频抑制为:

$$(45\text{dBm} + 120\text{dBm} - 6\text{dB})/2 = 79.5\text{dBm}$$

在三阶截获点(TOIP)上, 基波信号和三阶分量在振幅上是相等的。基波信号每提高 1dB, TOIP 则提高 3 dB。TOIP 主要反映接收机的互调失真性能。接收机的互调性能定义为接收机灵敏度和足以产生特定干扰电平的信号电平两者之间的差值, 单位为 dB。从下式可给出:

$IM = (2IP3 - 2S - C)/3$  (9) 这里的  $IM$  是互调抑制比, 单位为 dB,  $IP3$  是 TOIP,  $S$  是接收机灵敏度, 单位为 dBm,  $C$  是截获比或同信道抑制, 单位为 dB。

如果已知接收机信号输入电平, 就可以利用下式计算出  $n$  阶截获点:

$IPN = (nPA - PIMN) / (n - 1)$  (10) 其中,  $IPN$  是  $n$  阶截获点,  $n$  是截获点的阶,  $PA$  是接收机输入信号功率电平,  $PIMN$  是 IMD 信号的功率电平

射频放大器对于混频器的性能会产生不利的影响, 从而, 对整个接收机性能产生影响。可以使用很多方法来消除这些影响。

第一, 使用一个可以在最大功率范围内稳定工作的高功率器件, 然而, 这种方法需要权衡噪声性能。

第二, 降低器件的输入信号电平。在某些情况下, 可以使用衰减器来实现。此时, 必须要采取措施来平衡灵敏度的要求。

第三, 降低增益。此外, 需要考虑噪声和 SNR。

第四, 在放大器中使用负反馈。

第五, 提高射频放大器的灵敏度。较窄的带通与较宽的带宽相比, 产生较低的噪声。

第六, 使用推挽式放大器, 因为它们可以消掉偶次谐波。

## 参考文献

1 Joe Carr : Designing Front-Ends , Electronics world , January 2001.

2 袁朝京 : 数字接收机设计 , 《电讯技术》 , 1998.1。

## 射频和天线设计培训课程推荐

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立,致力并专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养;我们于 2006 年整合合并微波 EDA 网([www.mweda.com](http://www.mweda.com)),现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地,成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 ADS、HFSS 等专业软件使用培训课程,广受客户好评;并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书,帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司,以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

易迪拓培训课程列表: <http://www.edatop.com/peixun/rfe/129.html>



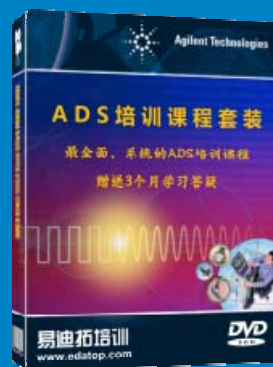
### 射频工程师养成培训课程套装

该套装精选了射频专业基础培训课程、射频仿真设计培训课程和射频电路测量培训课程三个类别共 30 门视频培训课程和 3 本图书教材;旨在引领学员全面学习一个射频工程师需要熟悉、理解和掌握的专业知识和研发设计能力。通过套装的学习,能够让学员完全达到和胜任一个合格的射频工程师的要求...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/rfe/110.html>

### ADS 学习培训课程套装

该套装是迄今国内最全面、最权威的 ADS 培训教程,共包含 10 门 ADS 学习培训课程。课程是由具有多年 ADS 使用经验的微波射频与通信系统设计领域资深专家讲解,并多结合设计实例,由浅入深、详细而又全面地讲解了 ADS 在微波射频电路设计、通信系统设计和电磁仿真设计方面的内容。能让您在最短的时间内学会使用 ADS,迅速提升个人技术能力,把 ADS 真正应用到实际研发工作中去,成为 ADS 设计专家...



课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/ads/13.html>



### HFSS 学习培训课程套装

该套课程套装包含了本站全部 HFSS 培训课程,是迄今国内最全面、最专业的 HFSS 培训教程套装,可以帮助您从零开始,全面深入学习 HFSS 的各项功能和在多个方面的工程应用。购买套装,更可超值赠送 3 个月免费学习答疑,随时解答您学习过程中遇到的棘手问题,让您的 HFSS 学习更加轻松顺畅...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/11.html>



## CST 学习培训课程套装

该培训套装由易迪拓培训联合微波 EDA 网共同推出,是最全面、系统、专业的 CST 微波工作室培训课程套装,所有课程都由经验丰富的专家授课,视频教学,可以帮助您从零开始,全面系统地学习 CST 微波工作的各项功能及其在微波射频、天线设计等领域的设计应用。且购买该套装,还可超值赠送 3 个月免费学习答疑...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/cst/24.html>



## HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书,课程从基础讲起,内容由浅入深,理论介绍和实际操作讲解相结合,全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程,可以帮助您快速学习掌握如何使用 HFSS 设计天线,让天线设计不再难...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

## 13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程,培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合,全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作,同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习,可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试...

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



### 我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年,10 多年丰富的行业经验,
- ※ 一直致力并专注于微波射频和天线设计工程师的培养,更了解该行业对人才的要求
- ※ 经验丰富的一线资深工程师讲授,结合实际工程案例,直观、实用、易学

### 联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>