

# RF 低噪声放大器的设计与稳定性分析

Maxim 公司射频工程师 Harter-Chan

**摘要** 该文讨论了低噪声放大器(LNA)的设计基础,介绍了传输线理论、RF 功率增益等基础知识。  
**关键词** 低噪声放大器 传输线 双端网络 S 参数

## 1 传输线基础理论

从阻抗为  $Z_s$  的信号源将电压、电流或功率传递给负载  $Z_L$  的过程,可以看作是入射波和反射波沿相反方向在特性阻抗为  $Z_0$  的传输线上的传播过程。在图 1 中,如果  $Z_L = Z_0$ ,则入射波被负载完全吸收,不产生反射波;如果  $Z_L \neq Z_0$ ,则入射波的一部分将被反射到信号源;如果  $Z_s = Z_0$ ,来自负载的反射波将被信号源完全吸收,不产生进一步的反射;如果  $Z_s \neq Z_0$ ,负载产生的反射波会再次反射到负载端。 $Z_0$  与  $Z_L$  或  $Z_s$  之间的失配度确定了入射波的反射程度,反射波与入射波之比称为反射系数( $\Gamma$ ),用于衡量传输线与终端阻抗的匹配程度, $\Gamma$  为复数,如式(1):

$$\Gamma = \frac{\text{反射波}}{\text{入射波}} = \rho/\theta \quad (1)$$

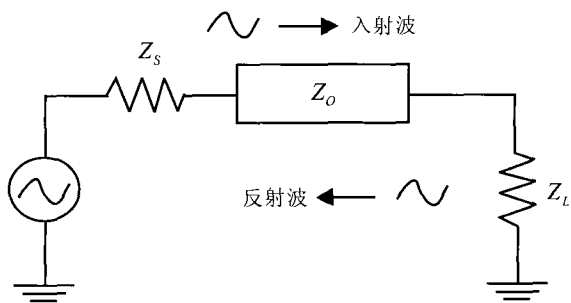


图 1 传输线特性阻抗与终端阻抗不匹配时存在信号反射

随着传输线特性阻抗与终端电阻匹配度的提高,反射信号减弱, $\Gamma$  减小。当负载与传输线特性阻抗达到最佳匹配时,传输线上无信号反射, $\Gamma = 0$ 。当负载开路或短路时,负载不吸收入射功率,所有入射波反射到信号源,此时  $\Gamma = 1$ 。一般情况下  $\Gamma$  介于 0 和 1 之间。 $\Gamma > 1$  时,说明反射波幅值高于入射波,负载

相当于一个信号源,这一概念在振荡器设计中非常有用,但在放大器设计中要严格避免出现这种不稳定因素。反射系数可以用负载阻抗表示,如式(2)。

$$\Gamma = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \text{ 或用归一化阻抗: } z_L = \frac{Z_L}{Z_0} \text{ 表示,}$$

$$\text{表达式为: } \Gamma = \frac{z_L - 1}{z_L + 1} \quad (2)$$

在微波或射频网络设计中,通常用  $\Gamma_s$ 、 $\Gamma_L$  分别表示信号源的反射系数和负载的反射系数。入射波与反射波可以用信号流图表示,利用信号流图能够清晰地描述电路中各变量之间的关系,很方便地计算两个节点之间的传输函数。信号流图中每个节点代表一个变量,节点之间由支路连接,每条支路指定一个增益表示连接两个节点的反射系数。如图 2 所示。图 2 中  $a$ 、 $b$  分别表示入射波和反射波, $\Gamma_s$  是功率源  $b_s = 0$  时的反射系数: $\Gamma_s = b/a$  ( $b_s = 0$ )。

## 2 S 参数与双端网络

在图 1 的信号源与负载间插入一个双端口电路,如图 3 所示,图中信号源向双端口网络提供的

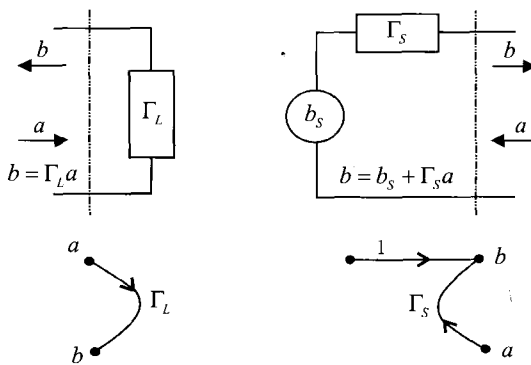


图 2a 负载信号流图

图 2b 功率源信号流图

图 2 信号流图

入射波 ( $a_1$ ) 一部分反射到信号源端 ( $b_1$ ), 另一部分通过双端口网络传输。传输信号同样会从负载产生反射, 成为双端口网络输出端口的入射波 ( $a_2$ )。入射波  $a_2$  的一部分会从输出端口反射到负载端 ( $b_2$ )。从以上分析可以看出: 通过电路各点的传输信号均由两部分组成, 如: 从双端口器件的输出端至负载端的传输信号由  $a_2$  在双端口器件产生的反射信号和通过双端口器件传输到负载端的信号  $a_1$  组成; 从双端口器件输入端反馈到信号源的信号, 由入射波  $a_1$  产生的反射部分和  $a_2$  通过双端口器件传输到信号源的信号  $a_2$  组成。表达式如下:

$$b_1 = S_{11} a_1 + S_{12} a_2$$

$$b_2 = S_{21} a_1 + S_{22} a_2$$

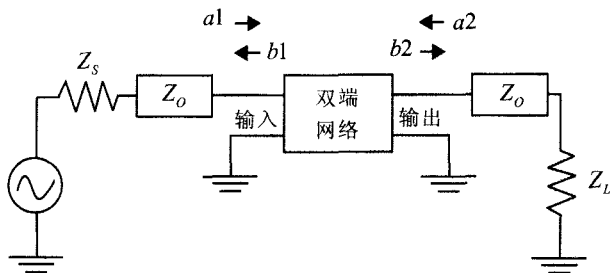


图3 双端网络框图

其中:  $S_{11}$  为输入反射系数  $S_{11} = b_1/a_1|_{a_2=0}$ ;  $S_{12}$  为反向传输系数;  $S_{21}$  为正向传输系数;  $S_{22}$  为输出反射系数  $S_{22} = b_2/a_2|_{a_1=0}$ 。

从上述定义可知: 一个双端网络 (如 LNA) 可以完全由散射参数描述, 利用  $s$  参数可以分析其潜在的不稳定因素、所提供的最大功率增益、输入和输出阻抗、传输增益等参数, 或计算最佳的信号源、负载匹配阻抗。图 4 是用于增益定义的一个双端网络示意图, 对应的信号流图如图 5。图中  $\Gamma_m$  是双端网络的输入反射系数, 输出匹配电路反射系数为  $\Gamma_L$ ;  $\Gamma_{out}$  为双端网络输出反射系数, 输入匹配网络

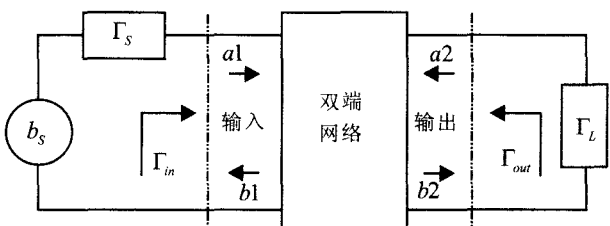


图4 双端网络增益计算示意图

反射系数为  $\Gamma_s$ 。由图 5 可以看出: 从  $a_1$  至  $b_1$  的通路有:

$$S_{11}、S_{21}\Gamma_L S_{12}、S_{21}\Gamma_L S_{22}\Gamma_L S_{12}、S_{21}\Gamma_L S_{22}\Gamma_L S_{22}\Gamma_L S_{12} \dots$$

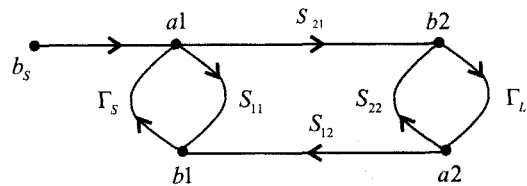


图5a 双端网络信号流图

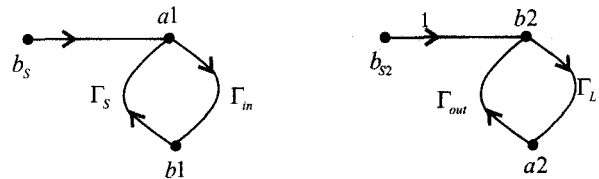


图5b 输入端口等效电路

图5c 输出端口等效电路

图5 双端网络信号流图

由于双端网络输出与负载不匹配, 反射系数大于 0, 环路  $S_{22} \Gamma_L$  表示循环反射。  $b_1$  与  $a_1$  的关系式如下:

$$b_1 = S_{11} a_1 + S_{21} \Gamma_L S_{12} a_1 \left\{ 1 + S_{22} \Gamma_L + \dots + (S_{22} \Gamma_L)^n \right\}$$

$$\frac{1}{1 - S_{22} \Gamma_L}$$

双端网络的输入反射系数为:

$$\Gamma_{IN} = \frac{b_1}{a_1} = S_{11} + \frac{S_{21} \Gamma_L S_{12}}{1 - S_{22} \Gamma_L} \quad (3)$$

按照同样的方法可得网络输出反射系数:

$$\Gamma_{OUT} = \frac{b_2}{a_2} = S_{22} + \frac{S_{21} \Gamma_s S_{12}}{1 - S_{11} \Gamma_s} \quad (4)$$

### 3 双端网络功率增益

在低频电路设计中, 电流增益、电压增益是衡量电路性能的主要参数, 而对于高频、微波电路的设计则关注与功率相关的参数。以下是针对双端网络的参数定义。

(1) 双端网络功率增益

$$\text{双端网络增益定义为: } G = \frac{P_2}{P_1} \quad (5)$$

$$\text{其中: } P_2 = \frac{1}{2} (|b_2|^2 - |a_2|^2) = \frac{1}{2} |b_2|^2 (1 - |\Gamma_L|^2)$$

$$P_1 = \frac{1}{2} (|a_1|^2 - |b_1|^2) = \frac{1}{2} |a_1|^2 (1 - |\Gamma_{IN}|^2) \quad (6)$$

从图5所示信号流程图可推出  $b_2$  与  $a_1$  的关系式:

$$b_2 = S_{21}a_1 \{1 + S_{22}\Gamma_L + \dots + (S_{22}\Gamma_L)^n + \dots\}$$

$$\rightarrow \frac{b_2}{a_1} = \frac{S_{21}}{1 - S_{22}\Gamma_L} \quad (7)$$

将式(6)和(7)代入式(5)可得:

$$G = \frac{P_2}{P_1} = \frac{|b_2|^2(1 - |\Gamma_L|^2)}{|a_1|^2(1 - |\Gamma_{IN}|^2)} = \frac{|S_{21}|^2 - |\Gamma_L|^2}{(1 - S_{22}\Gamma_L)^2(1 - |\Gamma_{IN}|^2)} \quad (8)$$

将式(3)代入式(8)中可得双端网络增益定义式:

$$G = \frac{P_2}{P_1} = \frac{|S_{21}| - |\Gamma_L|}{(1 - S_{22}\Gamma_L)^2 \left(1 - \left|S_{11} + \frac{S_{21}\Gamma_L S_{12}}{1 - S_{22}\Gamma_L}\right|\right)}$$

$$= \frac{|S_{21}| - |\Gamma_L|}{(1 - S_{22}\Gamma_L)^2 |S_{11} - \Delta S \Gamma_L|^2} \quad (9)$$

上式中:  $\Delta S = (S_{11}S_{22} - S_{21}S_{12})$

(2)最大功率

当  $\Gamma_L = \Gamma_{out}^*$  时, 双端网络增益达到最大值  $G_{AV}$ , 对应于双端网络所能提供的最大输出功率  $P_{2AV}$  与信号源提供给双端网络输入端口的最大功率  $P_{1AV}$  之比。最大增益可以初步衡量一个低噪声放大器是否能够为系统提供足够的信号增益。

利用图5中输入端口的等效电路可以得出  $a_1$  与信号源  $b_s$  的关系式:

$$a_1 = b_s + b_s \Gamma_{IN} \Gamma_s + \dots + b_s (\Gamma_{IN} \Gamma_s)^n \rightarrow \frac{a_1}{b_s} = \frac{1}{1 - \Gamma_{IN} \Gamma_s}$$

代入式(6)得到信号源  $b_s$  为输入端口提供的功率:

$$P_{1AV} = \frac{1}{2} |b_s|^2 \frac{(1 - |\Gamma_{IN}|^2)}{(1 - \Gamma_{IN} \Gamma_s)^2} \quad (10)$$

当  $\Gamma_{IN} = \Gamma_s^*$  时, 信号源为双端网络提供的功率最大:

$$P_{1AV} = \frac{|b_s|^2}{2(1 - |\Gamma_s|^2)} \quad (11)$$

双端网络输出端口的等效信号源为:

$$b_{s2} = a_1 S_{21} = \frac{b_s S_{21}}{1 - S_{11} \Gamma_s} \quad (12)$$

当  $\Gamma_{OUT} = \Gamma_L^*$  时, 双端网络输出功率最大:

$$P_{2AV} = \frac{|b_{s2}|^2}{2(1 - |\Gamma_{OUT}|^2)} = \frac{|b_s S_{21}|^2}{2(1 - |\Gamma_{OUT}|^2)(1 - S_{11} \Gamma_s)^2} \quad (13)$$

由式(11)和式(13)得:

$$G_{AV} = \frac{P_{2AV}}{P_{1AV}} = \frac{|S_{21}| - |\Gamma_s|^2}{(1 - |\Gamma_{OUT}|^2)(1 - S_{11} \Gamma_s)^2}$$

将式(4)代入上式得:

$$G_{AV} = \frac{P_{2AV}}{P_{1AV}} = \frac{|S_{21}| - |\Gamma_s|^2}{(1 - |\Gamma_{OUT}| - S_{11} \Gamma_s)^2}$$

$$= \frac{|S_{21}| - |\Gamma_s|}{\left(1 - \left|S_{22} + \frac{S_{21}\Gamma_s S_{12}}{1 - S_{11}\Gamma_s}\right| - S_{11}\Gamma_s\right)^2} \quad (14)$$

双端网络为负载提供功率的大小是双端网络输入端口吸收功率的函数, 而输入端的吸收功率取决于  $\Gamma_s \Gamma_{IN}$  的匹配度。为得到最大功率需在信号源与双端网络之间加匹配电路。

(3)传输增益

传输增益  $G_T$  定义为负载输出功率  $P_2$  与双端网络输入端口最大功率  $P_{1AV}$  之比。传输增益考虑了输入端的阻抗匹配效应, 忽略了元件的电阻损耗, 定义式为:

$$P_2 = \frac{1}{2} |b_2|^2 (1 - |\Gamma_L|^2) \quad P_{1AV} = \frac{|b_s|^2}{2(1 - |\Gamma_s|^2)} \text{ When } \Gamma_{IN} = \Gamma_s^*$$

$$G_T = \frac{P_2}{P_{1AV}} = \frac{|b_2|^2}{|b_s|^2} (1 - |\Gamma_s| - |\Gamma_L|) \quad (15)$$

由图5c得:

$$b_2 = b_{s2} + b_{s2} \Gamma_{OUT} \Gamma_L + \dots + b_{s2} (\Gamma_{OUT} \Gamma_L)^n$$

$$\rightarrow b_2 = \frac{b_{s2}}{1 - \Gamma_{OUT} \Gamma_L} \quad (16)$$

将式(12)代入(16)得:

$$b_2 = \frac{b_s S_{21}}{(1 - S_{11} \Gamma_s)(1 - \Gamma_{OUT} \Gamma_L)} \quad (17)$$

将式(4)和式(17)代入(15)可得:

$$G_T = \frac{P_2}{P_{1AV}} = \frac{|S_{21}|^2 (1 - |\Gamma_s| - |\Gamma_L|)}{|(1 - S_{11} \Gamma_s)(1 - \Gamma_{OUT} \Gamma_L)|^2}$$

$$= \frac{|S_{21}|^2 (1 - |\Gamma_s| - |\Gamma_L|)}{|(1 - S_{11} \Gamma_s)(1 - S_{22} \Gamma_L) - S_{12} S_{21} \Gamma_s \Gamma_L|^2}$$

稳定性与最大功率增益是选择双端网络的两个主要参数, 特别是在放大器的设计中, 这两个参数更加至关重要。放大器的稳定性可用于分析系统自激的趋势, 最大功率增益则提供了信号源和负载达到共轭匹配时的最大功率理论值。 (待续)

## 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>