

设计 MF RC500 的匹配电路和天线的应用指南

目录

1. 介绍	3
2. 系统的基本原理	3
2.1 结构示意图	3
2.2 系统配置	3
2.3 MIFARE® RF 接口	4
2.3.1 能量传输	4
2.3.2 RWD->卡的数据传输	5
2.3.3 卡->RWD 的数据传输	6
3. MF RC500 匹配电路和天线的设计	8
3.1 基本设计规则	8
3.2 估算最合适的天线大小	9
3.3 直接匹配的天线	10
3.3.1 EMC 电路	10
3.3.2 接收电路	10
3.3.3 直接匹配天线的天线匹配电路	11
3.4 50Ω 匹配的天线	14
3.4.1 EMC 电路	14
3.4.3 50Ω 的长距离解决方案	15
3.4.4 50Ω 的短距离解决方案	16
3.4.5 50Ω 天线的天线匹配电路	16
4. 环境的影响	19
4.1 金属的天线环境	19
4.2 多个天线	19
4.3 温度	19
5. 天线的屏蔽和补偿	19
5.1.1 电子屏蔽	19
5.1.2 补偿	21
5.1.3 铁屏蔽	21
6. MF RC500 天线设计的举例	23
6.1 总体布线提示	23
6.1.1 EMC 滤波器和接收电路	23
6.2 天线和匹配电路的布线	24
6.3 直接匹配天线的例子	24
6.3.1 屏蔽和补偿的矩形天线	24
6.3.2 矩形天线	25
6.3.3 屏蔽的矩形天线	26
6.4 50Ω 匹配天线的举例	27
6.4.1 补偿的矩形天线	27
6.4.2 补偿的环形天线	28

6.4.3 屏蔽的环形天线	29
7. 天线的调谐	30
7.1 最优工作距离的调谐方法	30
7.1.1 直接匹配天线的调谐	30
7.1.2 50 Ω 匹配天线的调谐	31
7.2 检查 Q 因子	36
8. 参考文献	38
9. 附录 A	38
9.1 缩写	38
9.2 天线线圈电感的计算	38
9.3 线圈电阻的估算	39

1. 介绍

本应用指南的意图是支持 MF RC500 MIFARE[®]读卡器内部与 RF 相关的设计。它的目的是提供设计应用指定的天线和匹配电路所使用的 MIFARE[®]RF 接口 (ISO14443A) 的一些必要的理解, 使读卡器与无线的 MIFARE[®]卡有最好的通讯性能。本文档将介绍系统 RF 部分的背景以及概述如何为标准应用设计和调整天线的过程。这里详细解释并列出了两种不同的天线和匹配电路的概念和设计, 而且有完整的调谐过程。有兴趣的读者可以从附录找到 RF 接口的详细理论描述。

2. 系统的基本原理

2.1 结构示意图

MF RC500 是基于 13.56MHz 无线通讯的一个新系列高度集成读卡器 IC 的成员。MF RC500 支持 IS14443 的所有层。图 2.1 是 MF RC500 简化的结构示意图。

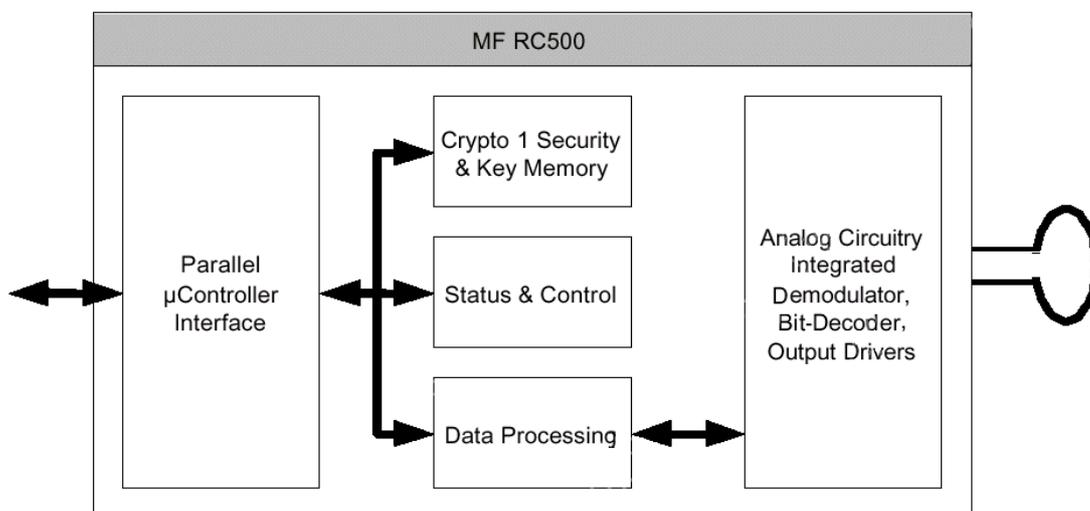


图 2.1 简化的 MF RC500 结构示意图

MF RC500 具有以下功能:

- μC 的并行接口自动检测连接的 8 位并行接口。
- 数据处理部分将并行的数据转换成串行。支持检查产生的帧、产生并检查 CRC/奇偶校验以及位编码和处理。它支持 ISO14443-A 的所有层, 使 MF RC500 在完全透明的模式下工作。
- 器件的状态和控制部分允许对环境影响进行配置, 使每个应用获得最好的性能。
- Crypto1 的流密码单元支持与 MIFARE[®] CLASSIC 产品通讯。
- 一个安全稳定的密钥存储器用于存储 Crypto1 密钥组。
- 模拟部分有两个内部的桥驱动输出, 使操作距离可达 100mm (取决于天线线圈和环境的影响)。而且, 内部接收部分允许接收和译码没经过外部滤波的数据。

2.2 系统配置

MIFARE[®]读卡器的系统配置基于图 2.2 所显示的 MF RC500。用户可以选择两个不同的概念将天线连接到读卡器 IC。这两种方法是:

- 50 Ω 匹配的天线, 或者
- 使用直接匹配的天线配置

这两种概念的系统元件大体上很相似, 都需要 3 个部分:

- 一个接收电路: 接收卡发送的数据。
- 一个滤波和电阻 (impedance) 转换电路, 抑制高次谐波并优化到读卡器天线的功率传输 (power

transmission)。

- 设计天线线圈的匹配电路和天线线圈使它们获得最优的性能。天线和读卡器用电缆或直接连接也要有最好的性能。

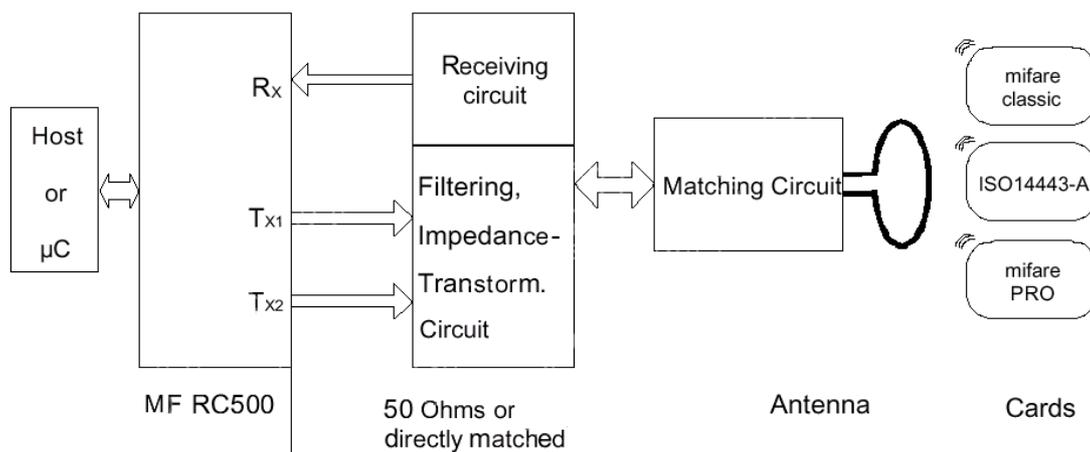


图 2.2 系统配置

这两个概念能满足不同的要求使性能最优。这些部件的设计是下一章的主题。

2.3 MIFARE® RF 接口

MIFARE® Technology 在读卡器和无线卡之间用 ISO 14443 类型 A 的 RF 接口通讯。

表 1 是 MIFARE® RF 接口的简短概述。基本上，MIFARE® RF 接口遵从变压器原理。MIFARE®卡是无源的，卡上没有电池。因此，读卡器模块和卡之间的通讯要求有能量的传输，而且可以双向发送数据。

表 1 MIFARE® RF 接口的概述

能量传输	变压器原理；MIFARE®卡是无源的。
工作频率	13.56MHz
通讯结构	半双工，读卡器首先发信号（talk）。
数据速率	105.9kHz
数据传输	双向
RWD->卡	100%ASK（幅变调制），Miller 编码
卡->RWD	副载负载波调制（subcarrier load modulation），副载波频率 847.5kHz，曼彻斯特编码

下面的内容是 MIFARE® RF 接口的基本知识，首先将讲述基本的能量传输，最后是数据传输和两个方向使用的数据编码。

2.3.1 能量传输

读卡器天线和无源 MIFARE®卡之间的能量传输使用变压器原理。它要求读卡器要有天线线圈，MIFARE®卡也有线圈。图 2.3 是基本的原理和等效的电路图。图的左边是天线和能量传输的原理。

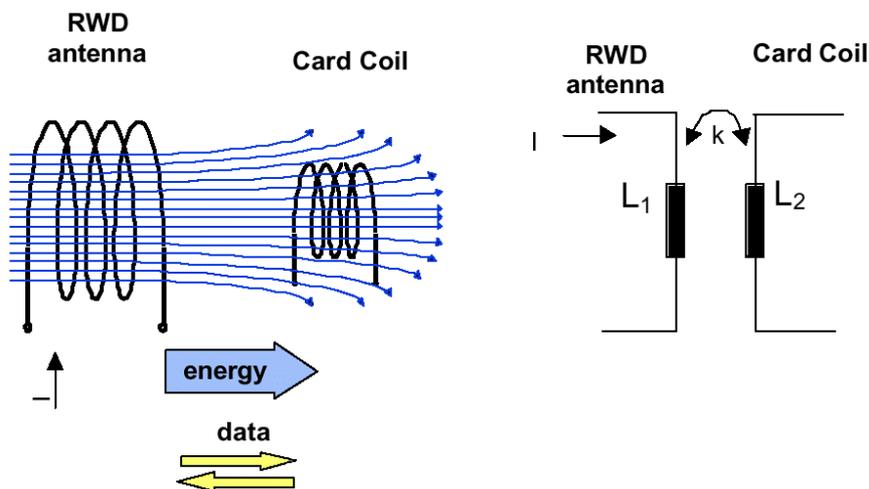


图 2.3 变压器模型

RWD 天线线圈的电流 I 产生一个磁通量。磁通量的部分穿过卡的线圈，在卡的线圈感应出一个电压。电压被整流，当工作电压到达后，卡的 IC 被激活。感应电压会随着读卡器天线和 MIFARE® 卡的距离不同而变化。由于电压会变化，工作距离受到传输的功率限制。上图的右半部分是变压器模式的等效电路。详细的能量传输将在本文档的附录 A 详细解释。

2.3.2 RWD->卡的数据传输

MIFARE® 用半双工的通讯形式在读卡器和卡之间传输数据。读卡器首先发出信号（说话）启动通讯。从读卡器到卡的数据传输根据 ISO 14443 类型 A 采用 100% 的 ASK (幅变调制) pulse-pause modulation。图 2.4 是典型的信号波形。

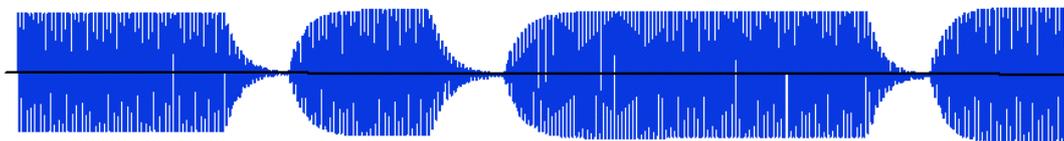


图 2.4 RWD->卡的数据传输，典型的信号波形

由于天线有品质因子 Q ，使发送的信号波形发生变形，如图 2.5。这个波形可以用于测量天线的调谐 (tuning)。计算天线品质因子 Q 的理论背景和计算匹配电路部件的过程将在第三章详细解释。

前面已经提到，MIFARE® 卡是无源的。能量传输到卡后，卡才能和读卡器通讯。因此，MIFARE® 用优化的编码提供与发送到卡的数据独立的恒定能量。这就是改良的 Miller 编码，它用于读卡器向卡发送数据。

图 2.6 详细介绍了 Miller 编码。

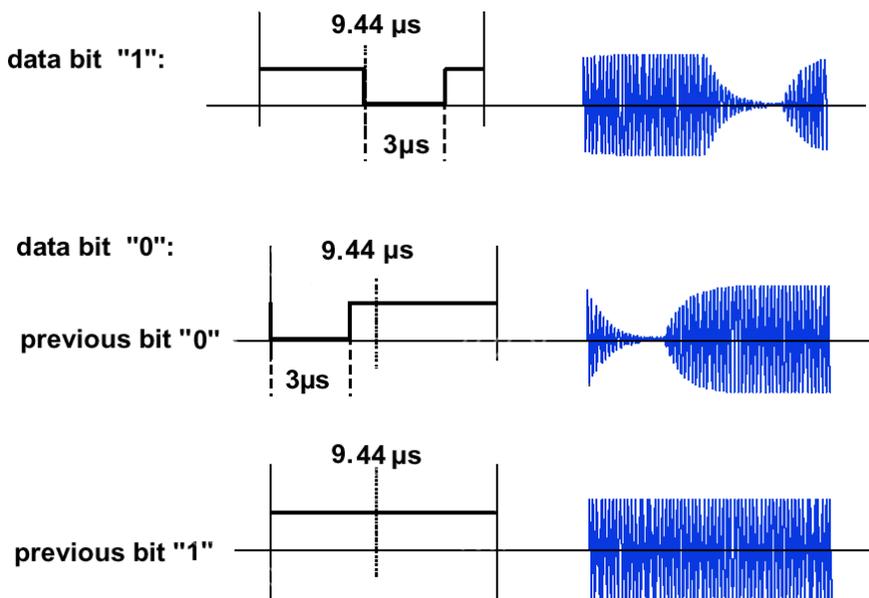


图 2.6 RWD->卡的数据传输, Miller 编码

MIFARE®的数据速率是 105.9kHz, 所以一个位帧 (bit frame) 的长度是 9.44μs。Miller 编码的脉冲长度是 3μs。

逻辑“1”用一个位帧中间的脉冲表示。

编码逻辑“0”有两个可能性, 由前面一位决定:

如果前面一位是“0”, 接着的“0”用在后一个位帧的开始有 3μs 的脉冲表示。

如果前面一位是“1”, 接着的“0”用下一个位帧没有脉冲来表示。

2.3.3 卡->RWD 的数据传输

2.3.3.1 副载波负载调制的原理

卡发送回 RWD 的数据传输使用副载波负载调制 (subcarrier load modulation) 的原理, 见图 2.7。此时, 卡作为谐振电路消耗读卡器产生的能量。这个能量消耗有重新激活的效应, 使 RWD 端出现电压降。这个效应通过改变卡的 IC 的负载或电阻, 将数据从卡发送回读卡器。

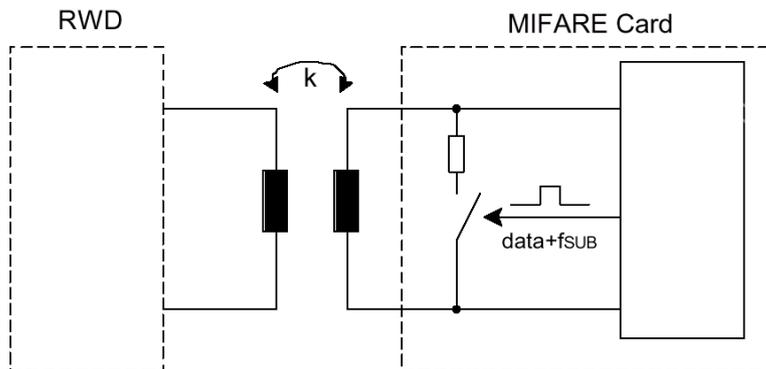


图 2.7 副载波负载调制 (subcarrier load modulation) 的原理

MIFARE®读卡器的天线应调谐到振荡频率 $f_R=13.56\text{MHz}$ 。实际上, 振荡器电路在读卡器天线产生的电压多次比电源电压高。但由于 RWD 和卡的天线之间有小的耦合因子, 卡的响应比读卡器产生的电压弱了大约 60dB。检测这个信号要求一个设计良好的接收电路。MIFARE®用副载波频率 f_{SUB} 来调制数据, 而不

是用直接的负载调制。副载波调制的结果是在载波频率 13.56MHz 的周围产生 $\pm f_{SUB}$ 的边频带。副载波负载调制可以简单并健壮地测试接收信号。

MIFARE® RF 接口在副载波调制之前对基频的数据使用曼彻斯特编码。图 2.8 是典型的数据编码和副载波负载调制的时域图。首先，数据被内部编码成曼彻斯特码。MIFARE®通讯的数据速率无论从卡到读卡器还是读卡器到卡都是 105.9kHz，所以位帧的长度是 9.44 μ s。曼彻斯特码用上升和下降沿来编码数据。

逻辑“1”用位帧中间的下降沿表示。

逻辑“0”用位帧中间的上升沿表示。

MIFARE®卡的集成电路产生的副载波频率 $f_{SUB} = f_R/16 = 847.5\text{kHz}$ 。时间 T_0 表示工作频率的脉冲宽度， $T_0 = 1/f_R = 74\text{ns}$ 。曼彻斯特编码的数据调制到副载波频率。最后，副载波负载调制完成。

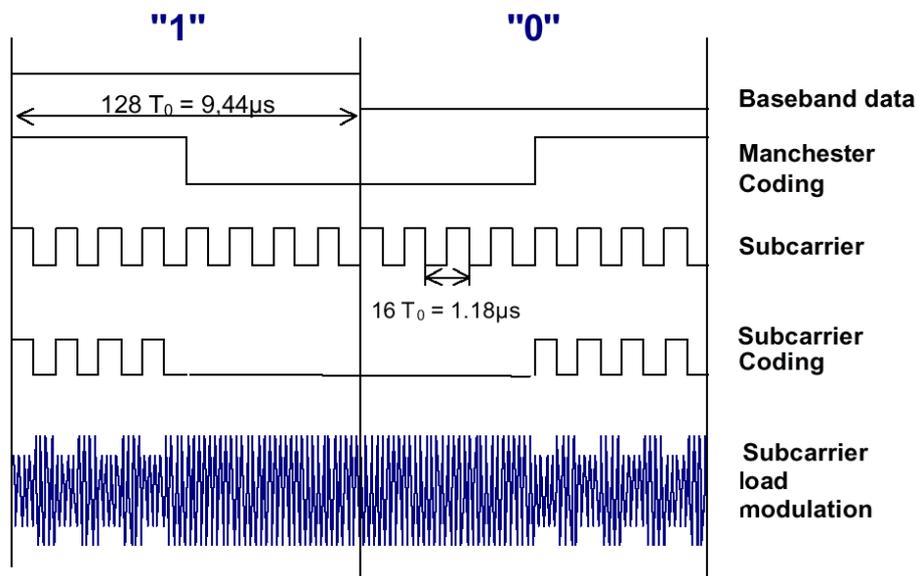


图 2.8 卡->RWD 的数据编码原理，时域

结果，副载波负载调制在频域产生两个边频带；高频的是在 14.41MHz，低频的是在 12.71MHz。信号的频域图请参考图 2.9。图 2.9 一方面显示了数据编码的边频带，另一方面显示了载波频率到工作频率的边频带。

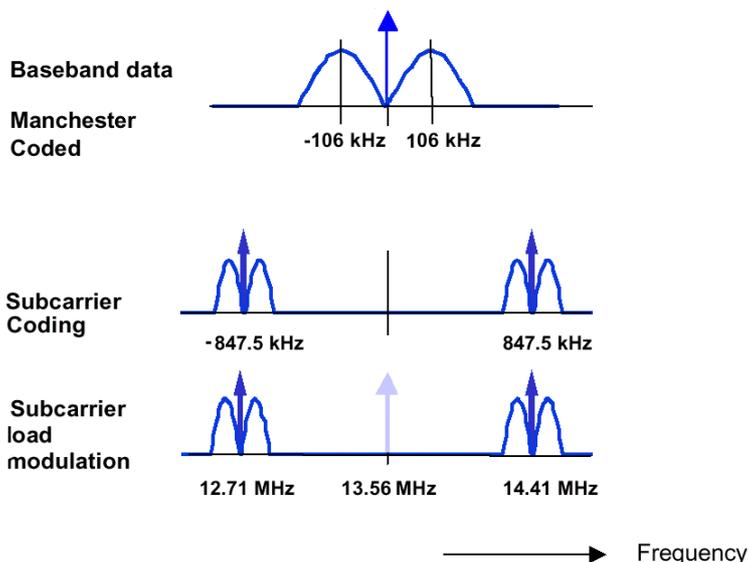


图 2.9 卡->RWD 的数据编码，频域

3. MF RC500 匹配电路和天线的设计

3.1 基本设计规则

MF RC500 是一个单独的读卡器集成电路。它要求在没有外部放大器的情况下工作距离达到 100mm。剩下的无源 RF 部分的设计很简单明了。首先要确定哪个可行的基本概念最能符合应用的要求。图 3.1 的设计帮助会对这个决定作出支持。两个不同的概念可以设计一个天线和一个匹配电路。

- 直接匹配的天线：用读卡器和天线的最小距离可以建立一个小型的完整终端。可行的应用是一个小型建筑物的访问控制读卡器或者是手持的读卡器。
- 500 Ω 匹配的天线：可以作为读卡器和天线之间用长距离同轴电缆连接的应用的一个简单的解决方案。连接读卡器匹配电路和天线的同轴电缆最长距离可达 10m。

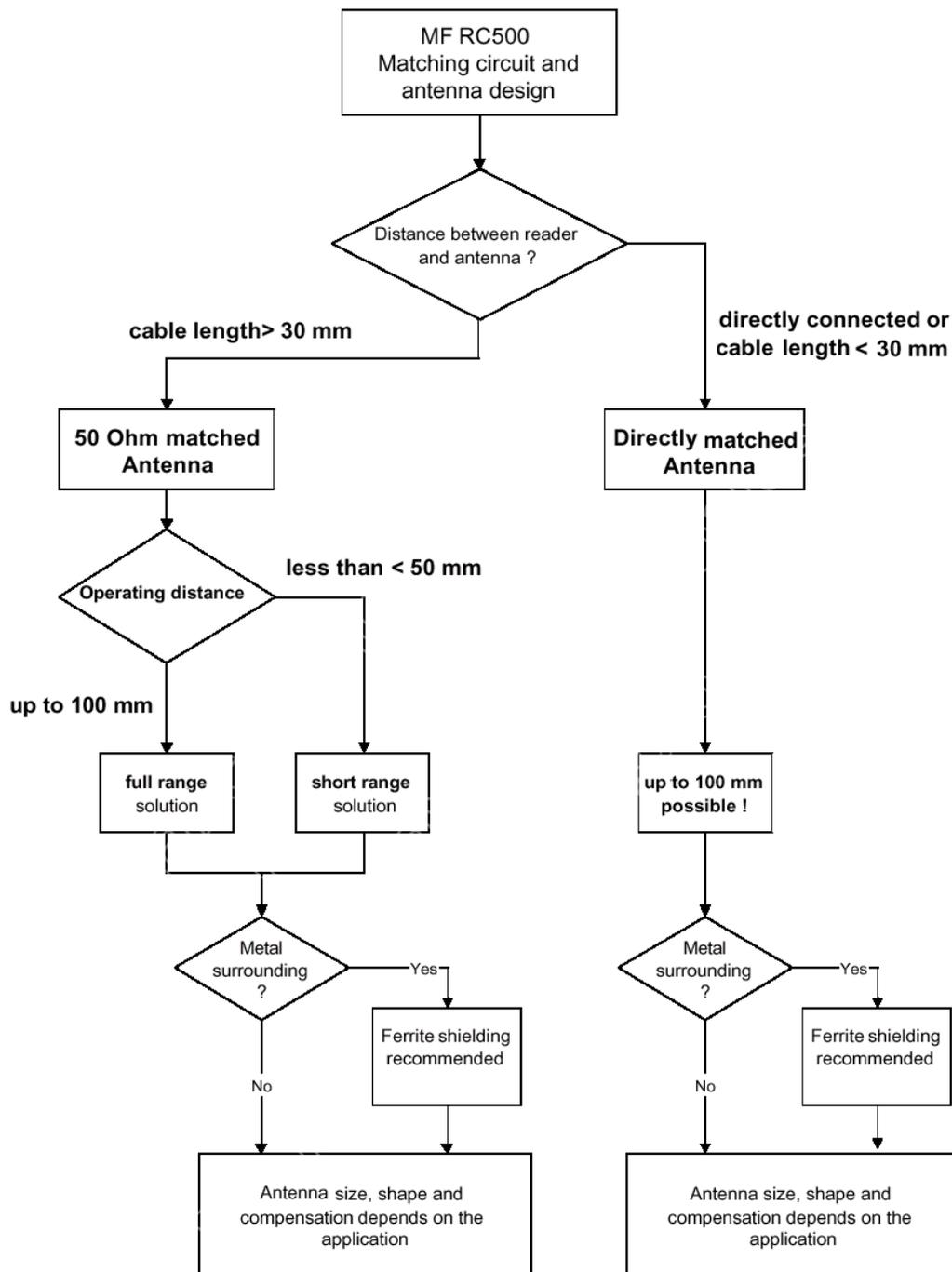


图 3.1 设计帮助

注意：这个设计帮助是第一步。要获得期望的工作距离，天线的设计和环境的因素都要考虑到。

表 2 比较了上不同的概念并详细地显示了它们分别需要的元件，但主要讨论 50Ω 匹配或直接匹配的天线概念。对于 50Ω 匹配的概念，提供了一个工作距离高达 100mm 的高端解决方案和一个工作距离低于 50mm 的低成本解决方案。

表 2 天线概念的比较

概念		50Ω 匹配		直接匹配
		长距离	短距离	
读卡器	MF RC500			
	EMC 电路	电路和值都相同		
	接收电路	电路和值都相同		
	阻抗变换	用 TX1 和 TX2	只用 TX1	---
天线	电缆	50Ω 同轴电缆		短线或直接连接
	天线匹配电路	电路相同，但天线的大小不同值也不同		电路相同，但天线的大小不同值也不同
	天线线圈	工作距离由天线的大小和环境的影响决定		工作距离由天线的大小和环境的影响决定
	天线的屏蔽	由应用决定，例如外壳和环境的影响		

建议使用上面显示的概念。下一部分按照电路要求的设计根据天线的形状估算可以获得的工作距离。

3.2 估算最合适的天线大小

MIFARE®系统的工作距离由下面几个因素决定：

- 读卡器的天线大小
- 给定天线的匹配电路品质
- 环境的影响

下一个设计步骤是由天线的大小估计工作距离。完整的计算可以在附录 A 中找到。

MIFARE®卡由读卡器产生的磁通供电。卡集成电路可以获得的能量随读卡器天线和卡之间的距离不同而变化。在 2.3 节已经提到，MIFARE®系统使用变压器原理。描述变压器的一个重要的参数是耦合系数 k 。它可被定义为与读卡器线圈和卡线圈之间的距离以及与读卡器天线和卡线圈的大小有关的一个几何参数。假设标准应用中，MIFARE®卡有卡芯片的尺寸，卡的线圈的尺寸是固定的。

附录 A 显示了，当读卡器天线和卡线圈的固定距离等于读卡器天线的半径时获得的最大耦合系数 k 。计算使用的是环形的天线。如果实际使用的是矩形或方形的天线，可以用有相等面积的环形天线来估算。这个结果可以作为对给定应用设计最适合的天线的经验方法。

特别注意：

- 估计读卡器的天线半径应当等于可获得的工作距离只是成功设计天线的第一步。对于一个完整的设计，环境的影响以及由于应用相关的约束对天线大小的限制也要考虑到。
- 估算的结果显示，增加天线的半径不会自动增加工作距离。从读卡器到卡的能量传输是一个限制因素，它可以用最小的耦合系数 0.3 表示。
- 耦合系数的计算公式与读卡器天线的所绕的圈数无关。

图 3.2 给出了不同天线大小的 R/W 大约距离。数据显示当天线的直径大约是 20cm (即 $R=10\text{cm}$) 时，可以获得最好的 R/W 距离。更大的天线不能使工作距离更大。

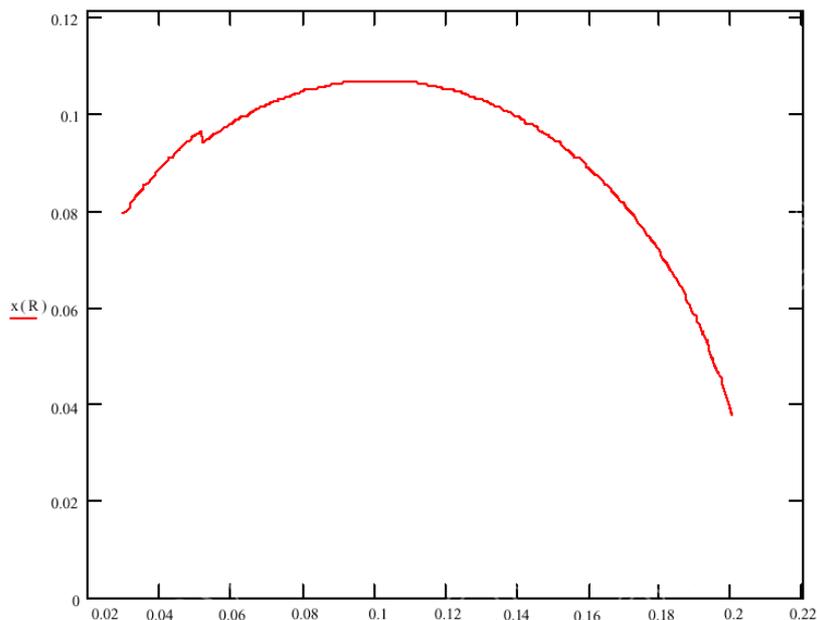


图 3.2 天线半径与工作距离之比

3.3 直接匹配的天线

表 2 的其中一个提议是使用直接匹配的天线。推荐电路的工作距离可达 100mm。工作距离主要由天线的大小以及天线匹配电路的修正值决定。需要的部件有：EMC 滤波器、接收电路和天线本身的匹配等，这些部件以及它们对 MIFARE®系统正确工作的必要性将在后面解释。图 3.3 是推荐使用的直接匹配天线电路。

3.3.1 EMC 电路

MIFARE®系统的工作频率是 13.56MHz。这个频率要用一个石英振荡器发生，但它同时也产生高次谐波。为了符合国际 EMC 规定，13.56MHz 中的三次、五次和高次谐波要被良好地抑制。除了多层设计外，我们强烈建议使用如图 3.3 所示的低通滤波器。低通滤波器由元件 L_0 和 C_0 组成。它们的值请看表 3。

3.3.2 接收电路

MF RC500 的内部接收部分使用了一个新的接收概念。它使用卡响应的副载波负载调制所产生的两个边频带。我们建议使用内部产生的 V_{MID} 电势作为 Rx 管脚的输入电势。为了减少干扰，在 V_{MID} 管脚连接一个电容到地。读卡器的接收部分需要在 Rx 和 V_{MID} 引脚之间连接一个分压器。另外，建议在天线线圈和反压器之间串连一个电容。图 3.3 就是推荐使用的接收电路。它由 R_1 、 R_2 、 C_3 和 C_4 组成。它们的值见表 3。

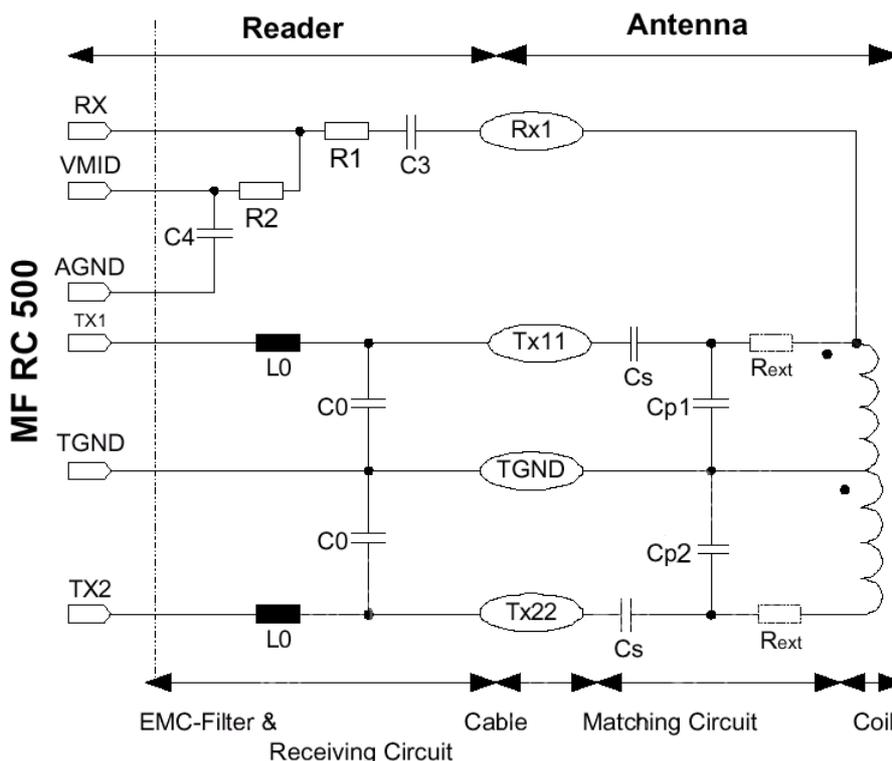


图 3.3 完整的直接匹配天线配置

滤波和接收部分的元件 L_0 、 C_0 、 R_1 、 R_2 、 C_3 和 C_4 的值是固定的。

表 3 EMC 滤波和接收电路的值

元件	值	注释
L_0	$2.2\mu\text{H} \pm 10\%$	屏蔽的磁场，例如：TDK ACL3225S-T
C_0	$47\text{pF} \pm 2\%$	Np0 材料
R_1	$820\ \Omega \pm 5\%$	
R_2	$2.7\text{k}\ \Omega \pm 5\%$	
C_3	$15\text{pF} \pm 2\%$	NP0 材料
C_4	$100\text{nF} \pm 2\%$	NP0 材料

注意：要获得最好的功能，所使用的电容和电感至少要具备推荐的这些元件的性能和容差。

3.3.3 直接匹配天线的天线匹配电路

我们建议逐步地设计直接匹配的天线。首先要设计天线线圈。天线本身是一个低电阻的器件。将天线线圈连接到 MF RC500 需要一个匹配电路。估算天线的等效电路和计算品质因子可以得出匹配电路的电容推荐值。

3.3.3.1 确定天线的等效电路

读卡器的天线线圈可以用图 3.4 左边的等效电路表示。建议设计的直接匹配天线的天线线圈应当有一个接地的中心抽头。这个中心抽头是用于改善天线线圈的 EMC 性能。线圈本身可以用电感 L_a 和 L_b 表示，电阻 R_a 和 R_b 表示电阻损耗，并联的 C_a 和 C_b 表示电容损耗。由于 L_a 和 L_b 之间有耦合作用，所以我们不推荐计算这个等效电路的元件。

我们建议用图 3.4 右边的模型来代替完整的模型。连接器 Tx11 和 Tx12 之间的整个天线线圈可以用 L_{ant} 来表示，所有电阻损耗可以用 R_{ant} 来表示。线圈电容 C_{ant} 表示线圈和连接器之间的电容损耗。

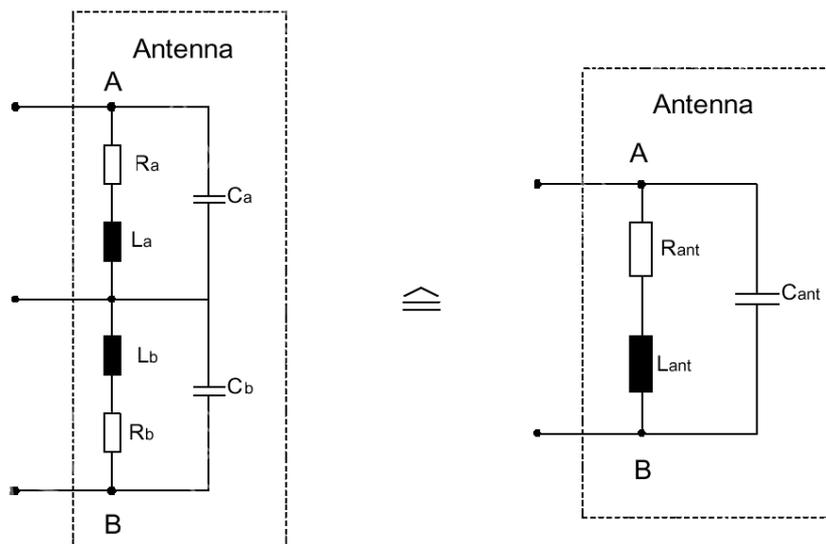


图 3.4 直接匹配天线的天线线圈匹配电路

我们建议用阻抗分析仪测量天线的等效电路。连接天线线圈（当使用屏蔽天线时要将屏蔽连接到地）并测量显示的等效电路。在计算品质因子和天线的调谐时线圈的电容 C_{ant} 可以忽略。

注意：如果没有阻抗分析仪，将计算的电感和电容值作为起始值。估算这些值的公式请查看附录 A。MIFARE®的工作频率是 13.56MHz。这个频率下，电阻的集肤效应（skin effect）损耗不能忽略，这就是线圈不能只使用 DC 阻抗的原因。

请用附录 A 的估算找到电阻 R_{ant} 的起始值。我们建议以后用测量品质因子的方法来检查整个设计。如果有必要，起始值要被改变，整个调谐过程也要重新再做一次。

3.3.3.2 品质因子

接下来的部分中，假设天线电感 L_{ANT} 和电阻 R_{ANT} 的值已知。我们建议用阻抗分析仪测量 L_{ANT} 和 R_{ANT} 。如果是用公式估算出的值，要记住它们只是起始值，在确认 Q 因子后可能需要改变。

天线的品质因子是纠正天线调谐和所获得的性能的一个重要特性。天线的品质因子由下面的公式定义：

$$Q = \frac{\omega_R \cdot L_{ANT}}{R_{ANT}}, \text{ 其中 } \omega_R = 2\pi f_R$$

根据天线的几何形状，Q 的值通常在 50~100 之间。要进行正确的数据传输这个值还要减少。在 2.3.2 章提到 MIFARE®的波特率是 105.9kHz/sec。数据从 RWD 传输到卡使用脉宽 $T=3\mu s$ 的 Miller 编码。

用带宽 B 的定义：

$$B = \frac{f_R}{Q}$$

以及时间与带宽的乘积的规定：

$$B \cdot T \geq 1$$

可以算出要求的 Q 因子是：

$$Q \leq f_R \cdot T \leq 13.56\text{MHz} \cdot 3\mu s \leq 40.68$$

由于元件的容差和对温度的依靠，我们建议 Q 因子的值取 35。

要降低原始的 Q 因子，要求如图 3.5 所示增加一个外部电阻 R_{EXT} 。 R_{EXT} 的值用下面的公式算出：

$$R_{EXT} = \frac{\omega_R \cdot L_{ANT}}{Q} - R_{ANT} = \frac{\omega_R \cdot L_{ANT}}{35} - R_{ANT}$$

在前面已经提到，我们推荐在设计直接匹配天线的天线线圈时使用中心抽头。这样，外部电阻就被分

成两个相等的部分。减少天线品质因子的完整电路请看图 3.5。

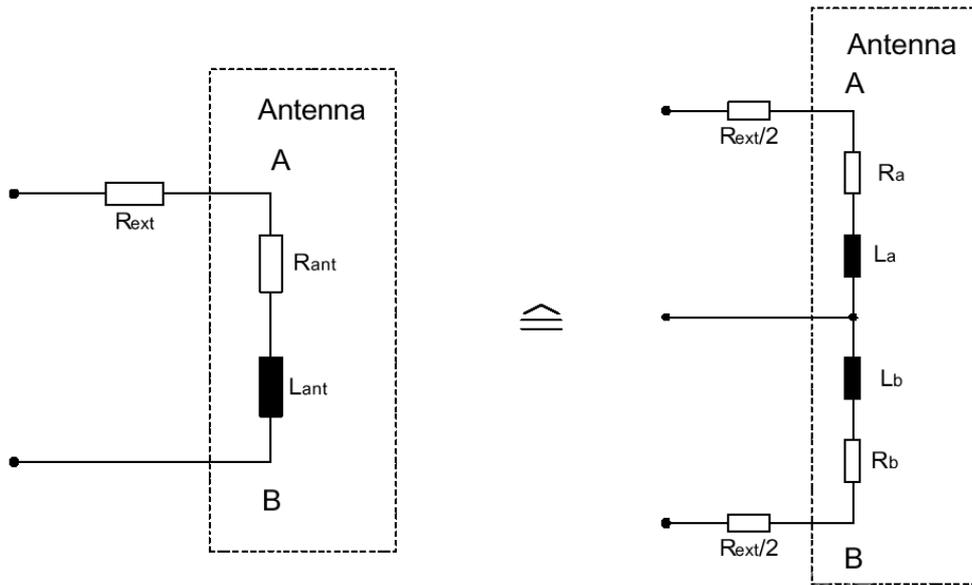


图 3.5 用外部电阻减少天线的品质因子

3.3.3.3 直接匹配天线的阻抗匹配

在设计直接匹配天线的匹配电路时，我们建议使用图 3.6 的电路。电容 C_s 和 C_p 的值由天线本身和环境影响来决定。

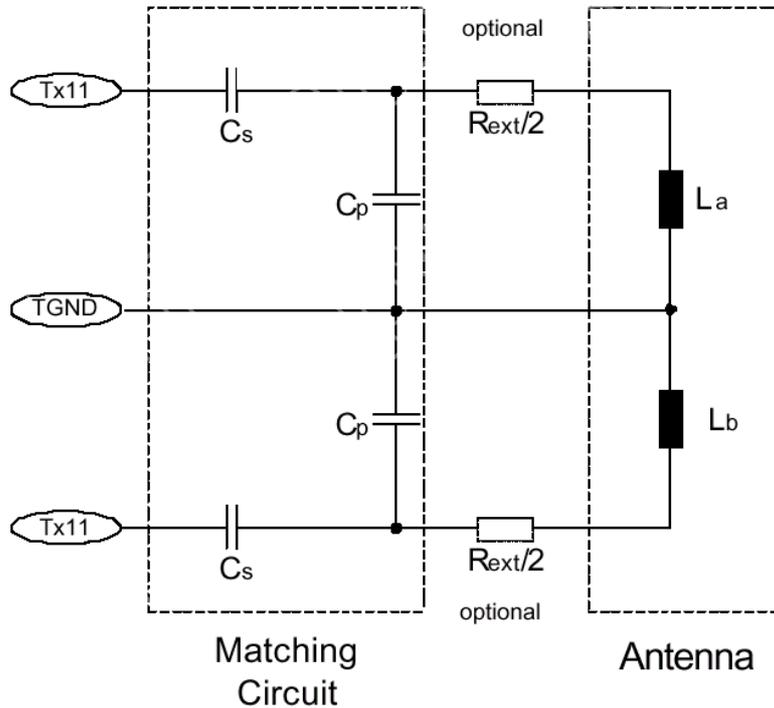


图 3.6 完整的匹配电路

我们建议使用表 4 的电容值作为调谐过程的起始值。将直接匹配的天线调谐到最优的过程将在第 7 章解释。起始值由天线的电感决定。

表 4 天线匹配电路的起始值

L _{ANT} [μH]	C _s [pF]	C _{P1} [pF]	C _{P2} [pF]
0.8	27	270	330
0.9	27	270	270
1.0	27	220	270
1.1	27	180 22	220
1.2	27	180	180 22
1.3	27	180	180
1.4	27	150	150
1.5	27	150	150
1.6	27	120 10	150
1.7	27	120	150
1.8	27	120	120

上表假设天线线圈的寄生（杂散）电容是 15pF。C_s 和 C_p 应该是有 +/- 2% 容差的 NP0 电介质。天线电感和电容的实际值由不同的参数决定。

- 天线结构（PCB 的类型）
- 导体的厚度
- 线圈之间的距离
- 屏蔽层
- 附近环境的金属和铁

由于有这些影响，C_p 的值要在实际的设计中优化。正确的过程请参看 7.1.1 节。

3.4 50Ω 匹配的天线

表 2 提出了两个概念来设计一个 50Ω 的天线。在这两个概念中，EMC 电路和接收电路是独立的。本小节首先讲述前面这些部分，接着是长距离和短距离的阻抗转换电路。最后是设计 50Ω 匹配天线的匹配电路的建议。

3.4.1 EMC 电路

MIFARE® 系统的工作频率是 13.56MHz。这个频率要用石英振荡器产生，但同时也会产生高次谐波。为了符合国际 EMC 规定，13.56MHz 中的三次、五次和高次谐波要被良好地抑制。除了多层设计外，我们强烈建议使用如图 3.7 所示的低通滤波器。低通滤波器由元件 L₀ 和 C₀ 组成。它们的值请看表 5。

3.4.2 接收电路

MF RC500 的内部接收部分使用了一个新的接收概念。它使用卡响应的副载波负载调制所产生的两个边频带。推荐使用内部产生的 V_{MID} 电势作为 R_x 管脚的输入电势。为了减少干扰，在 V_{MID} 管脚连接一个电容到地。读卡器的接收部分需要在 R_x 和 V_{MID} 引脚之间连接一个分压器。另外，建议在天线线圈和分压器之间串连一个电容。图 3.7 就是推荐使用的接收电路。它由 R₁、R₂、C₃ 和 C₄ 组成。它们的值都在表 5。

表 5 EMC 滤波和接收电路的值

元件	值	注释
L ₀	1.0μH ± 10%	屏蔽的磁场，例如：TDK ACL3225S-T
C ₀	47pF ± 2%	NP0 材料
R ₁	820Ω ± 5%	
R ₂	2.7kΩ ± 5%	

C ₃	15pF ±2%	NP0 材料
C ₄	100nF ±2%	NP0 材料

注意：要获得最好的功能，所使用的电容和电感至少要具备推荐的这些元件的性能和容差。

3.4.3 50Ω的长距离解决方案

要连接 50Ω 的同轴电缆，MF RC500 需要一个阻抗转换电路。这个阻抗转换电路要满足 3 个要求：

- 执行 EMC 滤波
- MF RC500 的低输出阻抗和 50Ω 之间的阻抗转换
- MF RC500 有对称的输出驱动 TX1 和 TX2。连接同轴电缆会对地产生不对称的电势。

设计一个满足上面 3 个要求的电路的方法是使用一个变压器或 Balun¹ 产生一个不对称的地电平。图 3.7 是使用 Balun 的一个典型的实现方法。基于 L₀ 和 C₀ 的 EMC 滤波器与直接匹配的天线有相同的结构。L₀、C₀ 和 C₁ 组成了一个 T 形滤波器。这个滤波器将输出驱动电阻转换到 50Ω 的同轴电缆电阻。Balun B1 的转换比例是 1:1 而且应当匹配到 50Ω。电容 C_{2b} 是可选的²。Balun 少量的不对称性可以减少调整天线最大输出电压的调谐电容。

特别注意：MF RC500 的桥输出驱动是低电阻器件。要获得最好的性能就要在 TX1 和 TX2 之间加入一个 30Ω 的匹配电阻。

计算需要转换的阻抗最简单的方法是使用 smith 图。

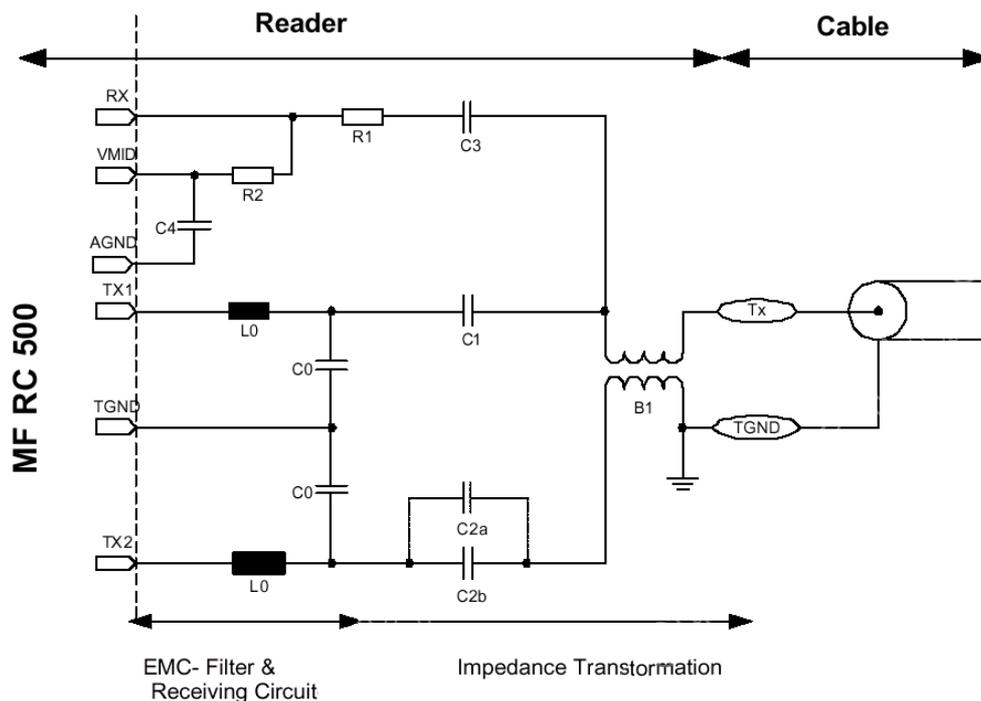


图 3.7 长距离的解决方案：50Ω 阻抗转换

变压器和 balun 是产生不对称地电平的一种方法。Balun 的概念显示了如何用几个外部元件实现 50Ω 匹配的长距离工作。Balun 的基本功能和阻抗网络的计算可以在标准文献中找到。计算的结果会给出找到最好的解决方案的调谐过程起始值。要提供 EMC 滤波功能必须在匹配到 50Ω 和滤波之间找到折衷的方案。表 6 显示了调谐过程的结果。应该使用可选的调谐电容找到实际设计中最好的结果。

¹ Balanced 到 Unbalanced 的缩写。Balun 是一种变压器。

² 推荐在设计阶段使用调谐电容 C_{2b}，它可以找到最优的性能。

表 6 阻抗转换的值 (类型 50-1)

元件	值	注释
C1	82pF ±2%	NP0 材料
C2a	69pF ±2%	NP0 材料
C2b	0~30pF	
B1	1:1 变压器	例如: Coilcraft 1812WBT-3

注意: 要获得最好的功能, 所使用的电容和电感至少要具备推荐的这些元件的性能和容差。

3.4.4 50 Ω 的短距离解决方案

第二种建立 50 Ω 天线的方法只使用一个驱动器级 TX₁ 或 TX₂。图 3.8 显示了完整的阻抗转换和接收部分。基于 L₀ 和 C₀ 的 EMC 滤波器与直接匹配的天线有相同的结构。L₀、C₀ 和 C₁ 组成了一个 T 形滤波器。这个滤波器将输出驱动电阻转换到 50 Ω 的同轴电缆电阻。电容 C_{1b} 是可选的。我们建议用这个调谐可能性对找到的 C₁ 最优值进行首次测试。

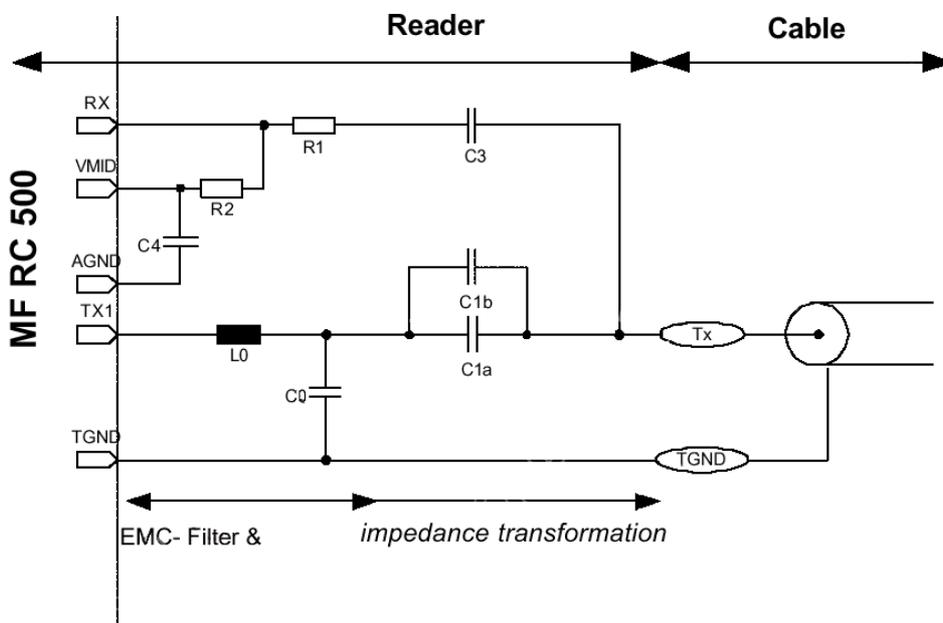


图 3.8 50 Ω 的短距离解决方案: 用一个驱动级实现 50 Ω 的阻抗转换

要提供 EMC 滤波功能必须在匹配到 50 Ω 和滤波之间找到折衷的方案。表 7 显示了调谐过程的结果。

表 7 阻抗转换的值

元件	值	注释
C2a	69pF ±2%	NP0 材料
C2b	0~30pF	NP0 材料

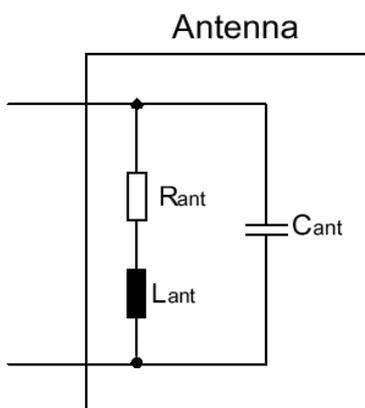
注意: 要获得最好的功能, 所使用的电容和电感至少要具备推荐的这些元件的性能和容差。

3.4.5 50 Ω 天线的天线匹配电路

匹配 50 Ω 电缆的天线设计要满足几个要求。首先要构造天线线圈, 它的电感要被测量或用计算天线电感的公式来估算。公式请参看附录 A。这样的天线是一个低电阻的器件。要将它连接到 50 Ω 的电缆需要一个阻抗匹配电路。除此之外, 它还需要一个谐振电路在 13.56MHz 的工作频率下产生最高的电压。

3.4.5.1 确定天线的等效电路

读卡器的天线线圈可以用图 3.9 的等效电路表示。天线本身有线圈。线圈的电感是 L_{ANT} 。另外，线圈还有串电阻 R_{ANT} 表示电阻损耗和一个表示线圈之间和连接器之间电容损耗的并行电容 C_{ANT} 。



其中 $L_{ant}=300\sim 1500nH$, $C_{ant}=10\sim 40pF$, $R_{ant}=0.3\sim 1.2\Omega$

图 3.9 天线线圈的等效电路

我们建议用阻抗分析仪测量天线的等效电路。连接天线线圈（当使用屏蔽天线时要将屏蔽连接到地）并测量显示的等效电路。在计算品质因子和天线的调谐时线圈的电容 C_{ant} 可以忽略。

注意：如果没有阻抗分析仪，将计算的电感和电容值作为起始值。估算这些值的公式请查看附录 A。MIFARE®的工作频率是 13.56MHz。这个频率下，电阻的表面效应损耗不能忽略，这就是线圈不能只使用 DC 阻抗的原因。请用附录 A 的估算找到电阻 R_{ant} 的起始值。我们建议以后用测量品质因子的方法来检查整个设计。如果有必要，起始值要被改变，整个调谐过程也要重新再做一次。

3.4.5.2 品质因子

接下来的部分中，假设天线电感 L_{ANT} 和电阻 R_{ANT} 的值已知。我们建议用阻抗分析仪测量 L_{ANT} 和 R_{ANT} 。如果是用公式估算出的值，要记住它们只是计算 Q 因子的起始值。

天线的品质因子是天线正确调谐和所获得的性能的一个重要特性。天线的品质因子由下面的公式定义：

$$Q = \frac{\omega_R \cdot L_{ANT}}{R_{ANT}}, \text{ 其中 } \omega_R = 2\pi f_R$$

根据天线的几何形状，Q 的值通常在 50~100 之间。要进行正确的数据传输这个值还要减少。在 2.3.2 章提到 MIFARE®的波特率是 105.9kHz/sec。数据从 RWD 传输到卡使用脉宽 $T=3\mu s$ 的 Miller 编码。

用带宽 B 的定义：

$$B = \frac{f_R}{Q}$$

以及时间与带宽的乘积的规定：

$$B \cdot T \geq 1$$

可以算出要求的 Q 因子是：

$$Q \leq f_R \cdot T \leq 13.56MHz \cdot 3\mu s \leq 40.68$$

由于元件的容差和对温度的依靠，我们建议 Q 因子的值取 35。要降低原始的 Q 因子，要求增加一个外部电阻 R_{EXT} 。图 3.10 显示了如何连接外部电阻 R_{EXT} 。

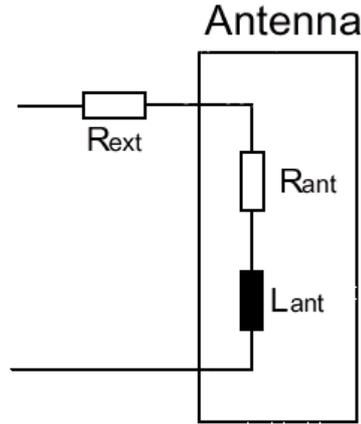


图 3.10 外部电阻

R_{EXT} 的值用下面的公式算出:

$$R_{EXT} = \frac{\omega_R \cdot L_{ANT}}{Q} - R_{ANT} = \frac{\omega_R \cdot L_{ANT}}{35} - R_{ANT}$$

3.4.5.3 匹配电路电容的计算

图 3.11 显示了推荐使用的将天线线圈匹配到 50Ω 的电路。匹配用一个串联和一个并联电容来实现。输入电阻 Z 要等于 50Ω 。

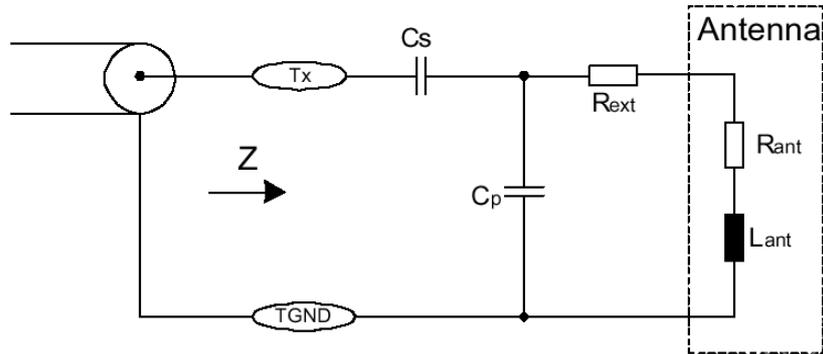


图 3.11 天线的匹配电路

用下面的公式计算 C_s 和 C_p :

$$\text{其中: } C_s = \frac{1}{\omega^2 L_{ant}} \cdot \sqrt{\frac{R_{ext} + R_{ant}}{Z}}$$

$$\text{而 } C_p = \frac{1}{\omega^2 L_{ant}} - C_s$$

$$C_p = \frac{1}{\omega^2 L_{ant}} \left(1 - \sqrt{\frac{R_{ext} + R_{ant}}{Z}} \right)$$

C_s 和 C_p 应当是 NP0 电介质的 SMD 类型, 有很好的温度稳定性。我们建议将 C_p 分裂成一个固定的值和一个最大值是 $10\sim 20\text{pF}$ 的可变值 (C_p')。

4. 环境的影响

4.1 金属的天线环境

任何变化磁场都会在靠近读卡器天线的金属元件上感应出电压。这个感应电压会在金属平面上产生涡流。而涡流会导致天线去调并减弱磁场。这些效应的结果是减少工作距离以及可能产生传输出错。

我们建议天线和大量金属元件的距离至少是工作距离。要避免金属环境的消极作用，就要使用铁屏蔽。

天线和大量金属元件的距离对于长距离 R/W 至少是 10cm，短距离 R/W 至少是 3cm，而且必须使用密封的金属铁屏蔽。

在所有情况下，天线的调谐要在将金属放在最后期望的地方进行。

4.2 多个天线

天线是有高品质因子并调谐到工作频率的振荡电路。根据互易律，好的发送天线也是好的接收天线，反之亦然。这就是说：天线放置得很靠近使用的读卡器天线并调谐到相同的频率，就会消耗磁场的能量。此时产生天线去调并减少工作距离。如果一个 MIFARE®应用有两个有效的天线而且放置的距离很近，卡的通讯就会受到干扰。

如果天线有磁场屏蔽，多个 MIFARE® R/W 天线之间的距离应当至少是 30cm；如果没有屏蔽距离就应该是 10 倍的天线半径。

4.3 温度

天线本身和匹配电路的电子参数温度漂移也可能产生去调。结果会减少天线的发送功率，减少工作距离。

测量显示这些影响在相应的元件对匹配电路有很低的温度系数（有 NPO 电介质的 SMD 电容）时可以被忽略。

5. 天线的屏蔽和补偿

这里要讨论三个不同的概念：

- 电子屏蔽
电子屏蔽吸收由天线线圈和读卡器 PCB 产生的电场。
- 补偿
补偿用于减少共模接地电流。
- 铁屏蔽
如果金属要放置在接近天线的时候就要使用铁屏蔽功能。金属可以是例如产生涡流的终端金属外壳。涡流效应明显降低了工作距离。铁屏蔽用于减少产生的涡流。
注意：铁屏蔽不会增加工作距离使它大于无金属环境下的值。

5.1.1 电子屏蔽

5.1.1.1 直接匹配的天线

电子屏蔽用于减少天线线圈本身产生的电场。要在 PCB 上获得屏蔽的天线，PCB 要有 4 层而且在顶层和低层都有屏蔽环 (shielding loop)。这些环必须不能重合 (闭合)。它不仅提供电子屏蔽，还能改良 EMC 性能。屏蔽层要连接到一点再连接系统地。线圈在内部的第一层。线圈的中心抽头标记成 GND 并连接到 GND。连接到匹配电路的线圈末端应排列得尽量接近，避免产生额外的电感。

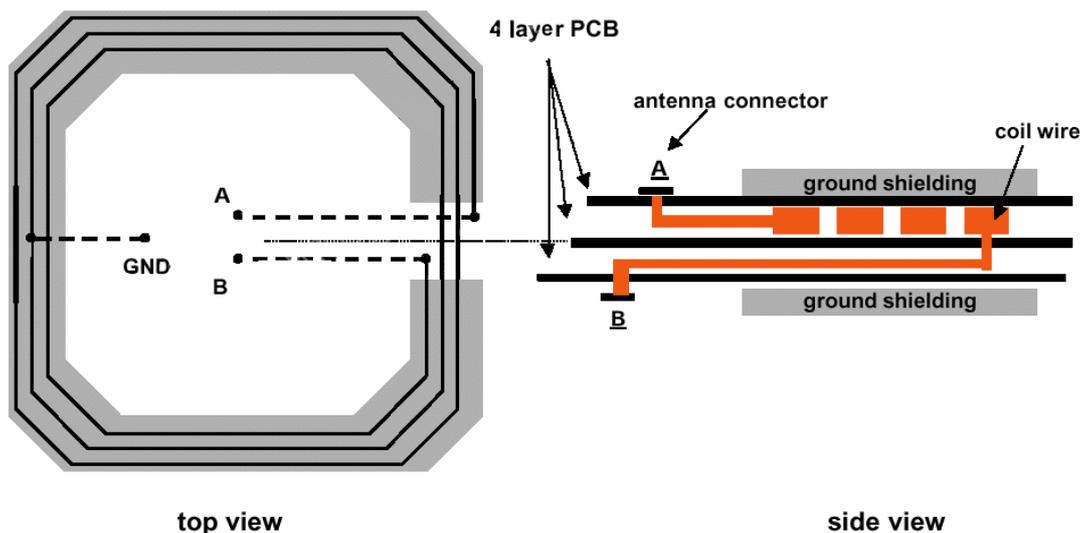


图 5.1 直接匹配天线的电子屏蔽

5.1.1.2 50Ω 匹配的电阻

电子屏蔽用于减少天线线圈本身产生的电场。要在 PCB 上获得屏蔽的天线，PCB 要有 4 层而且在顶层和低层都有屏蔽环 (shielding loop)。这些环必须不能重合 (闭合)。它不仅提供电子屏蔽，还能改良 EMC 性能。屏蔽层要连接到一点再连接系统地。

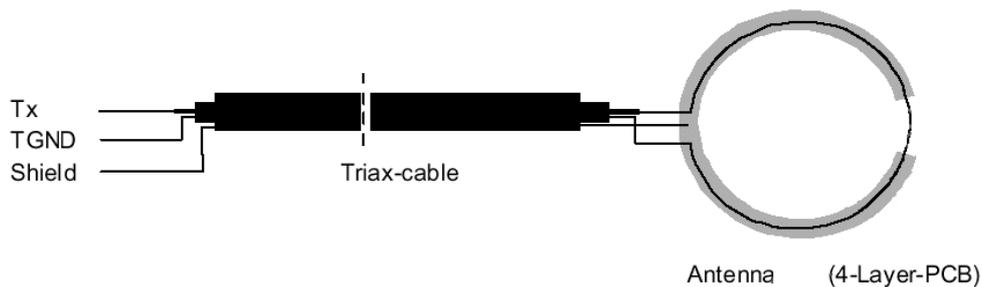


图 5.2 用双重屏蔽电缆的 50Ω 匹配天线的电子屏蔽

在 PCB 低层的上面，屏蔽平面直接放在 PCB 内层有效的天线环上。这些屏蔽平面必须不能是重合 (闭合) 的环！屏蔽要连接到双重屏蔽的电缆。

5.1.2 补偿

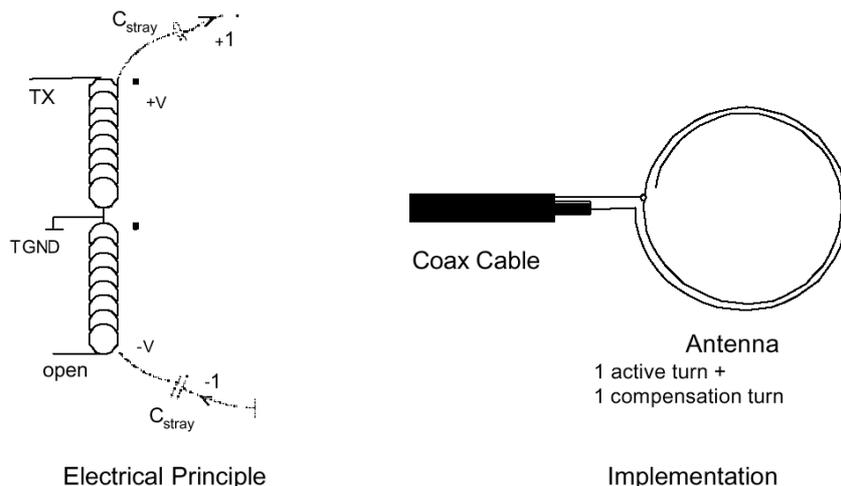


图 5.3 补偿 50Ω 的天线

为了补偿天线的寄生电容，要再加上一个末端开路的线圈。由于变压器原理，开环的感应电流是反向的。天线和补偿环的寄生电容几乎相等。这个效应使流过这些电容的电流有几乎相同的磁场但方向相反。这样就完成了这些电流的补偿。这些电流在 13.56MHz 下是 mA 级的，所以必须要补偿，避免产生地电流的问题。

5.1.3 铁屏蔽

铁屏蔽的优点是将天线屏蔽防止金属的影响。金属平面可以是读卡器外壳的一部分或者是读卡器 PCB 的接地平面，它们都非常接近天线。如果金属放得很靠近天线，变化磁场会在金属上产生涡流。这些涡流会吸收能量、降低电感和品质因子使天线去调。天线在铁环境下工作时需要用铁屏蔽天线。

下面的例子会给出铁干扰磁场的一个印象。

为了可以简单地模拟，这里的所有例子都使用环形的天线。环形天线的旋转对称于 X 轴。因此，模拟可以简化成一个两维的数学问题。模拟一方面显示了一个无干扰天线的磁场扰动。所有例子都共同的是：RWD 天线的半径是 5cm、1 圈（匝）、线宽是 1mm 的铜线。

图 5.4 显示了环形天线的两维磁场。右边是磁场的分布状态。最高的场强在线圈的区域。左边部分显示了距离是 d 时场强 H 的幅值。标记的是根据 ISO 14443 最小场强 $H_{MIN}=1.5A/m$ 的线。

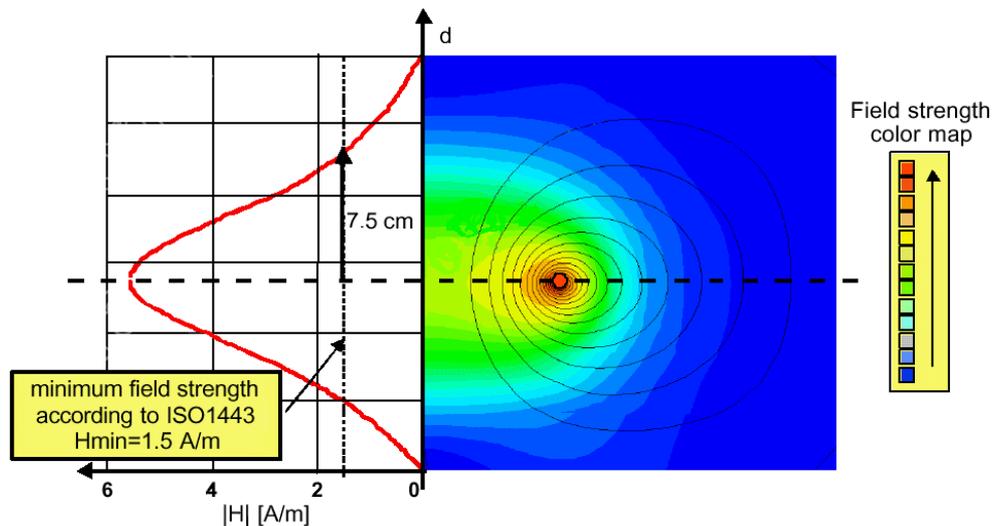


图 5.4 环形天线无干扰的磁场分布

图 5.5 是相同天线的磁场分布，但是在靠近天线的地方有金属平面。比较受干扰的磁场，显然磁场强度的幅值降低，使工作距离也减小。

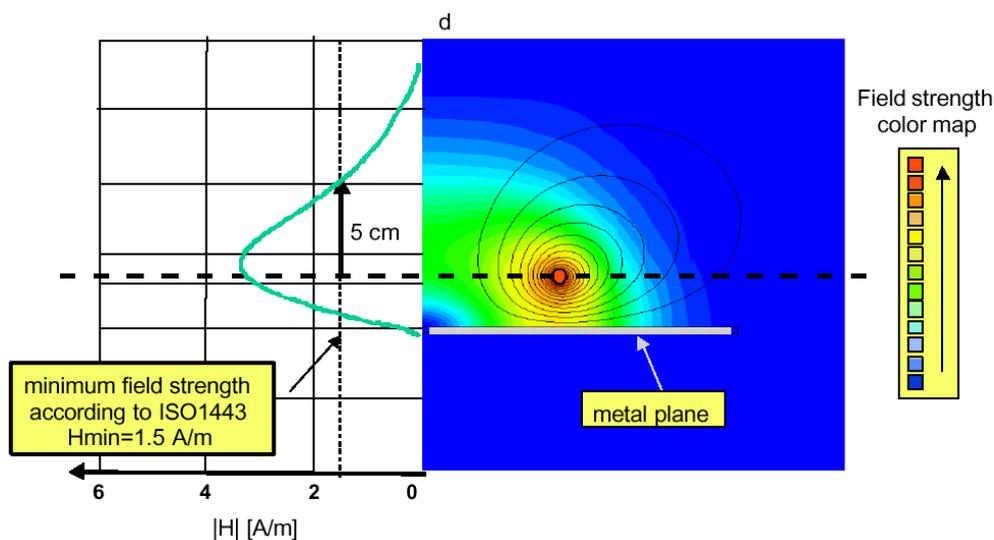


图 5.5 环形天线有金属平面的磁场分布

图 5.6 所示的是将一个铁平面 ($\mu_R=40$) 放在金属平面和天线线圈之间的磁场分布图。很靠近铁的场强增加，但增加的幅值没有使工作距离增加。这也是根据 ISO 14443，用 H_{MIN} 来标记的。

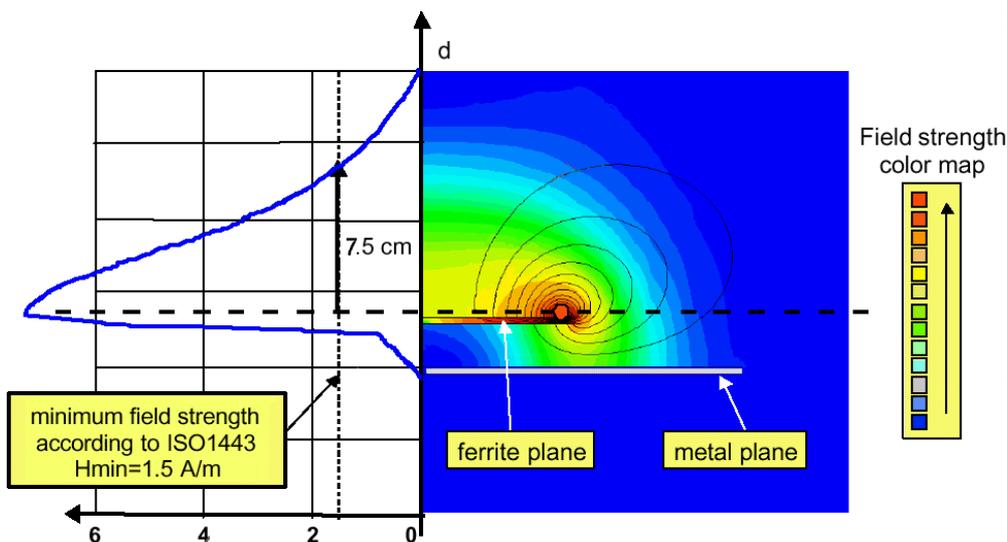


图 5.6 有铁屏蔽的环形天线磁场分布

这些模拟显示了如何使用铁减少在金属平面上产生的涡流。铁产生一个额外的磁场，这样设计天线的作用是使天线有一个固定的去调。

图 5.7 给出了一些如何在铁平面和金属平面之间找到铁平面最优的尺寸的建议。计算铁平面的最优尺寸和最优的距离时，不推荐天线线圈与铁平面重叠。要执行应用指定的测试来找到最好的铁平面尺寸。

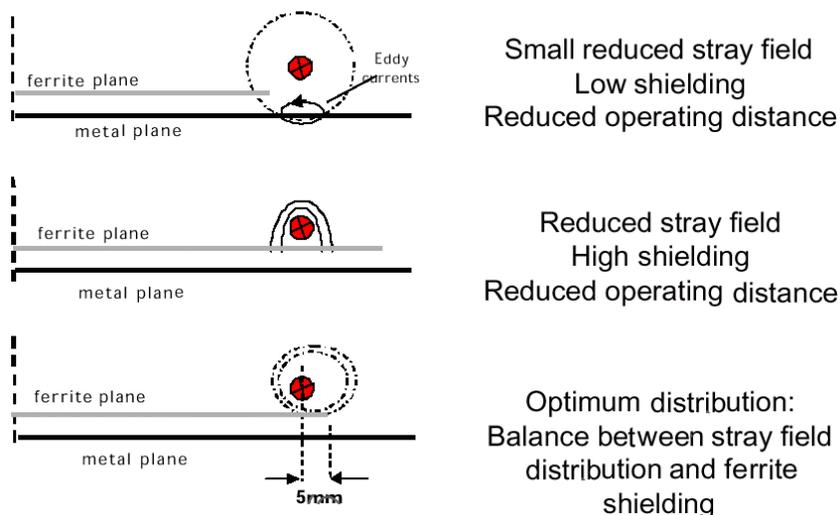


图 5.7 估算最优的铁平面尺寸

测试显示，最好的性能在天线线圈和铁平面的距离在 5mm 范围时获得。这使与卡通讯的寄生磁场和铁的屏蔽有了平衡。

将距离的估算指定到一个特殊的应用，我们建议用测试来找到最好的解决方法。再一次说明：铁不会增加工作距离（与无干扰的磁场相比）。

6. MF RC500 天线设计的举例

下面的例子是没有铁屏蔽的 PCB 天线。如果使用铁，由于铁的去调效应电容的值就需要改变。我们建议在铁平面后放置一个金属平面，将金属平面连接到地并在有金属平面的情况下调谐天线。此时天线在有金属或没有金属的环境下是一样的。金属平面应连接到双重屏蔽电缆的屏蔽层，使用同轴电缆时要连接到地屏蔽。

调谐必须在组装了整个天线或者将天线装到最后的位置后进行。

6.1 总体布线提示

6.1.1 EMC 滤波器和接收电路

L_0 和 C_0 是用于滤波 MF RC500 的输出信号，必须放在很靠近 MF RC500 的 T_{X1} 和 T_{X2} 管脚。为了满足 EMC，这些元件的布线是很严格的。 C_0 的接地连接线必须很短，而且对 MF RC500 TGND 管脚的阻抗非常低（地平面有多个通道可供连接）。这些元件要排列得尽量紧密才可以抑制载波频率的高次谐波。

接收电路的布线相对没有这么严格，而且也不需要符合特殊的要求。

图 6.1 显示了部分 MF RC500 关键元件的布线图。

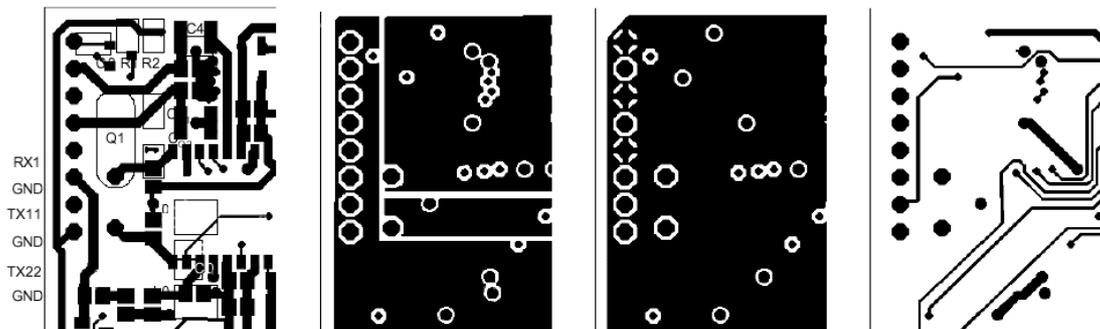


图 6.2 EMC 滤波和接收电路的布线举例

6.2 天线和匹配电路的布线

天线的布线由它所使用的屏蔽和匹配决定。

对于直接匹配的天线，建议用中心抽头获得更好的 EMC 性能。

6.3 直接匹配天线的例子

6.3.1 屏蔽和补偿的矩形天线

一匝（圈）大小= 115x115mm，示意图不按比例。

元件的值：待计算。

天线	外部元件
$L_{ANT}=t.b.d$	$C_S=t.b.d$
$C_{ANT}=t.b.d$	$C_P=t.b.d$
$R_{ANT}=t.b.d$	$R_{EXT}=t.b.d$

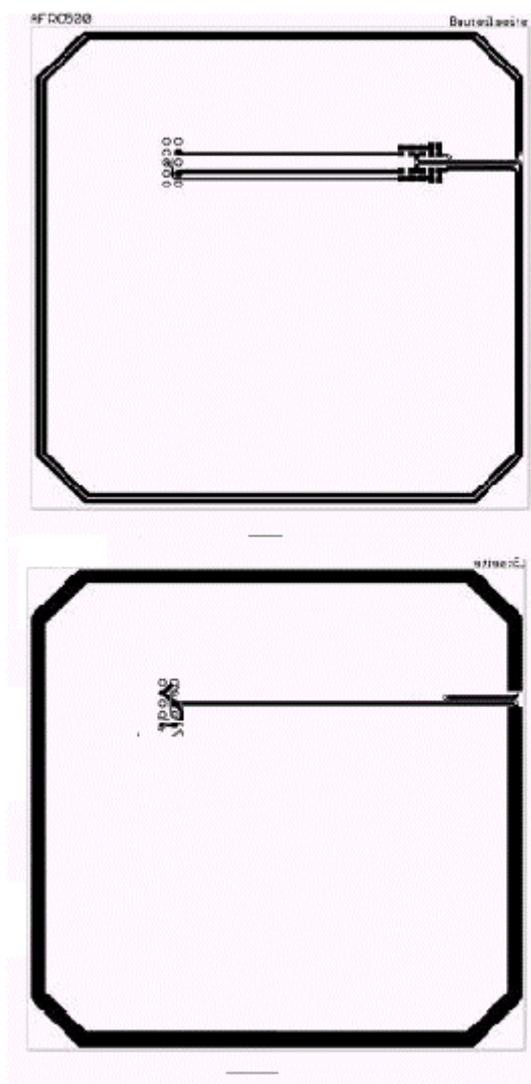


图 6.3 矩形天线举例

6.3.2 矩形天线

一匝（圈）大小= 78.5 x 67mm，示意图不按比例。

元件的值：待计算。

天线	外部元件
$L_{ANT}=t.b.d$	$C_S=t.b.d$
$C_{ANT}=t.b.d$	$C_P=t.b.d$
$R_{ANT}=t.b.d$	$R_{EXT}=t.b.d$

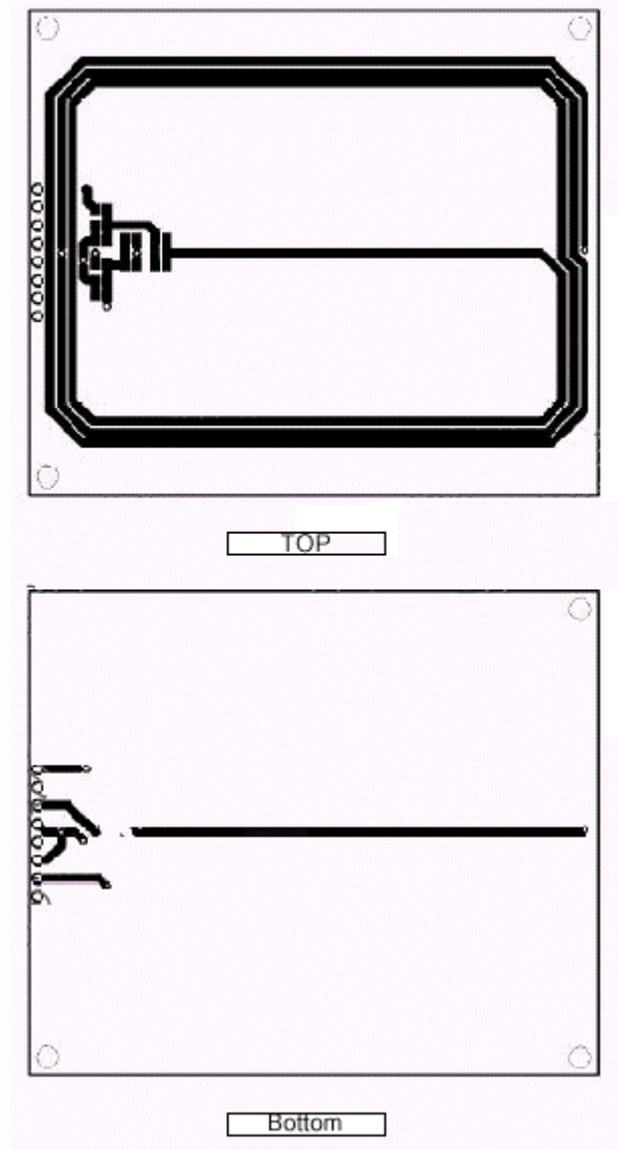


图 6.4 矩形天线举例

6.3.3 屏蔽的矩形天线

下图是相应的布线举例。

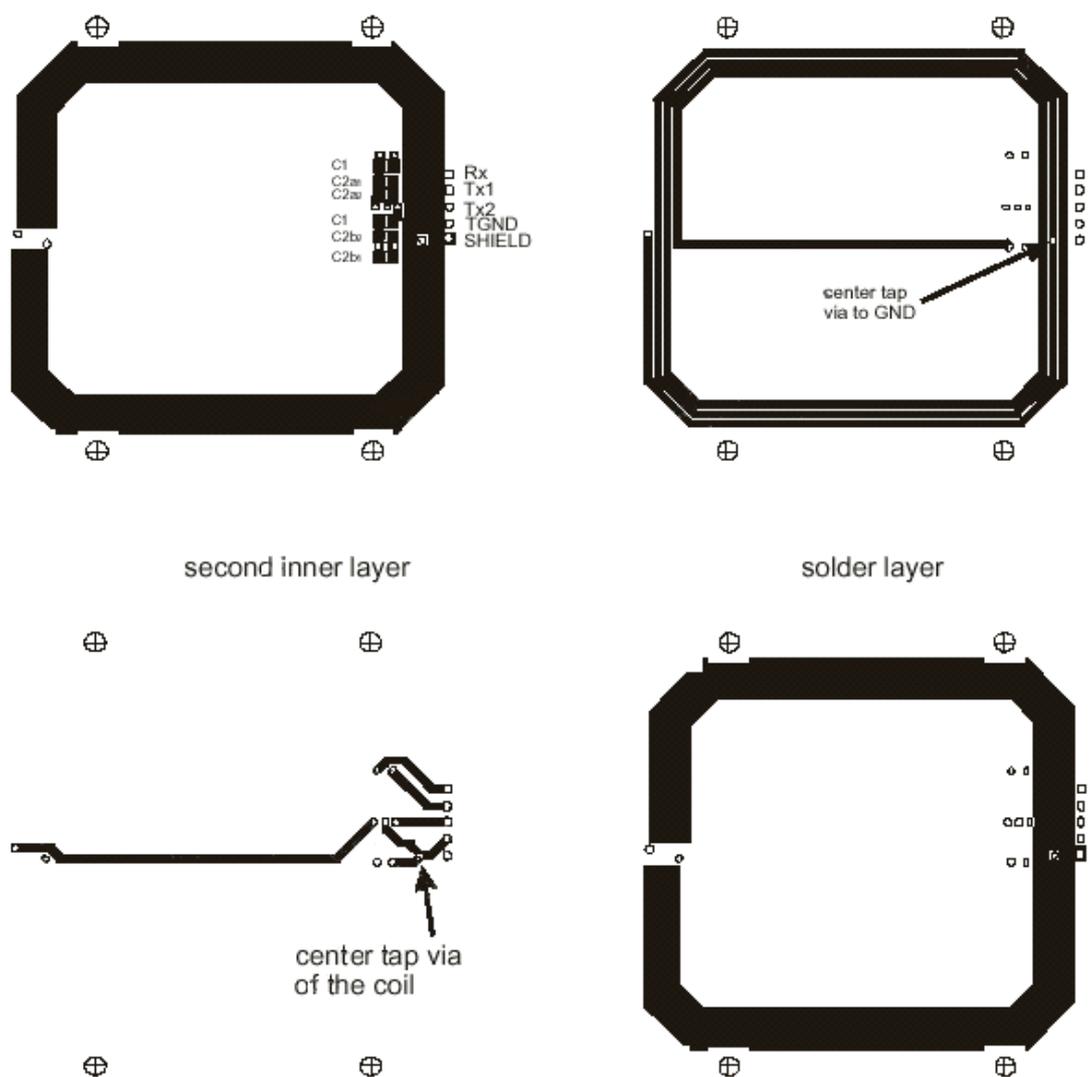


图 6.5 屏蔽的矩形天线

6.4 50Ω 匹配天线的举例

6.4.1 补偿的矩形天线

一匝（圈）大小= 115 x 75mm，示意图不按比例。

元件的值：

天线	外部元件
$L_{ANT}=330\mu H$	$C_S=47pF 3.3pF$
$C_{ANT}=20.2pF$	$C_P=270pF 68pF$
$R_{ANT}=0.25\Omega$	$R_{EXT}=0.5\Omega$

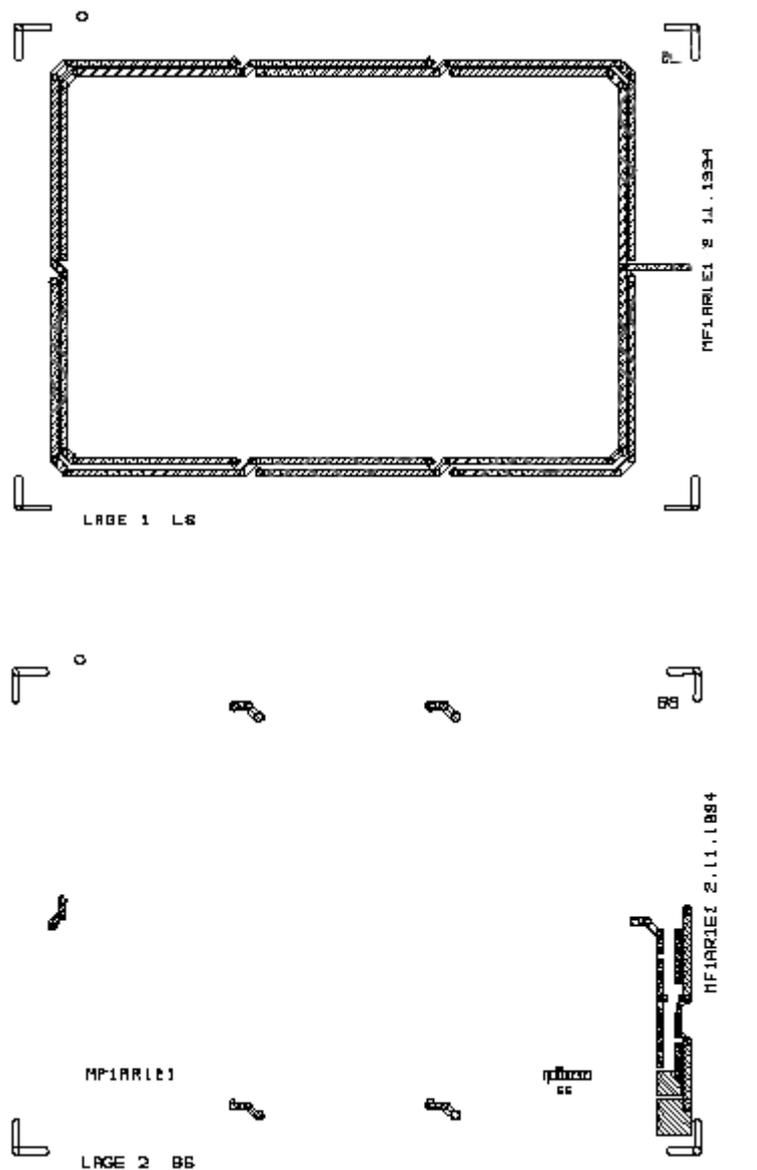


图 6.6 补偿的矩形天线举例

6.4.2 补偿的环形天线

直径=15cm，示意图不按比例。

元件的值：

天线	外部元件
$L_{ANT}=545nH$	$C_S=33pF 4.7pF$
$C_{ANT}=25.4pF$	$C_P=220pF 8.2pF$
$R_{ANT}=0.32\Omega$	$R_{EXT}=1.0\Omega$

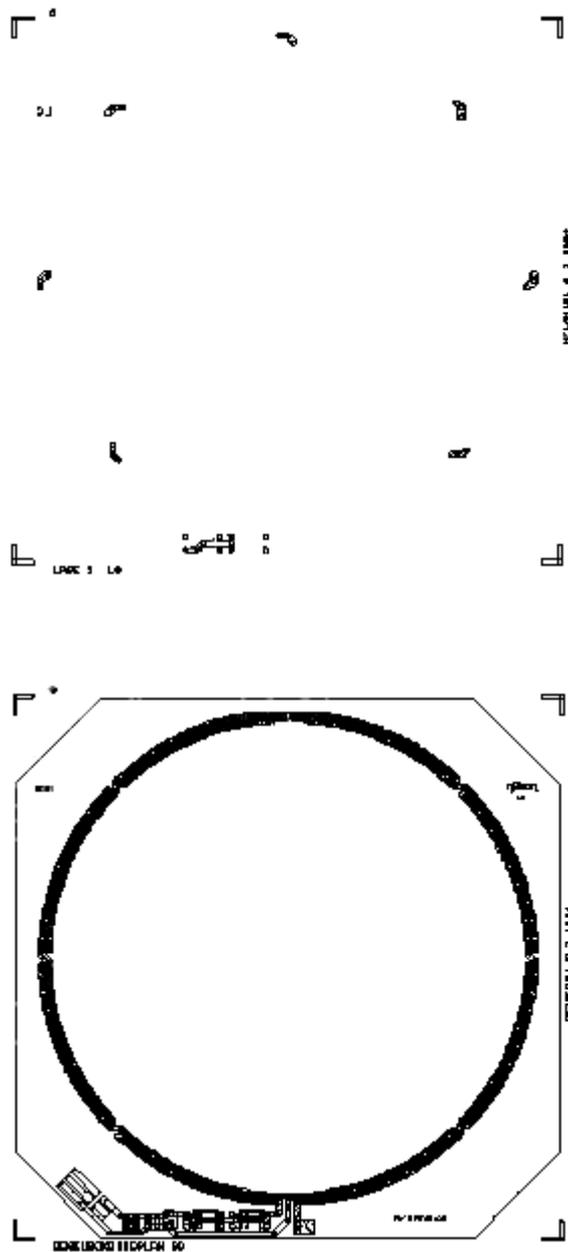


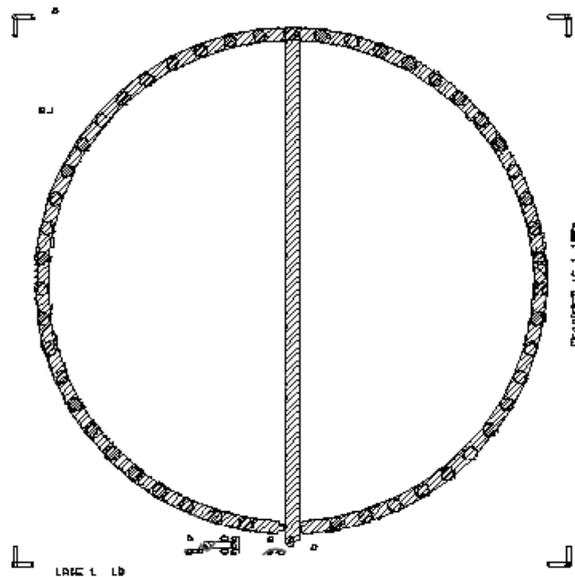
图 6.7 补偿的环形天线

6.4.3 屏蔽的环形天线

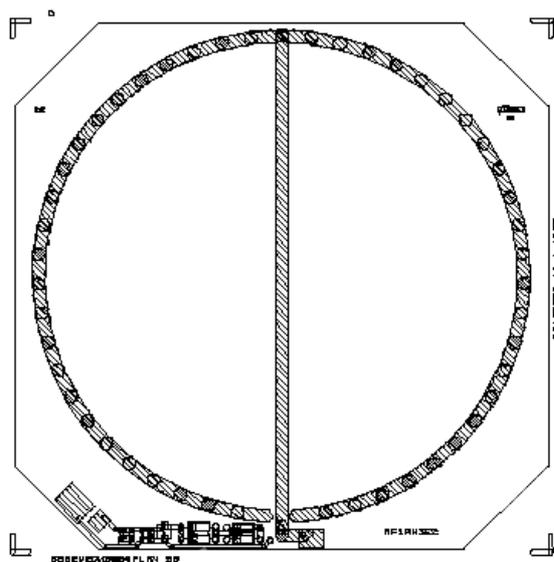
直径=15cm; 3层 PCB。示意图不按比例。

元件的值:

天线	外部元件
$L_{ANT}=460nH$	$C_S=39pF 3.3pF$
$C_{ANT}=38.7pF$	$C_P=180pF 15pF$
$R_{ANT}=0.53\Omega$	$R_{EXT}=0.5\Omega$



Bottom layer



Top layer

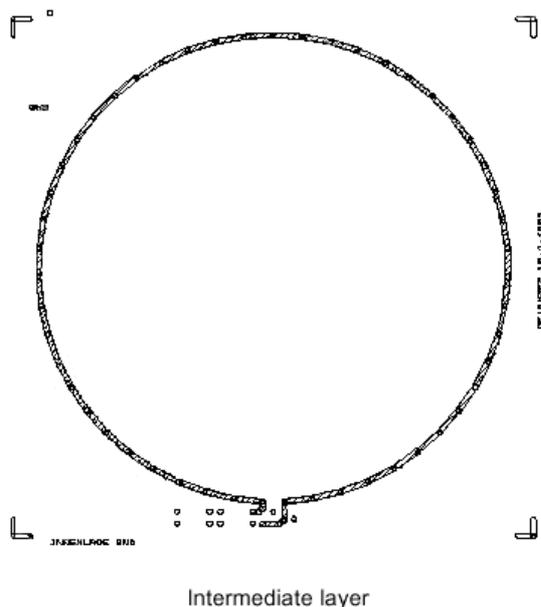


图 6.8 屏蔽的环形天线

7. 天线的调谐

要获得最优的性能，天线必须进行正确的调谐。我们建议在完整的终端上最后进行天线调谐。这包括：终端的所有部分都应正确连接到电源以及将天线和读卡器的 PCB 调整到在它们最后的位置上。

调谐过程的解释分成两个部分。第一部分是调谐在能量传输上获得最优的工作距离。第二部分是解释如何检查天线的品质因子确保数据正确传输。

天线的调谐过程被划分到第一次开发测试和第二次生产测试的调谐方法。我们建议用阻抗分析仪进行第一次调谐以及测量线圈的等效参数。如果没有器件，也可以应用生产调谐过程。但需要进行复杂的迭代过程。

成功调谐的一个最重要的因素是要知道天线的等效电子参数，找到调谐最好的起始值。测量天线等效参数的最简单方法是用阻抗分析仪。

7.1 最优工作距离的调谐方法

7.1.1 直接匹配天线的调谐

直接匹配天线的调谐要按照图 7.1 所示的迭代过程进行。调谐电容的起始值有线圈的电感（见表 4）决定。

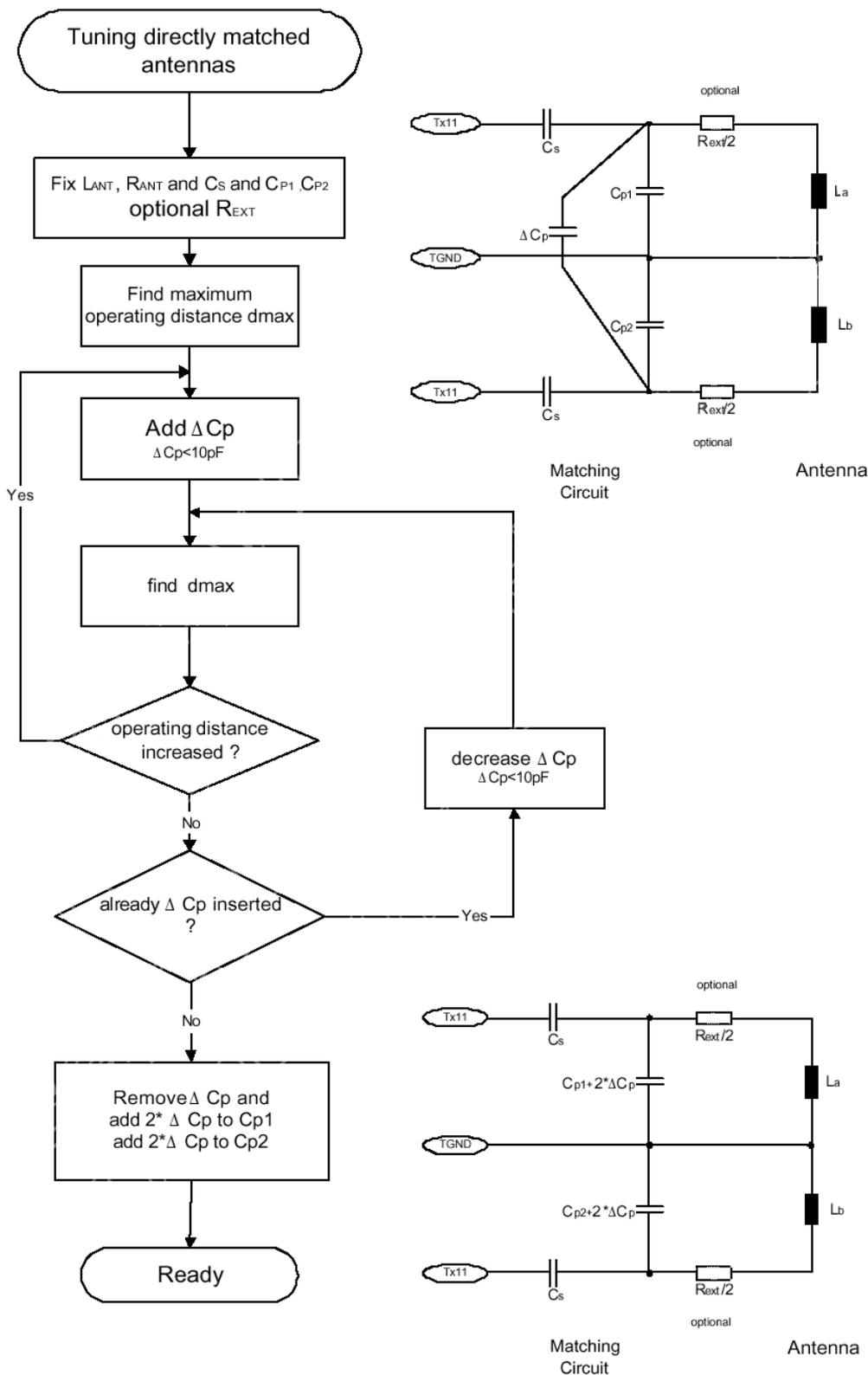


图 7.1 直接匹配电路的调谐

7.1.2 50Ω 匹配天线的调谐

50Ω 匹配的天线可以用几种过程和不同的测量装置调谐。

- 用阻抗分析仪调谐。
这种是最简单最精确的方法，它需要一个相当贵的阻抗分析仪。
- 用示波器调谐

7.1.2.1 用阻抗分析仪调谐

调谐天线最简单最精确的方法是使用阻抗分析仪，例如：HP 4195 带一个 50 Ω 的信号分配器。将天线直接连接到校准的分析仪，并用图 7.2 的迭代过程调谐天线。

注意：最重要的是分析仪已经热身（warmed up）、校准（范围例如：1~30MHz）并用测量电缆正确补偿才能精确地测量。

迭代过程：

由于 C_S 和 C_P 的值只能通过计算得出，而且有 20% 的误差，那么最后的电路要用下面的迭代过程决定：

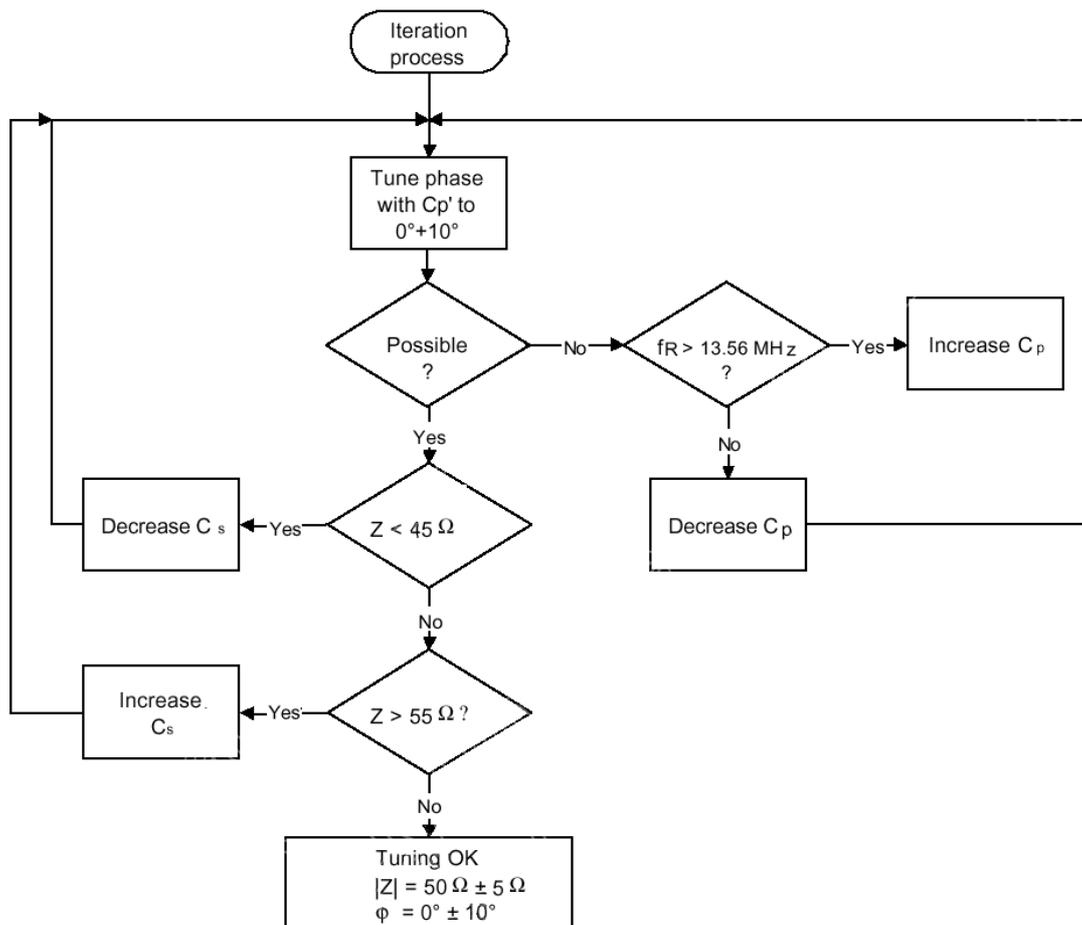


图 7.2 用阻抗分析仪调谐 50 Ω 天线

在 13.56MHz 下输入阻抗的容差是：

$$|Z| = 50\Omega \pm 5\Omega$$

$$\phi = 0^\circ \pm 10^\circ$$

7.1.2.2 用示波器调谐的过程

注意：只用一个示波器完整的调谐 $50\ \Omega$ 天线是比不上用阻抗分析仪精确的。我们建议天线的首次调谐使用分析仪而不用示波器。示波器调谐可以在生产调谐（只需要调谐一个并联电容 C_P ）时使用。

没有阻抗分析仪的天线设计和调谐过程的最关键部分是计算 L_{ANT} 和 R_{ANT} 的值。使用这个值，调谐要在检查 Q 因子后重做。串联和并联电容的值用 L_{ANT} 和 R_{ANT} 以及 3.4.5 节的公式可以算出。

调谐天线时，要将算出的电容值减少 40% 并将它们标记为 C_S 和 C_P 插入阻抗匹配網路。增加可变电容 C_S' 和 C_P' ，使计算值可以调整 $\pm 20\%$ 。

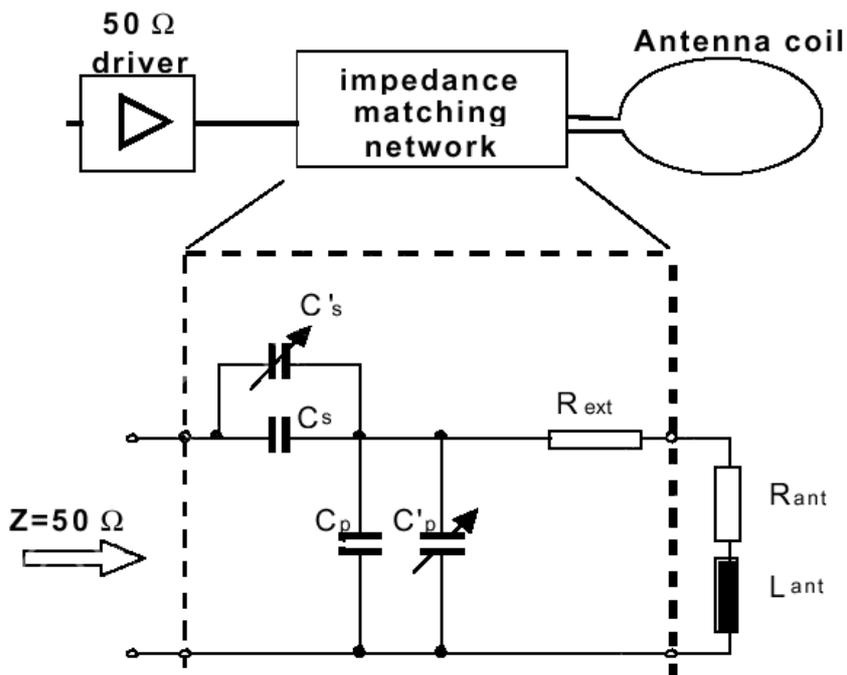


图 7.3 匹配电路

最后调谐的必要装置见图 7.4。在函数发生器输出和天线连接器的地线之间连接一个 $50\ \Omega \pm 2\%$ 的参考电阻（例如 $50\ \Omega$ BNC 端接电阻）。示波器的两个探针连接到函数发生器的输出而且并联到参考电阻。元件 $C_{y-probe}$ 和 $C_{x-probe}$ 表示示波器的探针输入电容。示波器会显示一个 Lissajous 图，可以获得绝对幅值和相位。幅值由 Lissajous 图的角度给出，而下图所示的区域给出相位。

调谐过程有两个步骤：

第一步：校准

校准时用 $50\ \Omega$ 标准电阻代替天线。

校准过程在下一个图描述。函数发生器设置为：

波形：正弦波

频率：13.56MHz

振幅：2~5V

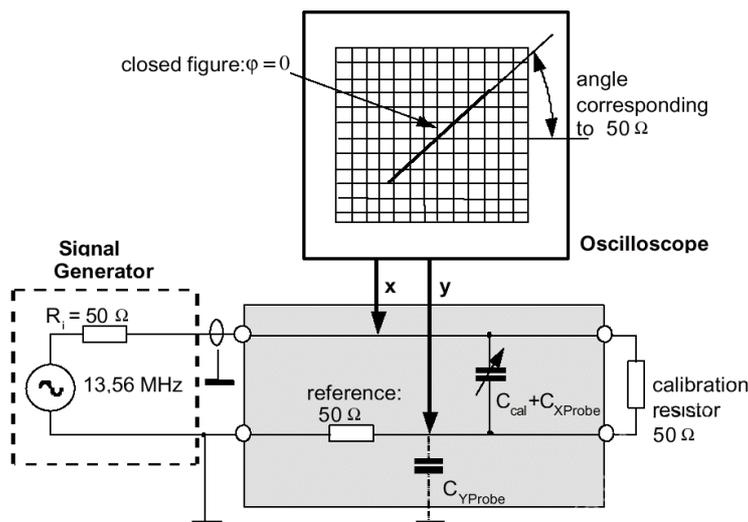


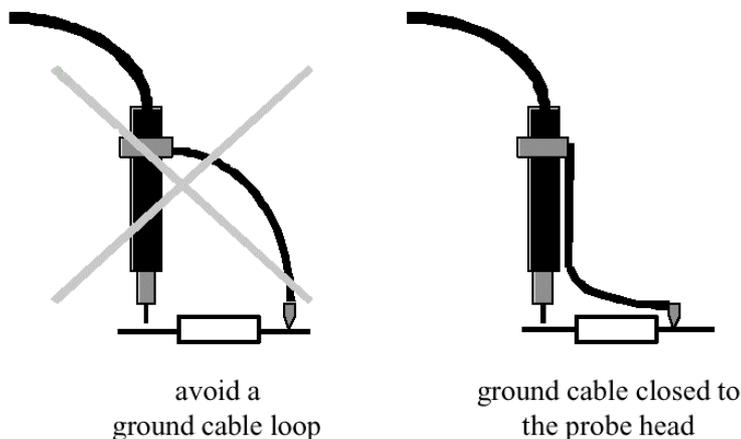
图 7.5 校准

x 探针的电容 C_{xprobe} 只减少函数发生器输出的幅值，对调谐结果没有影响。

y 探针的电容 C_{yprobe} 影响相移，改变 Lissajous 图的区域。补偿这个效应的方法是将电容 C_{cal} 并联到匹配网络。校准相位时，匹配网络要用另一个 $50\ \Omega$ 的电阻（例如： $50\ \Omega$ BNC 终端电阻）代替。校准电容要调整到使 Lissajous 图完全重合。此时的校准电容 C_{cal} 就等于 $C_{y-probe}$ 。此时 y 探针的电压同相，幅值正好是函数发生器电压（x 探针）的一半。

注意：如果 x 探针的比例是 y 探针比例的两倍（例如：x 比例： $2V/DIV$ ，y 比例： $1V/DIV$ ），那么 Lissajous 图的角度是 45 度。

注意：探针的接地电缆避免成环形，以减少与天线的电感耦合。



第二步：调谐过程

校准后，用天线代替校准电阻。匹配网络应用可变电容 CS' 和 CP' 调谐，直到 Lissajous 图完全重合。Lissajous 图的角度要和校准电阻的 Lissajous 图的角度比较。如果角度相等，匹配电路的阻抗是 $50\ \Omega$ 。

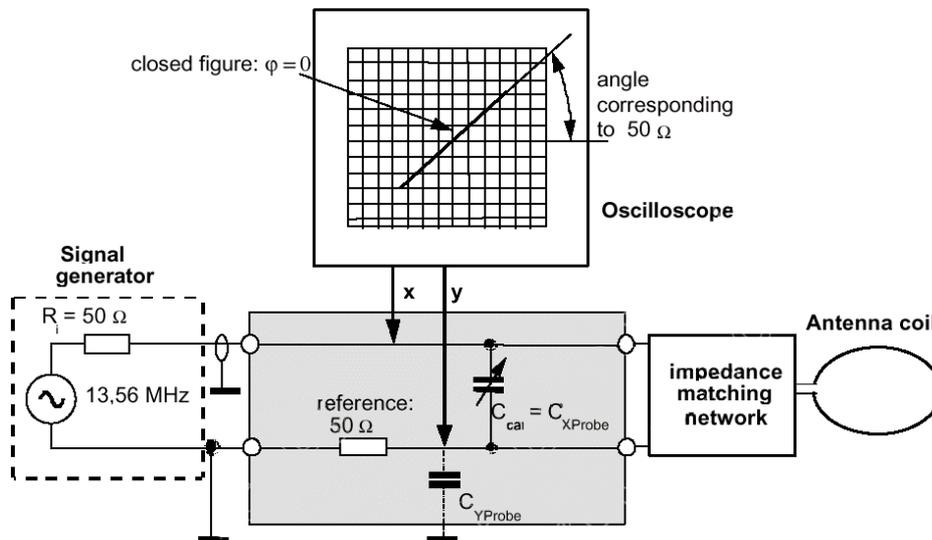


图 7.6 50 Ω天线的调谐

解释 Lissajous 图时有几个注意事项:

如果图形不重合, x 和 y 之间的相位不等于 0。

如果 $\varphi=0^\circ$, Lissajous 图完全重合。

如果角度大于 45° , Z 大于 $50\ \Omega$ 。

如果角度小于 45° , Z 大于 $50\ \Omega$ 。

如图 7.7 所示, 天线的谐振波形在相位上有两个 0。只可能调谐低频 fLOW 到 $Z=50\ \Omega$ 而且 $\varphi=0^\circ$ 。高频的 0 不能调谐到 $Z=50\ \Omega$ 。

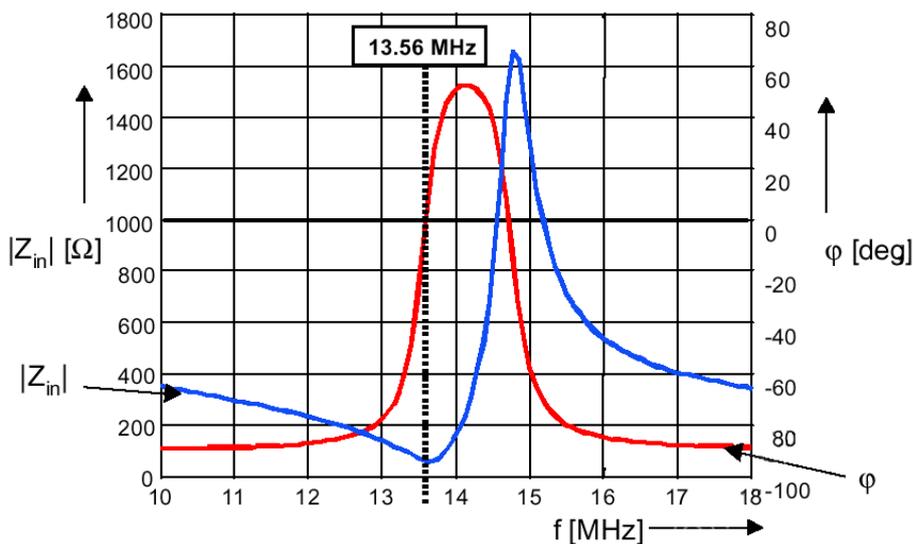


图 7.7 调谐电路的输入阻抗和相位

请确定调谐是在低频的时候进行, 我们建议将算出的 CS 和 CP 值降低 40%, 然后在这个范围内增加调谐电容。用调谐电容的最小值开始调谐。

整个调谐过程如图 7.8 的流程图。

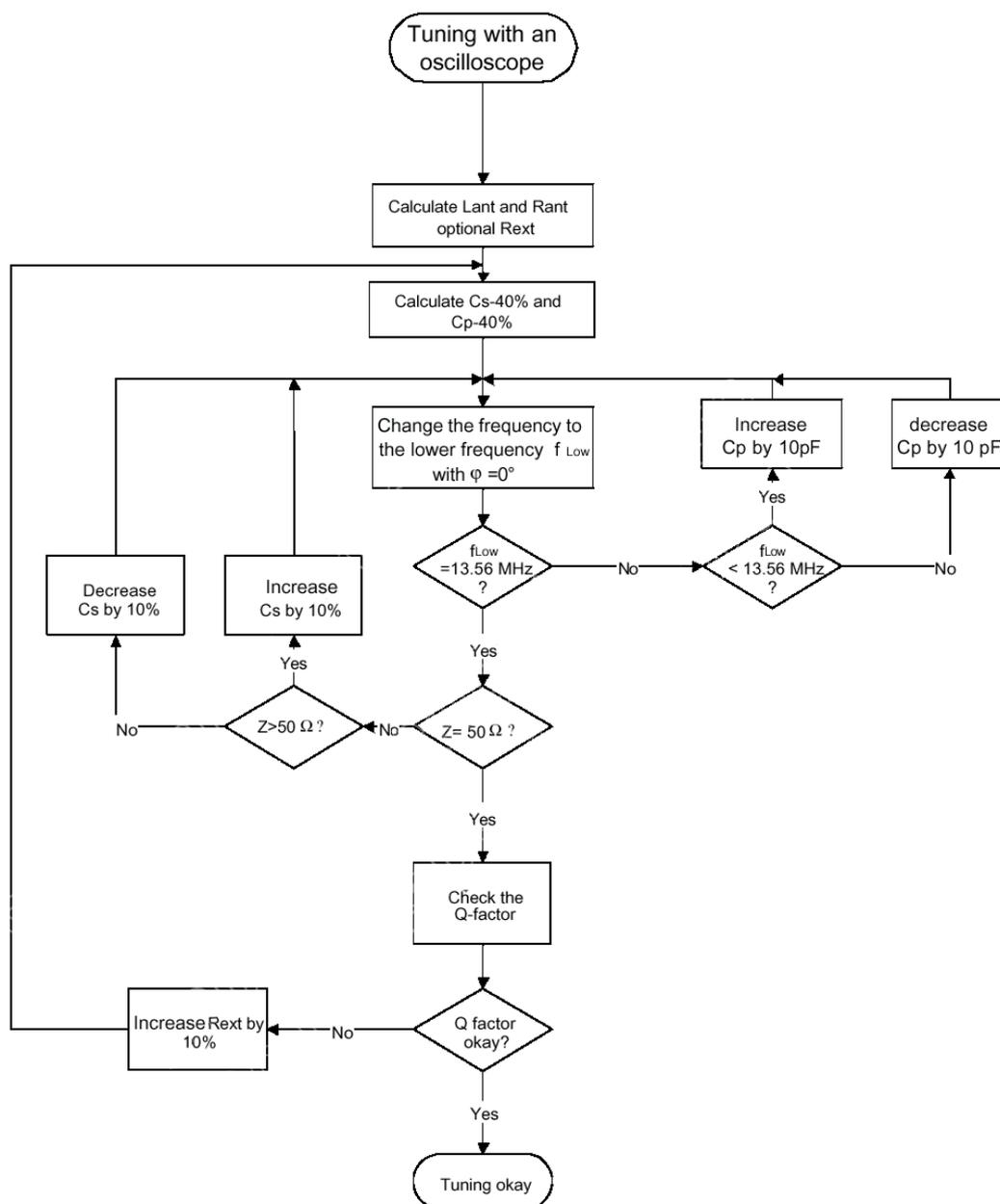


图 7.8 用示波器调谐 50 Ω 天线

7.2 检查 Q 因子

检查计算的调谐天线 Q 因子可以用一个很简单的装置。如图 7.9 所示，用带宽至少是 50MHz 的示波器，而且两个探针如图连接。

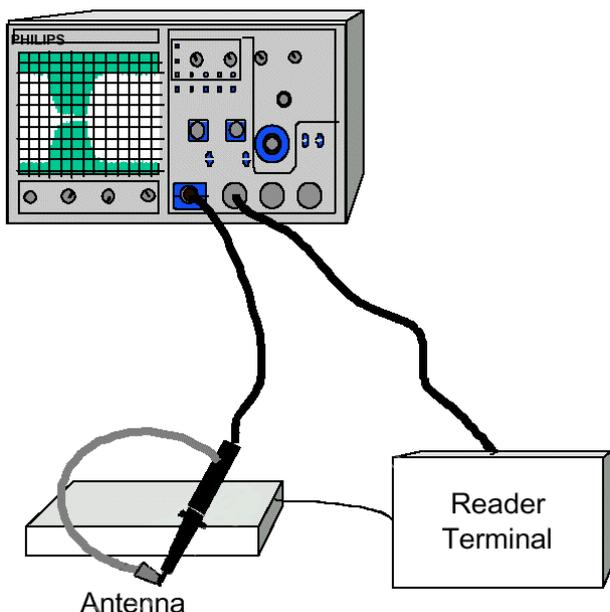


图 7.9 检查 Q 因子的装置

探针要用下面的方法连接:

CH1: 用探针的接地线形成一个环, 使探针可以耦合感应信号。将探针环放置在接近天线的上方。

CH2: 将探针连接到 MIFARE® 读卡器的 NPAUSE0 信号, (用于简单的触发) 触发源=CH2。

检查脉冲的波形时建议与图 7.10 的图比较。值在表 8 中。检查正确的调谐时, 时间 t_2 是一个特别重要的值。这个时间表示信号降低到 90% 的信号幅值的 5% 所用的时间。要正确调谐天线, 特别是外部电阻 R_{EXT} 有正确值, 要满足下面的要求:

信号要降低到低于值的 5%。

时间 t_2 要超过 $1.4\mu s$ 。如果 t_2 大于 $1.4\mu s$, Q 因子大于 35, 不能保证正确传输数据。此时要增加 R_{EXT} 。

如果 t_2 小于 $0.7\mu s$, Q 因子很高, 但工作距离不满足要求。此时要降低 R_{EXT} 。

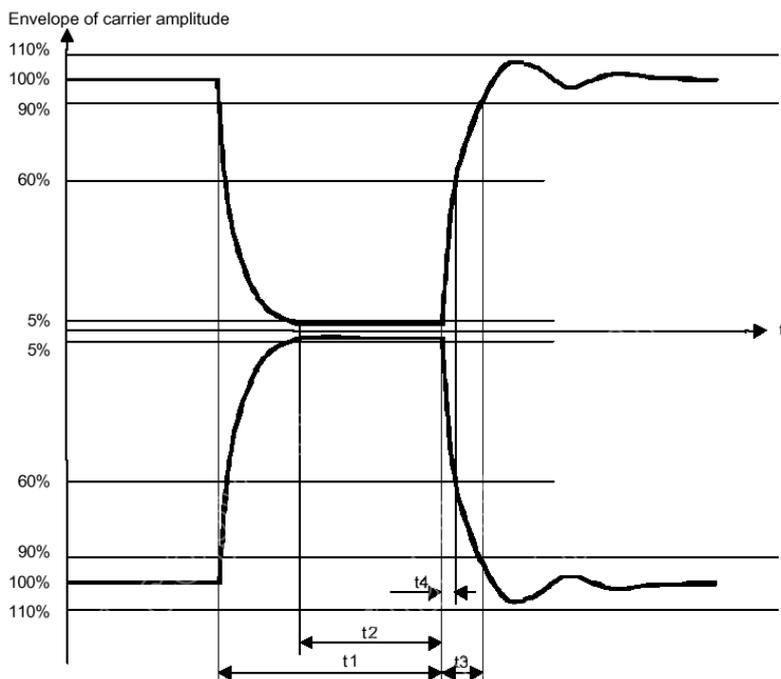


图 7.10 根据 ISO 14443 的脉冲波形

表 8 根据 ISO 14443 的脉冲持续时间

脉冲长度	t1[μs]	t2[μs]	t3[μs]	t4[μs]
T1 MAX	3.0	1.4	1.0	0.4
T1 MIN	2.0	0.7	1.0	0.4

8. 参考文献

[1] Data Sheet MIFARE® MF RC500 Highly Integrated ISO 14443A Reader IC

[2] ISO 14443 Identification cards – Contactless integrated circuits cards – Proximity cards, part1~4

9. 附录 A

9.1 缩写

本文档使用了下面的缩写：

ASK	幅移键控，幅变调制
EMC	电磁兼容
ISO 14443	国际标准：Identification cards – Contactless integrated circuits cards – Proximity cards
MIFARE® Classic	MIFARE®的硬连线 IC 卡（MIFARE® STANDARD 和 MIFARE® LIGHT）
MIFARE® Pro	MIFARE®双接口 IC 卡
RWD	MIFARE®读卡器的读 / 写器件

9.2 天线线圈电感的计算

在实际的应用中不可能也不推荐精确计算出天线线圈的电感。我们建议设计一个环形或矩形的天线。首次估算电感的公式如下：

$$L_1[\text{nH}] = 2 \cdot l_1[\text{cm}] \cdot \left(\ln \left(\frac{l_1}{D_1} \right) - K \right) N_1^{1.8}$$

其中

l_1	一圈（匝）导线环的长度
D_1	分别是线圈的直径或 PCB 导线的宽度
K	=1.07（环形天线） =1.47（方形天线）
N_1	线圈的匝数
\ln	自然对数函数

天线电感的实际值由下面的参数决定：

- 天线的结构（PCB 类型）
- 导线的厚度
- 线圈之间的距离
- 屏蔽层
- 附近的金属或铁

另外，匝数 N 可以算出天线需要的大小和电感。图 9.1 是天线的匝数和天线半径（环形天线）的比。半径是 5cm 时，半径改变。

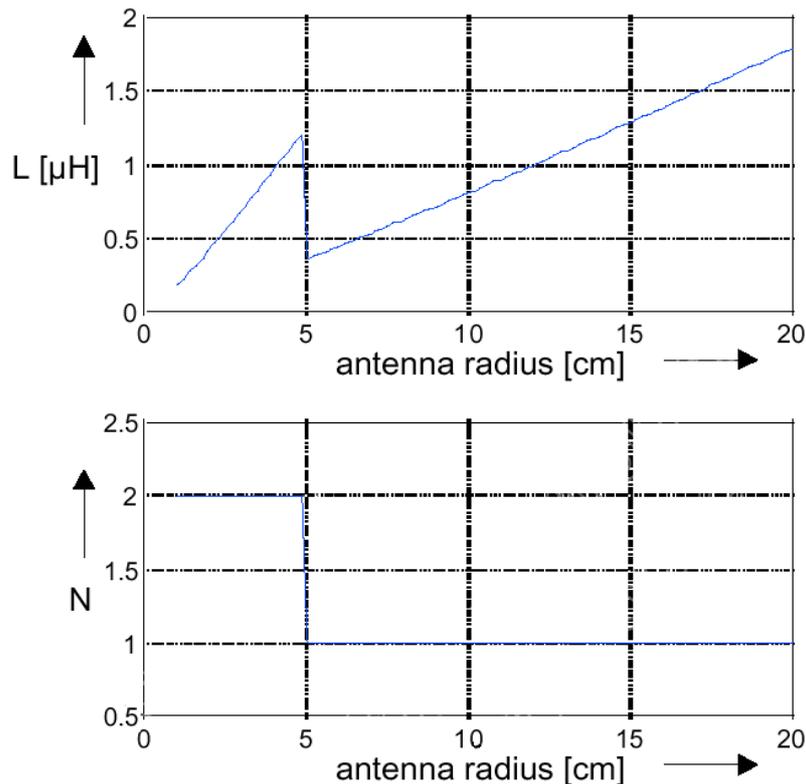


图 9.1 天线半径与电感和匝数的比

9.3 线圈电阻的估算

MIFARE®的工作频率是 13.56MHz。在这个频率范围内不足以用 DC 电阻 R_{DC} 来描述天线线圈。集肤效应 (skin effect) 不能忽略。相应的深度可以用 13.56MHz 和 $18\mu\text{m}$ 的铜物质计算。

不可能计算天线线圈完整的 AC 电阻 R_{ANT} 。天线的电阻由几个因素决定：物质、线路的尺寸、匝数、形状和屏蔽概念。

没有阻抗分析仪的首次天线调谐的估算可以用下面的公式：

$$R_{ANT} = 5 \cdot R_{DC}$$

注意：这个公式是由已经设计好的天线得出的测试结果。我们建议用阻抗分析仪精确地测量 R_{ANT} 。