

小型发射环天线

(磁环天线)

原作者：Steve Yates - AA5TB

原文：<http://www.aa5tb.com/loop.html> 翻译：探索者-377 E-mail：11804685@qq.com 暂无呼号

自从 20 世纪 80 年代以来，我一直在尝试 HF 频带中的小型（通常周长小于 $1/10$ 波长）发射环天线。我自己有了几个发现，但最终我看到这些天线出现在一个叫 JANE 的目录的军事装备出版物的附加通信中。我没有其他信息来源，所以我独自从照片中反向工程了这些天线。后来我学到了这些相当熟知的天线。ARRL(The national association for Amateur Radio Relay League 美国业余无线电联盟)天线手册的一些方程帮助我对这些天线做了一些设计，让我能够使它们按我希望的方式工作。这些日子，互联网是小环天线资讯的金矿。

我发现小发射环天线在全尺寸天线空间受限时非常有用。在制作过程中，仔细最小化电阻损耗，性能还是很可观的。这种天线的使用者，包括军方，即使在靠近地面安装时也报告了非常好的结果。我使用靠近地面安装的小发射环天线，靠在木栅栏上，和在室内使用，结果都相当可以接受。请注意，这个天线附近的场强非常强，所以不要计划使用比 QRP 更强的功率，除非让人远离天线。这种类型的天线不需要单独的返回功能，是对地独立的。然而，像所有的天线一样，离地面越高，或地面的质量越好，地面损失就越低。通常，当垂直安装时，甚至在接近地面安装时小发射环天线都表现很好，并且在方位模式中展示出有用的尖锐零点。当水平安装时，方位模式将是全向的，但具有类似于在相同高度的水平偶极子天线的高度模式，除了恒零顶点。

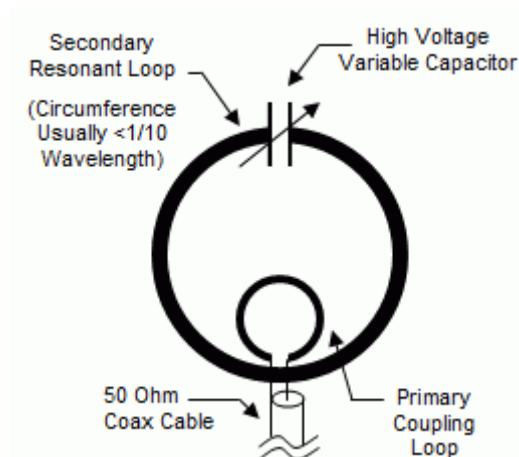
如果你对小环天线的性能持怀疑态度，请记住这里没有使用黑魔法。这些天线仍然必须遵守物理定律，就像任何其他小型天线一样。记住以下几点：

你可以拥有以下天线参数中的任意两个：

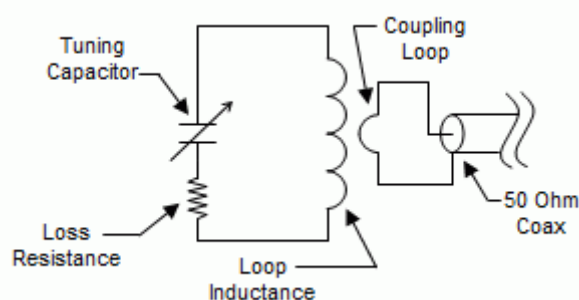
- 小尺寸（以波长计）
- 效率
- 带宽

你不能拥有全部三个。 换句话说，小发射环天线牺牲了用于小尺寸和效率的带宽。 它们越有效，它们可以操作的频率范围就越窄。 如果你已经制作了一个宽带宽的小天线，那么它不会有良好的效率。你很可能是做了一个假负载！ 如果看起来有了全部三个，那么你的馈线成了你天线系统的一部分，你没有真的有一个小型天线。

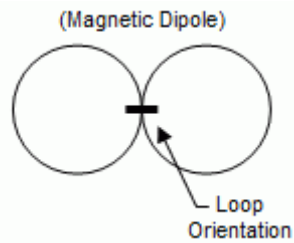
我已经制作了从 3.5 到 450 MHz 频率的小发射环天线。 一个真正高效的小环实际频率上限似乎约为 60 MHz。 我为更高频率制作的环天线显示出有用的零点和非常窄的带宽，但即使对于非常厚的导体，由于趋肤效应的损失，对于传输应用来说还是太高了。该页后面描述的 UHF 环天线非常小，并且尽可能高效，没有求助于镀银或超导结构，但是在 445MHz 仅有 10W 的情况下发射，它仍然变得很烫。工作在较高频率的环天线，仍可用于仅接收，例如无线电测向或做为前端带通滤波器使用。



小环天线图



等效电路



天线磁场模式

技术信息

小环天线表现为非常大的谐振电路。环本身可以看作是该电路的大的单匝电感器。由于该电感的大(相对来说)尺寸,辐射很容易发生。实验者已经注意到,这个电感器的匝数越多,其效率越低。对于一些低频环天线,可能需要若干匝数以获得谐振,但是辐射效率通常受到损害。基本上,辐射电阻随着环路尺寸增加而增加。辐射电阻越高,等效的恒定电阻损耗的效率就越高。增加回路中的匝数增加了电感,但也增加了损耗电阻。极端情况下,由于小的多匝线圈构成了一个电感,电路通常储能,根本不辐射。

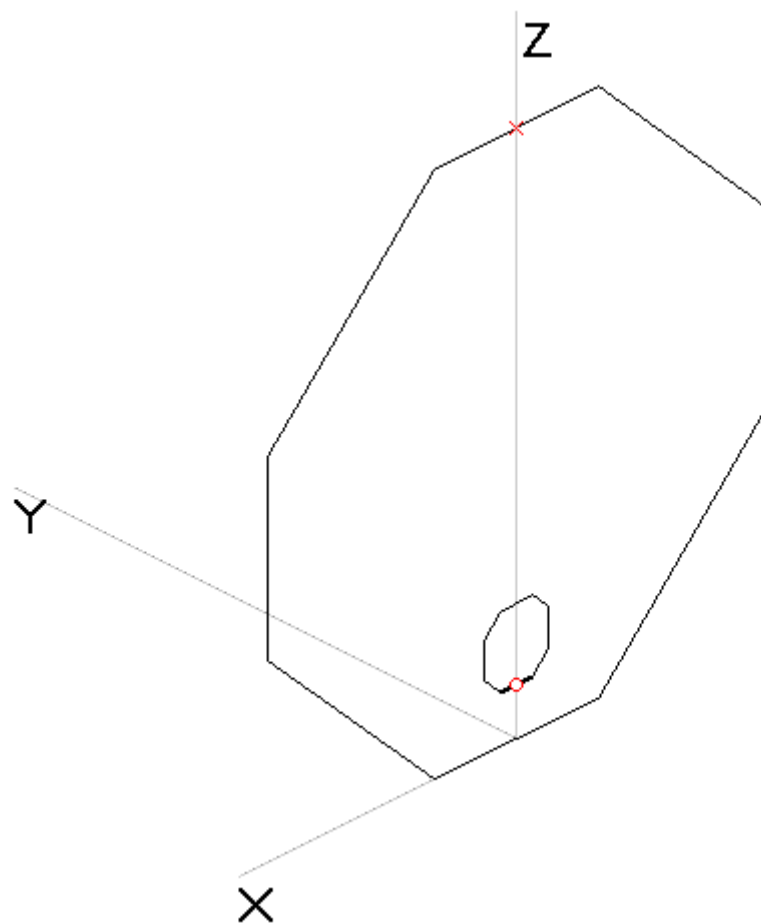
由于小发射环天线有非常低的阻抗,从 50 欧姆同轴电缆耦合到的能量可能相当让人困惑。我发现这可以通过变压器耦合(见上面的草图)通过一个小耦合环或通过自耦变压器耦合(类似于伽马匹配)通过对导体(如下文所述)进行抽头来实现。一些早期的设计(即,军用环, Patterson 环)使用了一个相当复杂的电容器馈电系统,我从来没有任何想要复制的欲望。使用小的耦合环,很容易稍微过头,可以相对于主环旋转(译注:旋转的目的是让它们不要位于同一个平面而不是在同一个平面内相对旋转)耦合环以获得完美匹配。使用小型导体制作环,使用具有小环形线圈的变压器耦合已经取得了很好的成功。

关于小环天线有很多误解。小环形天线通常被称为磁性天线。这是因为它们主要响应于电磁波的磁场分量并在极端近场($< 1/10$ 波长距离)中传输大的磁场分量。在远场(> 1 波长距离)中,来自小环的射频辐射与来自于由电场和磁场组成的任何其它天线的射频辐射相同。事实上,在约 $1/10$ 和 1 个波长之间的距离处,它对电场的响应更强!通常认为磁性天线将不会响应局部噪声,因为局部噪声主要由电场组成。这**仅在**如果干扰源在环

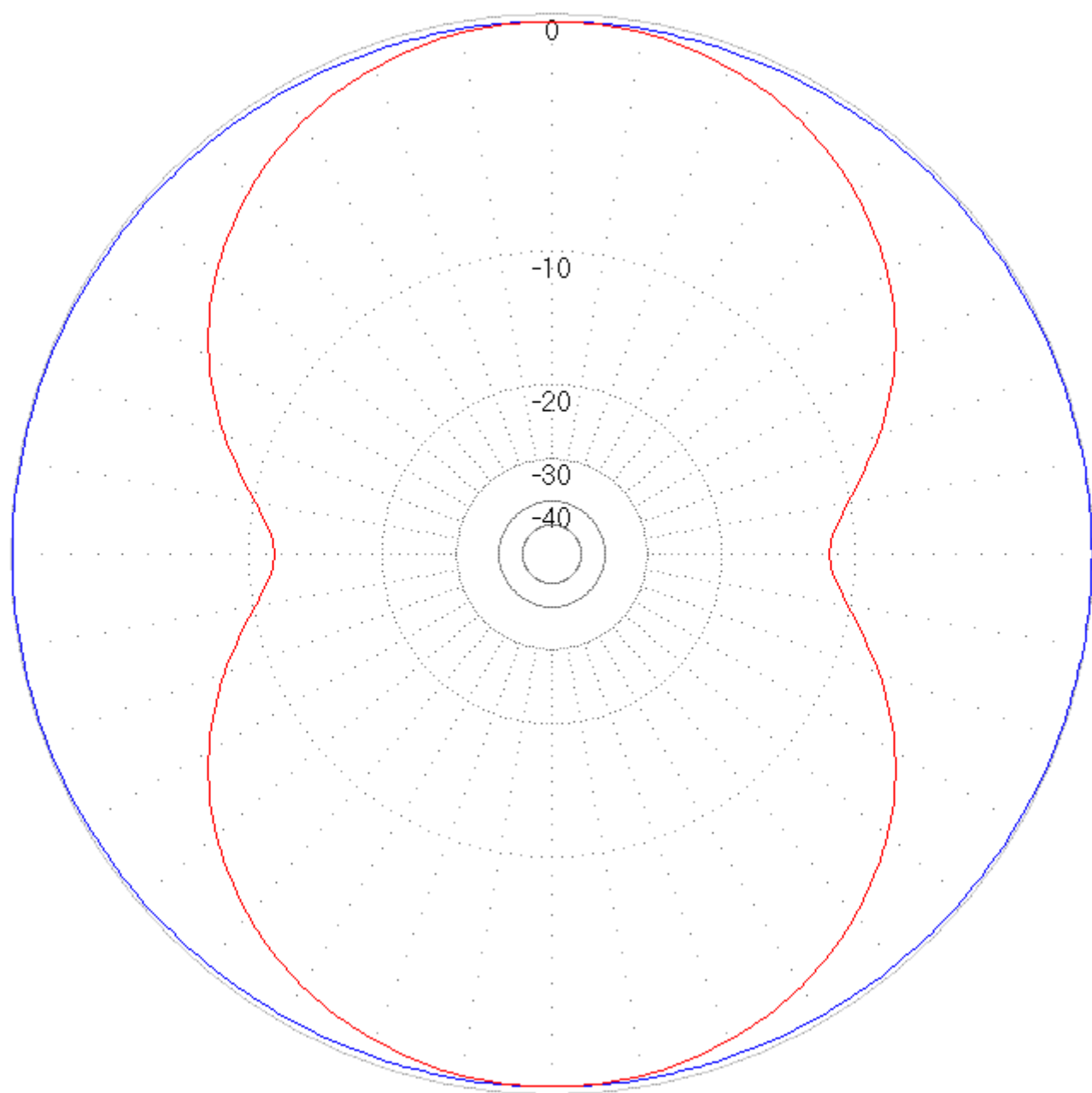
形天线的极端近场(无源场)中**并且**干扰源真的是电场源条件下成立。一个示例是，具有高阻抗的电力传输线，具有弧型绝缘体并紧邻天线。在这种情况下，小环可能不会对干扰做出响应，就像偶极子那样。如果干扰传输线路在几英里外，也不能说是一样的。这是因为你不能有时变电场，而不产生时变磁场，反之亦然。总之，这基本上是产生电磁波的原因。值得注意的是，由于小环辐射图中的两个尖锐零点，很容易消除局部干扰，同时仍然获得大的方位角覆盖区域。此外，除非环路包含良好平衡的电容(电场)屏蔽，其仍然可以响应于由电容耦合的非常接近的电场。在我的经验中，小环天线通常比较大的天线具有较高的信噪比。

该天线的极化方向大部分与环的物理取向对准，并且是由于环路导体内的高电流导致。由于高度集中的 E 场穿过电容，在看向环的平面的无效方向上出现较小量的交叉极化。在自由空间中，尽管与环对准的极化占主导地位，但是存在两个极化。当安装在接近地表并且方向垂直时，水平分量大多抵消且仅留下垂直极化作为有用分量。当水平方向时，主要极化分量是水平的，并且为了能有效操作，天线应该安装在至少 $1/2$ 波长高处以具有有效辐射模式。关于高度，水平环应当被视为与水平偶极子相同。垂直环在低高度下工作得很好。这一切都当然假设天线的尺寸足够小可以被认为是真正的小环。随着环变得更大，它开始从“磁偶极子”发散，并且模式和极化也改变。极端情况下，全波长环具有与小环非常不同的模式。

小环自由空间天线模式基础



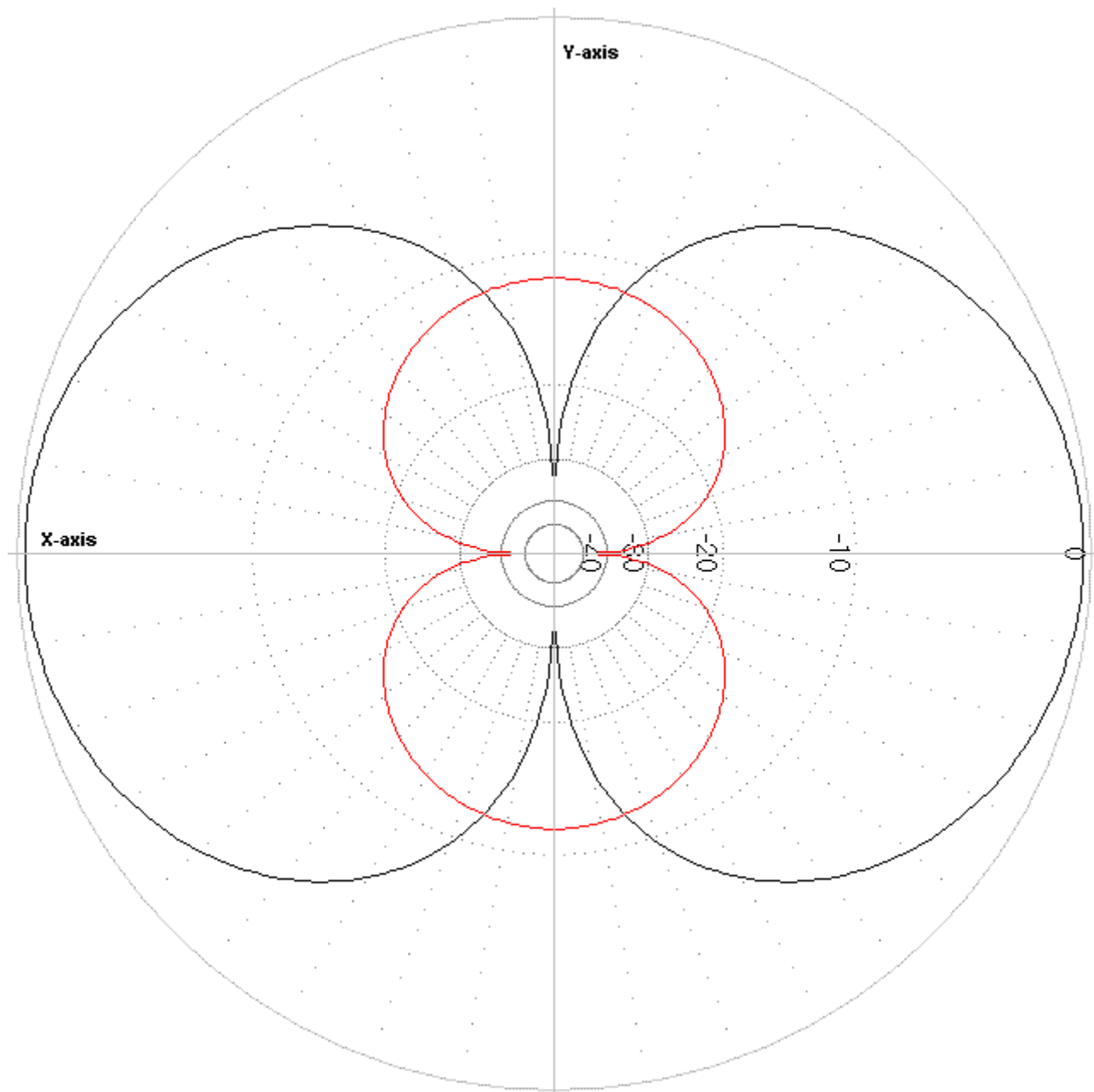
小环天线参考图



总模式（水平和垂直极化组合）

蓝色 - 沿 Y 轴查看

红色 - 沿 Z 轴查看



沿 Z 轴观察模式

黑色-垂直极化

红色-水平极化

我的观点是小环天线在非常低的高度(当垂直安装时)表现良好，因为在极端近场(小于 $1/10$ 波长)中，大多数环的场分量是磁场，并且普通地的磁损耗可以是小于具有大电场分量的大多数天线(即偶极子天线)经受的电介质损耗。例如，如果偶极子的任一端或两端接近地面，“位移电流”将行进到地面，从而引起通过地表返回的返回电流，否则其将有助于辐射。实际上，地面变成天线末端部分之间的串联电阻。利用小环，这些位移电

流非常集中的位于电容器极板之间的空间中，并且地扮演着小角色，除非电容器本身很接近地面。然而，在离天线较远的距离处，远场能量仍将受到与任何其它天线类似的地表损失影响，但通常没有太多人将天线放置在海边上的沙滩上。

已经有人声称，垂直小环不会受到像其他垂直天线安装在实际地面上时会具有的伪布儒斯特角(译注：偏振角)缺口效应的影响。我没有发现任何理论支持这一点，我的第一个想法是，在这方面，垂直小环应该像其他任何垂直天线一样。然而，用户的真实世界体验表明这种现象可能需要进一步调查。

通常缺乏将小发射环天线与某种标准天线进行比较的测量数据。我只找到了小部分最近的数据。比较 1.7m AMA 8 环和针对预测数据优化的 20 英尺(6.096m)船用鞭状天线。鞭状天线用自动调节器调节，并且铜板浸没在海水中充当地面。从 2 至 14MHz 收集数据。该环在性能上优于 20ft 自动调节的鞭状天线约 3 至 4dB。该环超过了鞭状天线在 8MHz 以上的所有频率下，优化的、预测可实现增益。数据通过地面波收集。该作者通过将天线与已知增益的谐振偶极子天线，在 100km 距离处的接收站进行比较来推断 Racal Mini-Loop Model MLA(1.53m x 2.1m)的 NVIS(Near Vertical Incidence Skywave 接近垂直入射天波)增益。我从显示的数据图中读取的最好的结果是，NVIS 增益在 2.6 MHz 时约为-8.7 dBi，在 5.9 MHz 时上升到 1.8 dBi。

垂直或水平安装小环的主要区别是极化方式和天线的零点方向。对于接近地面的水平环，电场损耗可能比想象中更大。我读过的一些文献表明，水平安装的小环比其他水平天线具有更低的离去角。我看到这个声明没有给出任何理由，除了由于小环天线的自由空间模式性质，总会有一个零点向上(宽边)，与具有主瓣向上的低偶极子相比，这将导致出现较低的辐射角。这可以被视为具有在天线主瓣轴(90 度)处缺口的低偶极子仰角模式(宽瓣片垂直向上)。然而，当以较低角度(例如 10 度)比较远场时，结果更具有可比性。下面，我将很快提供一些模式比较。

由于大多数近场分量是磁场，天线应该放置在离磁性物体(例如钢塔，铁框架等)至少 1/10 波长处。这些物体可能由于在其内部产生的涡流而产生损耗。普通住宅铜导线可能

是也可能不是损耗因子，这取决于布线，布线环路区域等产生的谐振。在一些情况下，耦合到外部线路可能实际上提高了小环天线的性能，尽管我没有测量数据证明这一点。然而，与我的其他室内天线对比，我在室内使用小环天线有非常好的运气。

小环方程（铜环）

（假定圆形，结果可能随其他形状而变化）

Radiation Resistance, Ohms: $RR = (3.38 \times 10^{-8})(fA)^2$
Loss Resistance, Ohms: $RL = (9.96 \times 10^{-4})(\sqrt{f})(S/d)$
Efficiency: $\eta = RR/(RR+RL)$
Inductance, Henrys: $L = (1.9 \times 10^{-8})S[7.353 \log_{10}(96S/\pi d) - 6.386]$
Inductive Reactance, Ohms: $XL = 2\pi f(L \times 10^6)$
Tuning Capacitor, Farads: $CT = 1/2\pi f(XL \times 10^6)$
Quality Factor: $Q = (f \times 10^6)/\Delta f = XL/2(RR + RL)$
Bandwidth, Hertz: $\Delta f = (f \times 10^6)/Q = [(f_1 - f_2) \times 10^6]$
Distributed Capacity: pF: $CD = 0.82S$
Capacitor Potential, Volts: $Vc = \sqrt{(PXLQ)}$
Capacitor Voltage Rating: 75,000V/in

where

f = operating frequency, MHz
A = area of loop, square feet
S = conductor length, feet
d = conductor diameter, inches
 η = decimal value; dB = $10 \log_{10} \eta$
P = transmitter power, Watts

制作小环天线

小环天线的结构是非常简单的。只需根据可使用的材料和所希望的性能选择所需的环直径。环直径越大，效率越高。如果小环周长大于 1/10 波长，其将不再被分类为小环，并且其辐射模式将改变。你可能不在乎这个。挑选一个你能找到的大线径导体，它最好是铜(或银)。这是为了保证低电阻损耗。导体不必是实心的。我曾经使用了一些 3/8 英寸 Heliax 同轴电缆做主环，结果很不错。Heliax 同轴电缆使用波纹铜管作为屏蔽层，一个常见的想法是使用厚的编织层将电容器连接到主环，如果你这样做要谨慎，我曾经使用编织层把主环连接到调谐电容，但编织层实际上变烫了！我的经验是，在高频射频电流下编织层的损耗实际上比实心线或管更高。我认为这种现象需要进一步研究。如果天线

在发烫，毫无疑问，损耗正在发生。

选择一个电容值，使环路谐振到所需的工作频率。电容器是制作这种类型天线最困难的部分。由于 Q 值非常高，大多数可用的电容器会在低至 10 瓦的功率下开始产生电弧放电。记住，即使只有几瓦的功率，电容器上可能有数千伏特，通过电容器的电流几安培(不一定是同相，没有自由功！)。传统电容器中的损耗可能很高，这是由于在它们的电刷触点和非焊接叶片中有几毫欧的电阻。为此，你应该尝试寻找或制作某种具有焊接叶片的分离定子电容器。该想法是不能有射频电流流过任何触点。除非使用低功率，否则板的间距必须很大。如果你使用 QRP 功率电平，你可以寻找一种单一定子/转子电容器来用。只不过要注意，这种类型的电容器损耗很可能会更大。我已经使用传统的广播接收电容制作了小环天线，他们能很好地为 QRP 所使用，虽然我知道他们的性能本来可以更好。一些人已经用铜管制造了“长号”式电容，用于获得性能上的低损耗或高功率。由于高 Q 值天线的调谐非常敏锐，强烈建议对调谐电容使用某种形式的衰减驱动(译注：比如使用带减速齿轮的步进电机进行自动调谐)。此外，如果在户外长时间使用，有必要保护电容免受水和昆虫损害。

为了将能量耦合到环中，可使用几种方法。到目前为止，最简单的方法是简单地构建一个耦合环路，如草图所示。在这个耦合环和主环之间不需要物理连接。如果你想将屏蔽的耦合环底部连接到主环底部，不会产生危害。对于电容特性屏蔽，可能需要构造屏蔽耦合回路。这假设在主回路和次回路之间仅发生磁耦合。我没有进行任何屏蔽和非屏蔽耦合环之间的比较，但他们都能工作，没有任何问题。RF 探针测量表明在这两种情况下馈线上都没有共模电流，天线模式在两种情况下都很好定义，因此平衡似乎不成问题。为了产生屏蔽的耦合环，简单地取走馈线同轴电缆的末端，并将其绕回自身以形成期望的环尺寸。在松开端再次接触同轴电缆的地方，将松开端的两个导体剥离并焊接到同轴电缆的屏蔽层。在这个同轴环的顶部，切开屏蔽层，并在同轴电缆周围产生一个小间隙。此时屏蔽层应完全分离。这种类型的屏蔽耦合环将使整个天线系统对电场无响应。如果小耦合环略微大于所需的，那么可以通过旋转大环内的小环来调节耦合。这使得调

节耦合的方法要非常精确。耦合到主环的另一种方法是通过自耦变压器式耦合。使用该方法，同轴电缆的屏蔽连接到主环的底部，并且同轴电缆的中心导体连接到距离屏蔽连接几英寸的主环。这个连接点将必须通过实验找到，并且不易于调整，但它会工作。这种方法类似于没有串联电容器的 Yagi-Uda 阵列的“伽马”风格匹配。还有电容法，使用电容分压器技术(Patterson Loop)耦合到主环路，需要几个高质量的电容器，这个我没有经验。你自己抓主意，无论你选择何种方法将馈线耦合到天线，耦合应针对在天线设计频率范围中心附近的谐振处，调节到最低 SWR。一旦调整了耦合，则在该范围内不需要对耦合再做进一步的调整。这是这种类型的天线的另一种美。

我已经阅读了一些讨论，关于天线需要极度平衡，以便具有深的零点和没有共模电流。我对上述所有馈电方法的经验表明，这并不像一些人认为的是个大问题。馈电点位于天线非常低的阻抗点位置，可能我只是比较好运，但是 RF 电流探针测量馈线的外表面和天线模式中平衡的很好的深度零点显示，天线平衡的相当不错。

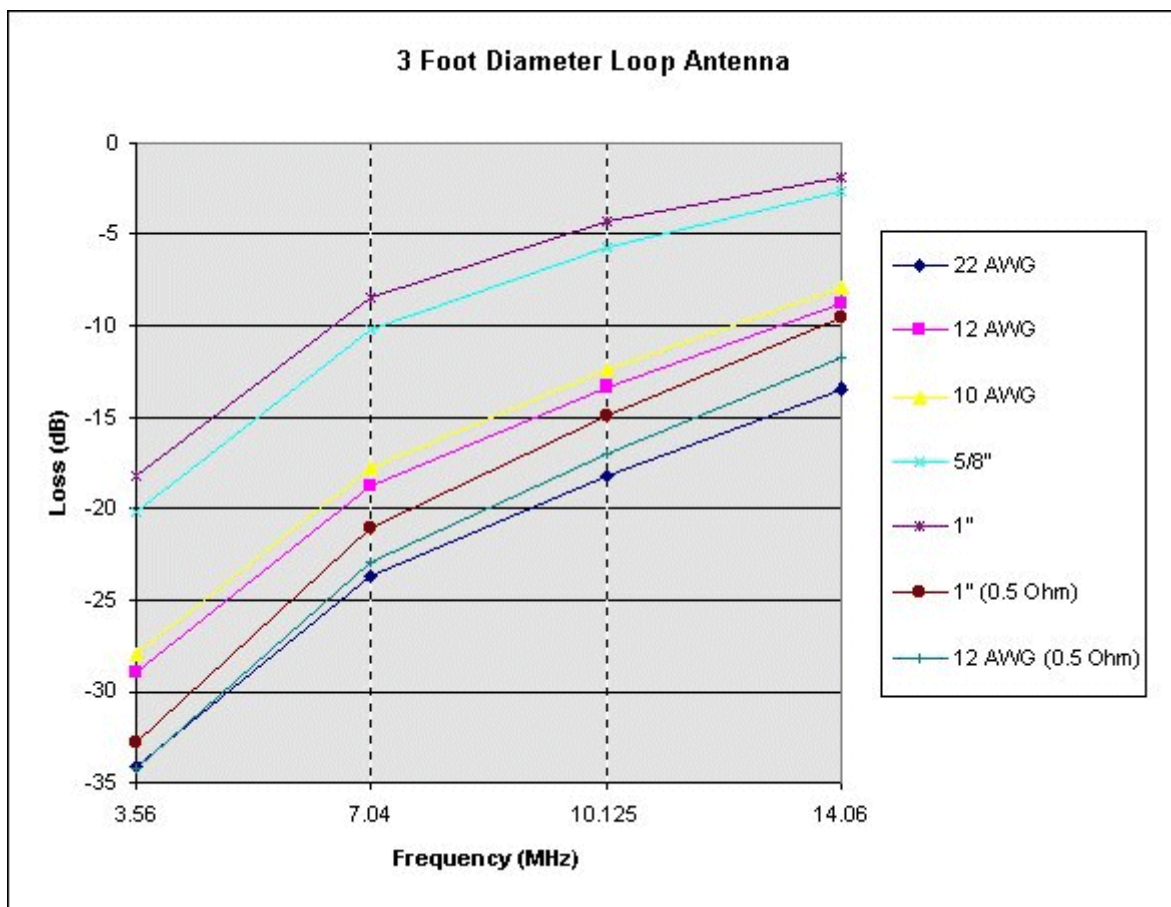
我希望你找到下面我写的程序，帮助我把这些天线设计的更有用。请注意，程序要求电阻损失以毫欧为单位，这仅仅是，如果你想估计额外的损耗，如来自不良连接的损耗。程序采用铜为导体，并且已经考虑了铜导体的电阻。还要注意，程序会通知你环的最大周长，这将给你所谓的小环性能。如果环的直径增加超过该值，效率将增加，但是模式将改变。这种情况的极端例子是，如果你要将大小增加到一个完整的波长。效率将非常高，并且模式(宽边模式)将与小环的模式相反。许多小环天线实验者推荐 0.25 波长的周长作为效率和有用模式之间的良好折衷。

计算

译注：请自行前往网站下载相关文件和程序，顺便浏览下作者制作的各种小环天线。页面结尾出有国外网友制作的各种小环天线的链接和作者列出的参考资料。

效率与电线尺寸对比

下面的表格是一个 3 英尺直径的环天线上的一些计算数据例子。



注意当添加 0.5 欧姆的附加电阻(图例中的最后两个)时的结果。注意在这种情况下，由 1 "导线形成的环路，但是增加的附加损耗比 AWG12 制造的环具有更多的品质损耗！这只是表明如果在给定设计中预期额外的电阻损耗(例如电容器与电刷)，可能没有太多的优势，更大的导体-小导体将导致工作的如此之差！额外的损耗电阻将导致细导线产生负面影响。有几个人已经有了不错的结果，也仅仅是这样。记住，所示的损耗是相对于完美天线的损耗，并且不考虑地面反射/模式增益，损耗等。即使在特定天波路径上使用计算的场强损耗，它还是可以比不同设计的天线更有效。换句话说，无论如何，试试呗。你可能会很喜欢结果！

译注：可随意转载使用。发现翻译错误、概念错误总之任何错误请看在辛苦翻译的份上，不要吝啬，通知译者，给他一个学习的机会。