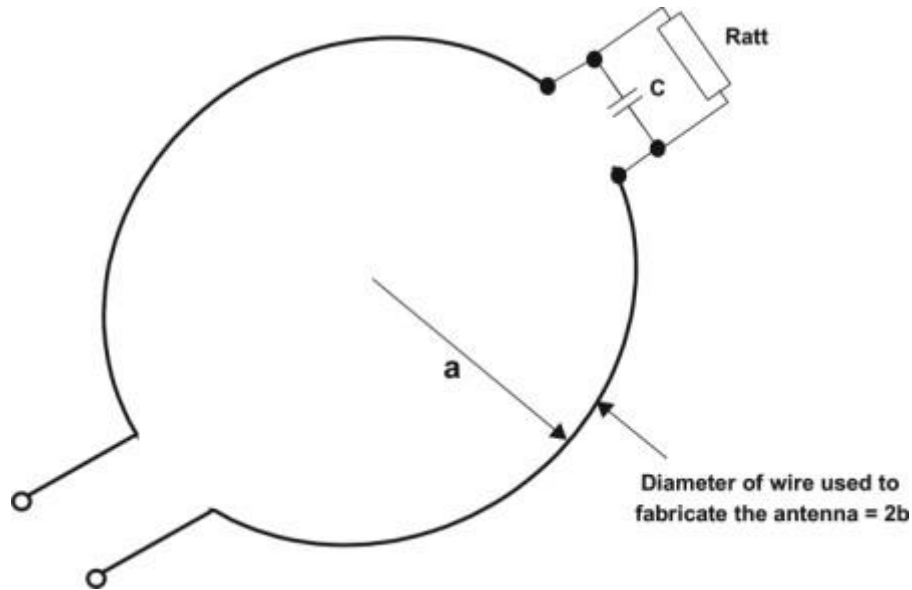


ISM 频带及小范围设备天线基础：第三章

在此将介绍 RF 和天线的基础知识以及实际的天线设计原理。

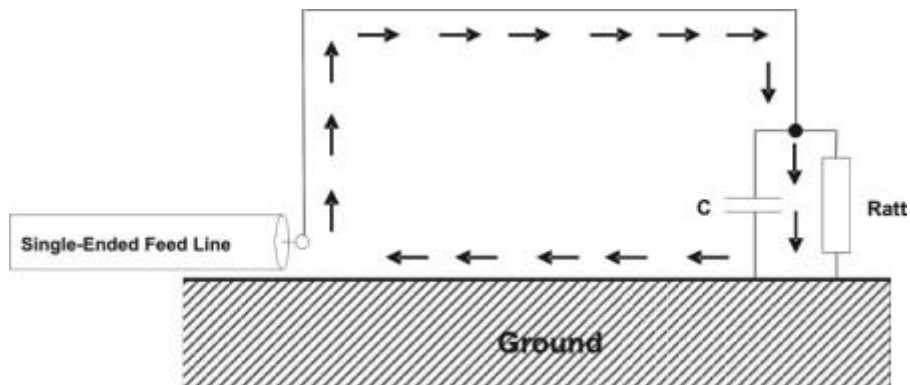
Matthew Loy, Iboun Sylla, 德州仪器

小型环状天线



13. 带差分馈入的小型环状天线

如图 13 所示的环状天线具有差分馈入端。通常情况下，接地平面将作为此环路的一部分，从而形成如图 14 所示的单端馈入。



14. 单端环状天线

上图的小箭头指示了电流流经环路的方向。在接地平面上，电流主要集中于地表面。因此，如图 14 所示的架构的电学性质与图 13 所示的差分馈入环路类似。

下列关于小型环状天线的考虑因素基于参考文献[4]，并假定流经环路的电流恒定。这就意味着环形周长必须小于波长的十分之一。虽然此类尺寸较为少见，但所给出的公式描述了主要的性质并可作为环状天线设计的出发点。

若环路中的电流恒定，我们可将环路看作感应系数(inductance)为 L 的辐射电感，此处，L 是绕线或 PCB 迹线的电感值。此电感 L 与电容 C 一并构成了谐振电路。通常情况下，所附加的电阻可降低天线的品质因数，并使得天线对元件的容差有更好的容忍度。毫无疑问，此添加的电阻还将消耗一定的能量并降低天线的效率。

下列计算中，所采用的圆形环路的半径为 a，方形环路的边长为 a。边长为 a₁ 及 a₂ 的矩形天线大约等效于边长为 a 的方形天线，a 如下计算：

$$a = \sqrt{a_1 a_2}$$

用于构建环路的绕线长度（周长）称之为 U，对于圆形环路来说 U=2πa，对于方形环路来说 U=4a。

在计算感应系数时，绕线半径 b 是必须的，此处的 b 是用于构建天线的实际绕线直径的 1/2。而在很多时候，环路天线是通过 PCB 上的迹线实现的，此时可采用 b = 0.35.d + 0.24.w 进行计算，式中 d 是铜线层的厚度，w 是迹线的宽度。

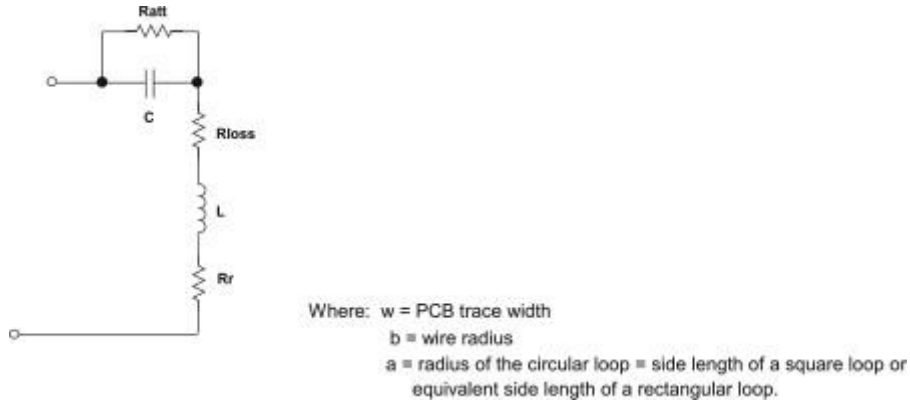
图 15 展示了小型环状天线的等效示意图。

$$R_{\text{loss}} = \frac{U}{2 \times w} \times \sqrt{\frac{\pi \times f \times \mu_0}{\sigma}} + R_{\text{ESR}}$$

$$L = \mu_0 \times a \times \left(\ln\left(\frac{a}{b}\right) + 0.079 \right) \quad \text{Circular Loop}$$

$$L = \frac{2 \times \mu_0}{\pi} \times a \times \left(\ln\left(\frac{a}{b}\right) - 0.774 \right) \quad \text{Square Loop}$$

$$R_r = \frac{A^2}{\lambda^4} \times 31.17 \text{ k}\Omega$$



15. 图 13 中小型环状天线的等效示意图

环状天线的辐射阻抗较小，典型值小于 1Ω 。损失电阻 R_{loss} 记述了环路导体的电阻损失及电容的损失（以ESR[等效串联电阻]表示）。通常情况下，电容的等效串联电阻是不能被忽视的。有意思的是，铜箔片的厚度无需纳入损失电阻的计算，由于趋肤效应(skin effect)，电流将局限于导体的表面。

环路的电感 L （即绕线的电感）结合电容 C 构成了串联谐振电路。在实践中，该谐振电路的 L - C 比率较大，给出了较高的品质因数 (Q)，从而使得天线对元件的容差较为敏感。这就是时常附加衰减电阻 R_{att} 以降低 Q 值的原因。为了描述 R_{att} 对环路天线的影响，我们进行了并串转换，并采用等效串联电阻 R_{att_trans} 表示。 R_{att_trans} 的电阻值取决于电容及环路几何尺寸的可接受容差。

最大可用品质因数可通过电容容差 $\Delta C/C$ 计算得出：

$$Q = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{\Delta C}{C}} - 1}$$

所转化得到的串联衰减电阻为：

$$R_{att_trans} = \frac{2 \times \pi \times f \times L}{Q} - R_r - R_{loss}$$

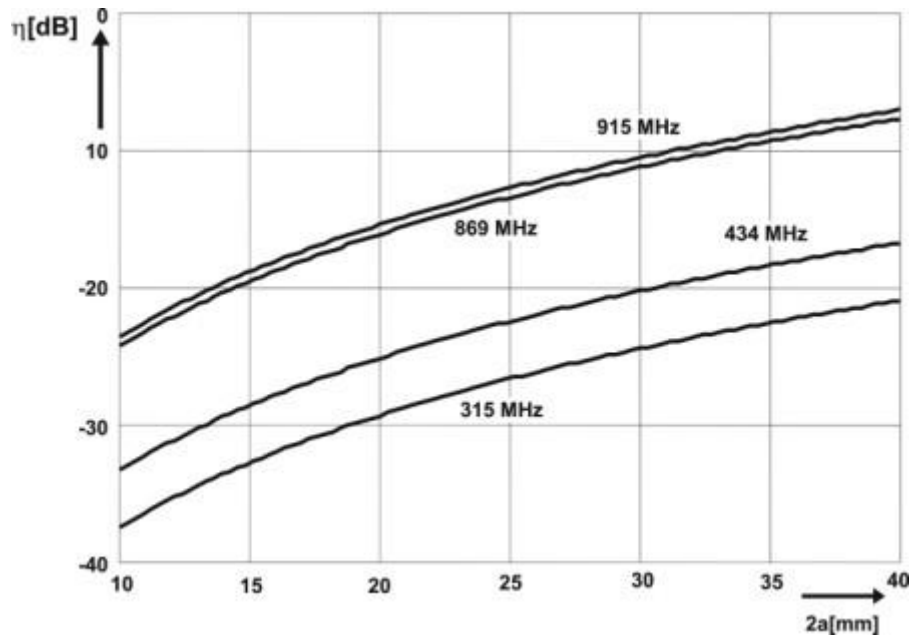
环路天线效率为：

$$\eta = \frac{R_r}{R_r + R_{loss} + R_{att_trans}}$$

很多情况下，辐射电阻远小于损失电阻及转换衰减电阻，使得效率极为低下。此类情况下，效率约为：

$$\eta = \frac{Q \times R_r}{2 \times \pi \times f \times L}$$

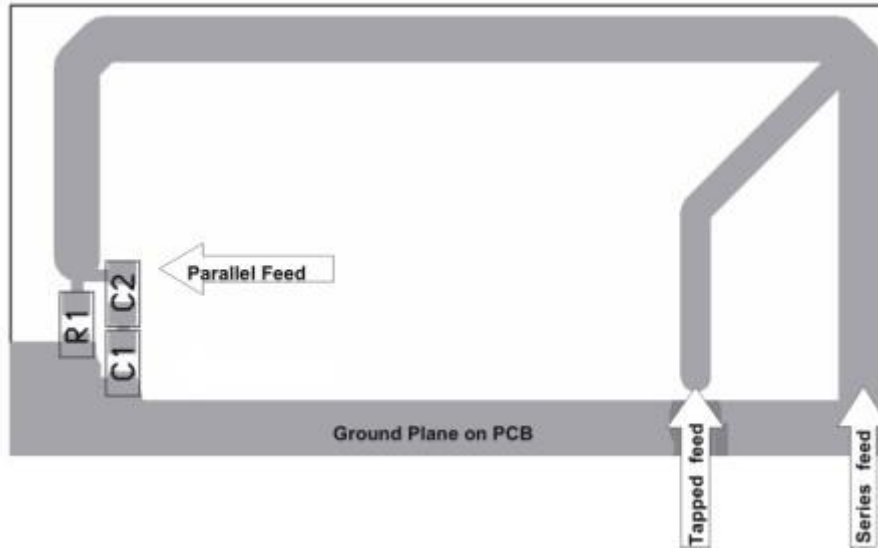
R_r 取决于环路面积，对于圆形环路来说面积为 πa^2 ，对于方向回路来说面积为 a^2 ，而对于矩形回路来说面积为 $a_1 a_2$ 。图 16 展示了小型环状天线的效率相对于其直径的变化，在此假设容差为 5%。迹线宽度假设为 1mm，铜箔片的厚度假设为 50 μm ，但上述两参数对效率的影响极其微弱，效率主要取决于衰减电阻 R_{att} 。与所预想的情况一致，效率将随直径增加而提高。



16. 容差为 5% 时，小型环路天线的效率

如果我们采用如图 14 所示电路馈入环状天线，图 15 中的串联等效电路则描述了天线的阻抗。即使算上 R_{att} ，总的串联电阻也不大，通常小于 10 Ω 。而如果我们直接从电容端馈入天线，其并联等效电路也可描述天线的阻抗。小串联损失电阻将转换为较大的并联电阻，通常为几千欧。

在两种等效电路中，要匹配至 50 Ω 都不容易。这就是环状天线通常采用搭接 (tapped) 的原因，以使其阻抗介于较大值及较小值之间。图 17 为示例电路：



17. 搭接环状天线的PCB 示例

串联馈入（于右下角）将产生较小的阻抗。并联馈入（直接连至电容）则将产生极大的阻抗。在此示例中，搭接提供了约为 50Ω 的阻抗。环路的电容被划分为两个串联的电容——C1 及 C2，从而有可能实现非 IEC 标准的电容值。R1 作为衰减电阻将降低电路的 Q 值，从而增加带宽，并随之降低对元件容差的需求。

但可惜的是，没有公式能轻易的描述此类搭接构造并给出适当的搭接定位点。从天线终端至搭接端的线路并不是传输线，不会影响天线的电磁场。因此，我们必须通过电磁仿真找出最优化的架构。而试错法(trial and error procedure)则常用于替代电磁仿真。例如，采用矢量网络分析仪，我们可以确定一个某一电容，以产生最小回波损失及最大的阻抗值，从而给出所需的带宽。

环状天线在构成环路的平面上给出了线性极化的电场矢量振荡。

与上述所讨论的天线截然不同，环状天线是磁天线，从而意味着此类天线不会受其反应近区内材料介电常数的影响。这就是环状天线通常用于手持或易受体温影响的设备的原因。

表 2 对所讨论天线的特性进行了比较。

Table 2. Features of Short Range Antennas

Antenna Type	Applications and Interest	Efficiency	Sensitivity to Detuning
Dipole	Large wire antenna; balanced feed	High	Moderate
Monopole	Large wire antenna; single-ended feed	High	Moderate
Loaded stub	Small wire and PCB antennas	Moderate	High
Transversal mode helical antenna	Small wire antennas	Moderate	High
Small loop	Body-worn antennas	Low	Low

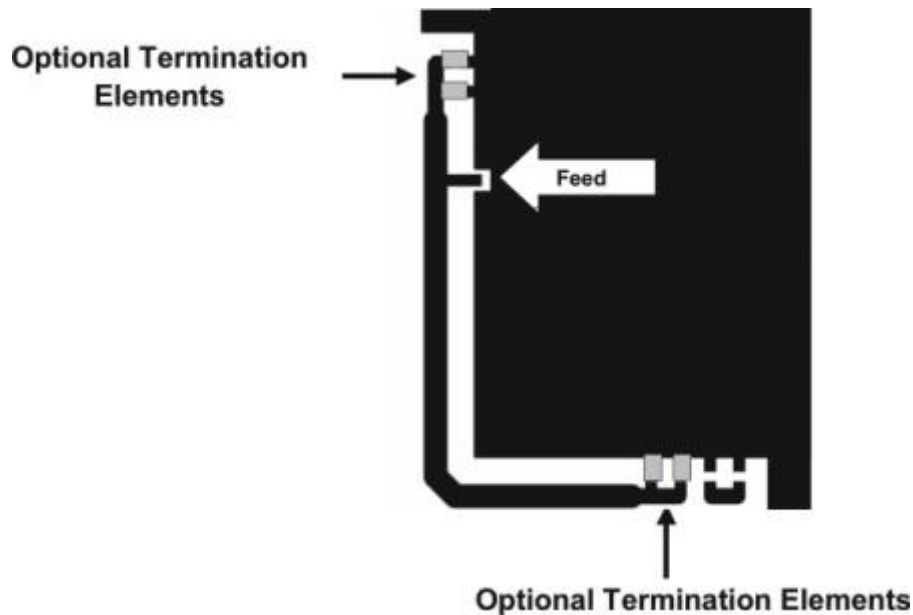
天线设计经验准则(Rules of Thumb)

我们可将上文所涉及的考虑因素归纳为以下的经验准则：

- 如果可用空间足够大，采用半波振子天线（对于差分馈入）或四分之一波长单极天线（对于单端馈入）以实现最优的效率。
- 尽可能的保持天线周围空间的空旷，以避免引入介电材料，例如电子元件、外壳或使用者的肢体。
- 某些情况下，介电材料无可避免的会出现在反应近区场内。此时，在实际应用条件下测量天线阻抗，并匹配至所需的特征阻抗。
- 由于空间的限制，四分之一波长单极天线的接地平面通常较小。此时，应在馈端周围配置尽可能大的接地平面，测量所得到的天线阻抗并匹配至所需的特征阻抗。虚接地(counterpoise)通过四分之一波长导体在天线的馈端附近连接至地，可实现较好的性能。虚接地应尽可能的垂直于单极型辐射体。
- 在使用预先生产天线时，需要注意的是其特性却决于所连接的地平面。仅当接地平面的尺寸及形状均与制造商的评估板一致时，方可达到制造商所标明的规格。在其它情况下，用户需要在实际应用条件下测定预先生产的天线的阻抗，并匹配至所需的特征阻抗。
- 小型环状天线对其反应近区场内的介电常数变化并不敏感。因而小型环状天线是不错的便携式及手持设备解决方案，但其效率却要比电子天线低了许多。仅当环状天线的周长小于波长的十分之一时，方可认为是纯粹的磁天线。较大的环路具有较高的增益，但同时也对周围环境的状况更为敏感。
- 尺寸因素：必须始终注意的是 Chu 及 Wheeler 所提出的限制——在给定天线尺寸时确定了产品的带宽及效率。超小型的天线总是在效率和容差敏感性上有一定的折衷。

TRF6901 参考设计中的天线

图 18 展示了 [TRF6901](#) 参考设计中所采用的天线构造。



18. TRF6901 参考设计中的 PCB 天线布线

从馈入端开始，两条不同长度的脚线并行连接至 PCB 板的地平面，并可以在后端通过 SMD（表明贴状设备）元件终接至地。取决于所采用的终端单元的不同，其布线可使用倒 F 型天线或搭接小型环路天线。

较短的脚线通常采用的 $0\ \Omega$ 电阻终接。若较长的脚线开路，可实现倒 F 型天线。而使用电阻及电容并联终接长脚线至地，则可实现类似于图 17 所示的搭接环状天线； $1\ \text{k}\Omega$ 及 $0.5\ \text{pF}$ 的元件可使环路谐振与 $915\ \text{MHz}$ 。

当采用环状天线设计时，我们必须考虑与波长相关的 PCB 板上的环路周长。天线的迹线宽度在参考设计中为 $1.5\ \text{mm}$ ，PCB 材料的厚度也为 $1.5\ \text{mm}$ 。由于其相似性，我们可根据 2.2 章节的内容计算出有效介电常数 $\epsilon_{\text{eff}} = 3.1$ 。则 PCB 板上 $915\ \text{MHz}$ 信号的波长为：

$$\frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}} = 186\ \text{mm}$$

参考设计中环路的周长为 $91\ \text{mm}$ ，近乎为半波长。因此天线的性质有别于纯粹的磁天线；天线还将在其反应近区场内激励起一定的电场。从而使得天线增益将大于图 17 中针对环状天线的预测值。

如图 18 所示，天线在 PCB 板的一角弯折，在 X 及 Y 的方向上都产生了辐射，使得辐射更具全方向性(omni directional)。

参考文献

[3]L.J.Chu, Physical limitations of Omni-Directional Antennas, *J. Appl. Phys.*, Vol19, Dec. 1948, pp. 1163 -1175

[4]H.A.Wheeler, Fundamental Limitations of Small Antennas, *Proc. IRE*, Vol. 35, Dec. 1947, pp. 1479 " 1484