

揭开射频变压器神秘面纱： 理论、技术和应用入门

Demystifying RF Transformers: A Primer on the Theory, Technologies and Applications

William Yu and Urvashi Sengal, Mini-Circuits, Brooklyn, N.Y.

本质上，变压器仅仅是通过互感应磁场连接的两个或多个导电回路。当磁芯内产生变化的磁通量时，通过流经一个导电路径的交流电流，在其他导电路径中感应出电流。该感应电流与两个导电回路之间的磁耦合量之比成正比。导电回路与磁芯的磁耦合的比例确定了附加导电回路中的感应电压，从而提供了阻抗变换和电压的升高或降低。通过添加尽可能多的不同耦合系数的附加导电回路，可以实现各种功能，这就是为什么射频变压器是一种变化多样且用途广泛的设备，并且在整个射频/微波行业中得到广泛使用的原因。

常见射频变压器由缠绕在磁芯（或在高频率时的空芯）上的两条或多条不同的导线组成，这就是为什么射频变压器通常被描述为绕组匝数之比的原因。射频变压器可用于多种应用，因为设备的性质允许通过不同配置实现不同功能，包括：

- 提供用于阻抗匹配的阻抗变换。
- 升高或降低电压或电流。
- 平衡电路和非平衡电路之间的高效耦合。
- 增强共模抑制。
- 在电路之间提供直流隔离。
- 注入直流电流。

常见的用于构建变压器的几种技术包括芯线、传输线、低温共烧陶瓷 (LTCC) 和MMIC。每种产品和不同封装都具有一系列性能指标。

变压器理论

尽管理想变压器模型对于实际应用而言并不现实，但可以说明变压器的基本性能（如图1所示）。端口1和2是初级绕组的输入，端口3和4是次级绕组的输出。根据法拉第定律，通过初级绕组的电流会通过次级绕组中电流和电压的互磁场产生磁通量。产生的电流和电压均与绕组的比率或绕组与铁芯之

间的磁耦合成正比。因此，次级阻抗是绕组比平方乘以初级阻抗的函数。该关系可由以下公式描述：

$$n = \frac{N_2}{N_1}, V_2 = nV_1, I_2 = \frac{I_1}{n}, Z_1 = \frac{V_1}{I_1}, Z_2 = \frac{V_2}{I_2}, Z_2 = n^2 Z_1 \quad (1)$$

其中 I_1 、 V_1 和 Z_1 是通过初级绕组的电流、电压和阻抗； I_2 、 V_2 和 Z_2 是通过次级绕组的电流、电压和阻抗； N_1 是初级绕组的匝数； N_2 是次级绕组的匝数。

真正的变压器包括多个寄生电阻、电感和电容，包括互电容和自寄生电容。图2给出了非理想射频变压器的集总模型，该模型描述了两个绕组的寄生电阻和电感，以及铁芯的电阻损耗和绕组的有效电感。寄生效应导致实际的变压器工作在有限的带宽内，并具有插入损耗和有限的功率处理能力（如图3所示）。变压器性能还取决于频率、温度和功率。

实际的射频变压器的低频截止频率由绕组的有源电感决定，而高频截止频率则由绕组间和绕组内的电容决定。工作带宽中的插入损耗是初级绕组和次级绕组中的电阻损耗以及铁芯内损耗的乘积。由于电阻损耗往往是频率和温度的函数，因此变压器的有效工作带宽受到这些因素的限制。由于绕组之间的磁耦合不完全，几种类型的射频变压器会引入漏电感。由于漏电感的电抗与频率成正比，因此这些寄生效应会降低高频下的回波损耗，并增加低频下的插入损耗。更复杂的射频变压器拓扑，例如具有多个绕组、抽头和其他元件的变压器，会根据拓扑和变压器结构的不同呈现出变化的性能。例如，一种称为平衡-不平衡变换器的射频设备用于通过阻抗变换有效地将平衡（即差分信号）电路互连到不平衡（即单端信号）电路，这可以通过射频变压器来实现。另一个与平衡-不平

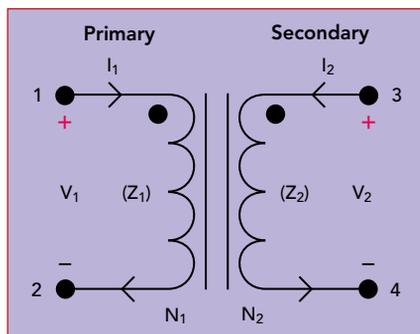


图1：理想变压器模型。

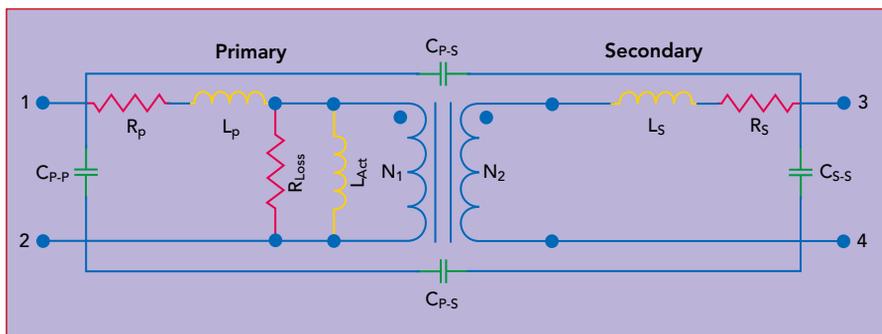


图2：具有并联元件的变压器模型。

固态功率放大器

Solid State Power Amplifier



高频宽带、高功率、高增益



输出驻波保护、过温保护、输入过驱保护



USB接口、以太网接口



上位机远程控制



自动校准偏置电流



6-18GHz, 100-300W



0.5-6GHz, 50W



0.7-2.7GHz, 160W



2-6GHz, 100W



18-47GHz, 5W



27-34GHz, 20W



32-38GHz, 10W

频率 (GHz)	最大功率 (W)	增益 (dB)
0.5-6	50	42
0.7-3	160	55
2-6	100	48
6-18	300	60
18-47	5	35
27-34	20	50
32-38	10	40



低噪声放大器

频率达到54GHz
低噪声系数
小型化 超宽带



固态开关

频率达到50GHz
高速切换 低损耗
高隔离度 小型化



数控/压控衰减器

频率达到50GHz
低损耗 高精度
宽动态衰减范围 小型化



数控/压控移相器

频率达到40GHz
低插入损耗
低相位误差



滤波器

高通低通带通滤波器
带阻滤波器
频率达到50GHz
高抑制 低损耗 小型化



功分器

频率达到67GHz
低损耗 高隔离度
小型化



耦合器

频率达到70GHz
高定向性
大功率 低驻波



隔离器

频率达到40GHz
低损耗
高隔离度 高功率



扫一扫关注我



成都玖信科技有限公司

电邮 sales@qotana.com 承诺24小时内答复

地址: 成都市武侯区武兴路86号兆信国际 电话: 028-85559890
网址: www.qotana.com 电子信箱: sales@qotana.com

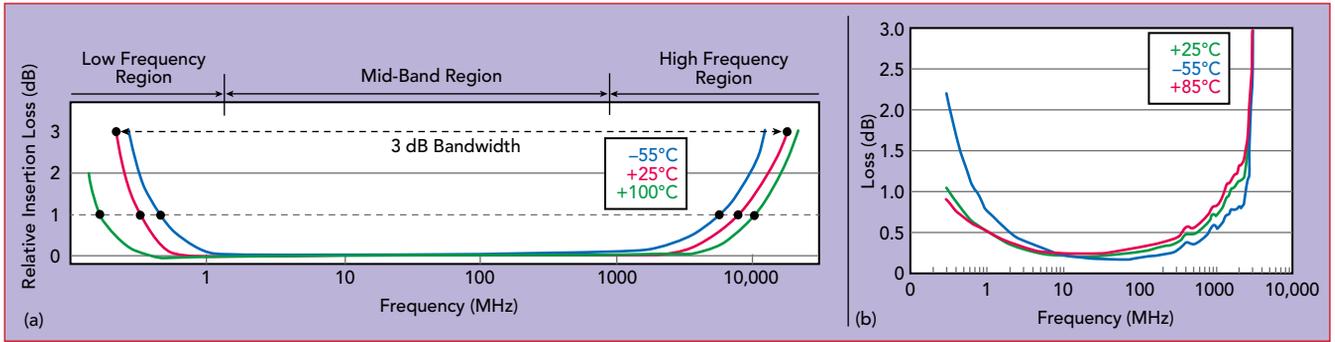


图3: 具有带通特性的变压器的理论仿真结果(a)和测试结果(b)。

衡变换器类似的设备称为不平衡变压器，用于将不平衡的射频电路互连，也可以通过射频变压器实现。变压器形成的常见平衡-不平衡变换器是磁通耦合的平衡-不平衡变换器，其通过在磁芯周围缠绕分开的导线并接地来构造初级绕组的一侧。进入初级不平衡绕组的单端射频信号经过阻抗变换，通过次级绕组输出为差分（即平衡）信号。包括非磁性铁芯（通常是铁磁体）的射频变压器具有一些不利因素。铁芯的磁化电感限制了低频变压器的性能。该电感是铁芯磁导率、横截面积和铁芯周围绕组数的函数。励磁电感增加了低频插入损耗，并降低了回波损耗。铁芯的磁导率也是温度的函数。随温度升高的磁导率增加了低频插入损耗。

射频变压器技术

分立式射频变压器的两种主要类型是芯线型和传输线型。此外，LTCC和MMIC是两种常见的薄型和紧凑型变压器设计。

芯线型射频变压器

芯线型变压器是通过将导电线（通常是绝缘铜线）缠绕在磁芯（例如环形）上制成的。可以存在一个或多个次级绕组，也可以在中心抽头以实现附加功能。图4给出了由环形磁芯和绝缘铜线绕组制成的射频变压器。由于导线和磁芯之间的电感耦合，较小尺寸的芯线变压器要比较大尺寸的芯线变压器工作在更高的频率。然而，紧凑型变压器的较小尺寸增加了绕组和芯的电阻损耗，从而导致在较低频率下产生更大的插入损耗。

传输线型射频变压器

传输线型变压器拓扑包括经过精确设计的传输线，这些传输线位于两个不匹配的负载之间，或者是多个传输线的复杂排列。例如，传输线的长度可以用于实现两个失配负载之间的阻抗变换。一些传输线变压器使用包裹在铁氧体磁芯上的绝缘

导线，与典型的芯线变压器非常相似，通常被认为是芯线型变压器。

基本的传输线型变压器包括两条导体传输线。第一导体从发电机连接到负载，另一导体在第一传输线的输出端连接到地面（如图5所示）。通过这种配置，流过负载的电流是流过发电机的电流的两倍，而 V_0 是电压 V_1 的一半。因此，负载电阻仅是在发电机侧看到的电阻的四分之一，从而产生了1:4的变压器，如下式所示：

$$V_0 = \frac{V_1}{2}, R_G = \frac{V_1}{I_1}$$

$$R_L = \frac{V_0}{2I_1} = \frac{V_1/2}{2I_1} = \frac{R_G}{4} \quad (2)$$

传输线型变压器的常见版本是四分之一波长传输线。此拓扑使用具有特征阻抗的传输线，该阻抗使输入阻抗与负



图4: 铁芯线绕变压器的结构。

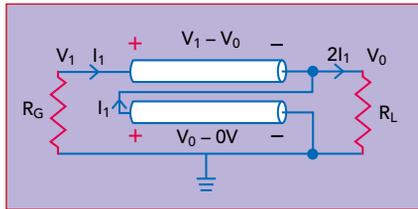


图5: 理想传输线变压器模型。

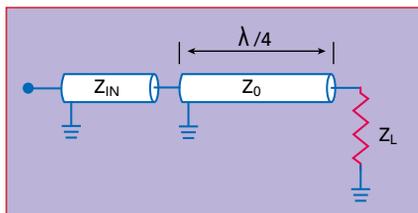


图6: 四分之一波长变压器结构。

载之间的阻抗匹配成为可能。四分之一波长变压器的长度由工作频率决定，带宽限制为围绕中心频率的一个八度。考虑具有特性阻抗 Z_0 和长度 L 的无损传输线，该传输线连接在输入阻抗 Z_{in} 和负载阻抗 Z_L 之间（如图6所示）。为了使 Z_{in} 与 Z_L 匹配，四分之一波传输线 Z_0 的特征阻抗由下式确定：

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda}, Z_{IN} = Z_0 \frac{Z_L + jZ_0 \tan\beta L}{Z_0 + jZ_L \tan\beta L}$$

$$@L \sim \frac{\lambda}{4} Z_{IN} = \frac{Z_0^2}{Z_L}, Z_0 = \sqrt{Z_{IN} Z_L} \quad (3)$$

传输线变压器的一个优点是，在绕组间有很大的电容以及漏电感，与芯线型相比，它产生了更宽的工作带宽。

LTCC变压器

LTCC变压器是使用基于陶瓷的基板制造的多层器件。LTCC变压器使用耦合线作为传输线来实现阻抗转换和信号从单端到平衡的转换。LTCC变压器依赖于电容耦合，从而使LTCC变压器与铁磁变压器相比可以在更高的频率下工作。但是，这可能导致低频性能下降。LTCC技术的一项优势是能够制造小型且坚固的变压器，是高性能应用的理想选择（如图7所示）。

MMIC变压器

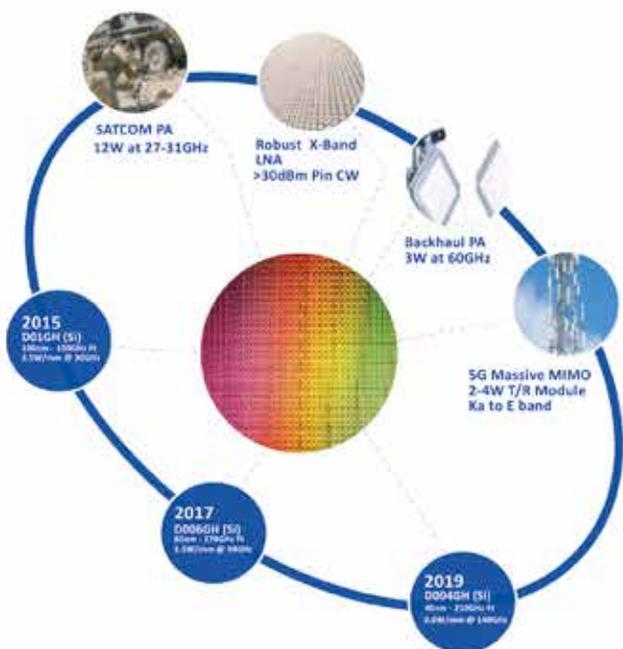
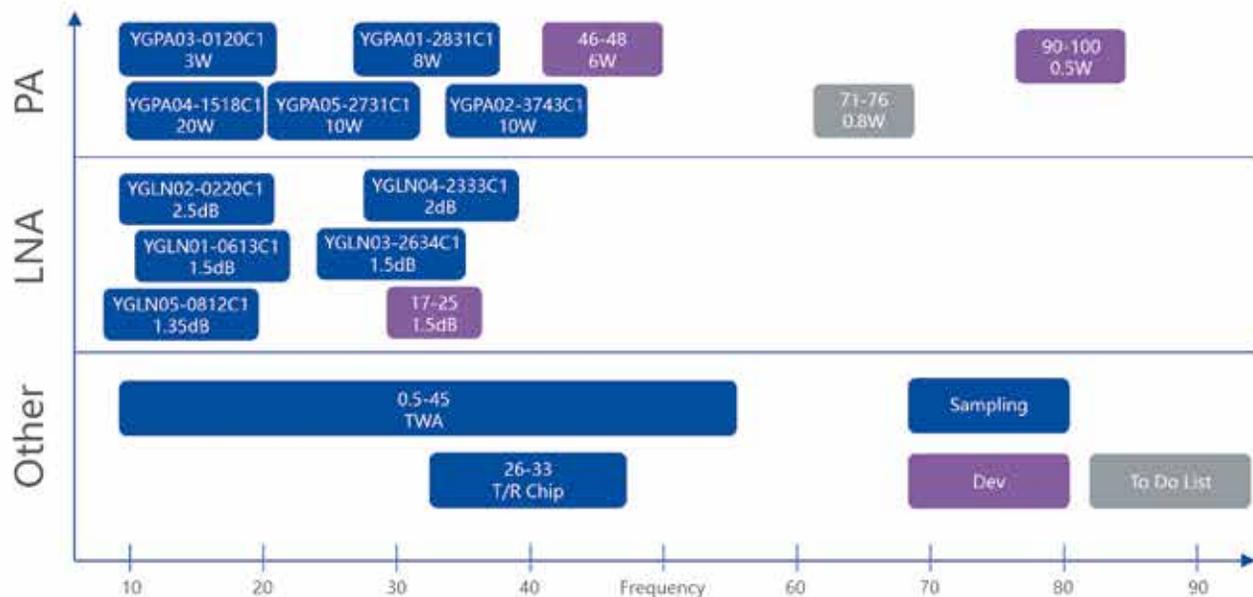
像LTCC变压器一样，MMIC变压器也使用具有精确分层平面金属化的2D基板制成。通常，MMIC变压器是使用螺



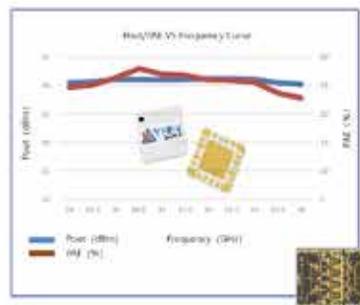
图7: 采用LTCC技术设计的变压器。



GaN For mm-Wave Application



YGPA01-3034C1
Ka-band 8W
Power Amplifier



GaN process technologies Roadmap



旋电感器制造的，该螺旋电感器以两条传输线印刷在基板上，并且线形平行。可以使用GaAs集成无源器件工艺来制造MMIC变压器（如图8所示）。精密光刻有助于实现出色的可重复性、高频性能和出色的热效率。

变压器功能与应用

射频变压器的不同功能取决于其拓扑：

匹配 - 变压器可以匹配具有不同阻

抗的两个电路，或者提供电源电压的升压或降压。在射频电路中，两个节点之间的阻抗失配会导致功率传输减少和反射麻烦。阻抗匹配变压器有效地消除了反射，并在两个电路节点之间提供了最大的功率传输（如图9所示）。

Balun和unun - 平衡-不平衡变换器(Balun)用于连接平衡和不平衡电路部分。对于不平衡的线路，可以将自耦变压器（换衡器）配置用于阻抗匹配，即unun。

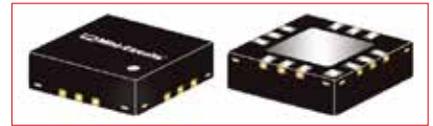


图8：采用MMIC技术设计的变压器。

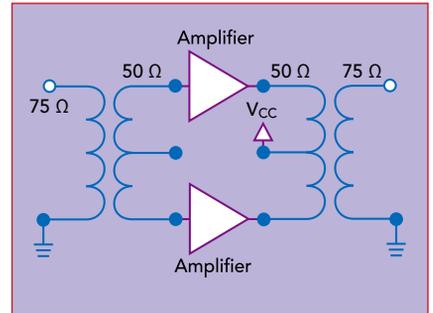


图9：采用变压器匹配到75Ω的50Ω平衡放大器。

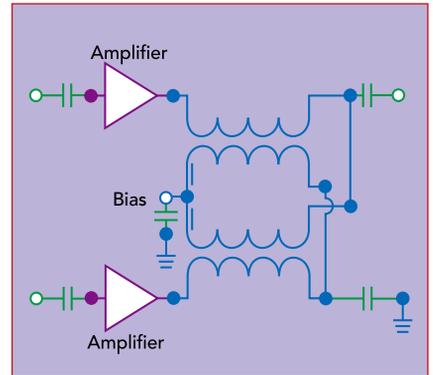


图10：采用中间抽头变压器代替偏置三通。

偏置注入和隔离 - 可以设计射频变压器为初级绕组和次级绕组之间提供DC隔离，这对于将采用DC偏置的、受到DC电压负面影响的射频电路分开非常有用。如果电路的一部分需要直流电流，则可以使用专用的射频变压器将电流注入信号路径。例如，两个中心抽头的变压器可以注入直流偏置，并替换两个偏置三通（如图10所示）。

其他功能 - 射频变压器可设计用于为平衡（即差分）电路提供增强的共模抑制。其他拓扑可用作扼流圈，从信号线中滤除高频分量。

总结

射频变压器可以采用多种方法和多种材料制造。它们被配置成多种拓扑结构，以执行射频电路中的许多功能。取决于材料、构造和设计，射频变压器可以是窄带或宽带的，可以工作在低频或高频。了解射频变压器的细微差别可以帮助设计人员通过选择最佳的变压器来优化设计。讨论射频变压器的其他文章将陆续发布在www.mwjjournal.com。■

射频解决方案

来自 **JFW Industries**

测试系统 固定衰减器 功分器
 程控衰减器 负载/终端器
 手动可变衰减器 射频开关
 测试附件



JFW Industries

Call 317-887-1340
 Toll Free 877-887-4JFW (4539)
 E-mail sales@jfwindustries.com
 Visit www.jfwindustries.com