



## 读写器天线设计

上海复旦微电子股份有限公司

中国 上海

## 1. 目的与适用对象

本规范说明是产品调试指导性规范文件，适用于 FM1702SL 读写器芯片直接连接天线（无电缆）设计及调试过程。

### 1.1. 天线原理

一个完整的天线设计包括天线线圈，谐振电路，匹配电路，接收电路及 EMC 滤波电路。原理框图见图 1 所示。

### 1.2. 天线电路

天线完整的电路包括 8 个电容，2 个电感，2 或 4 个电阻和对称的天线线圈。见图 2 所示。

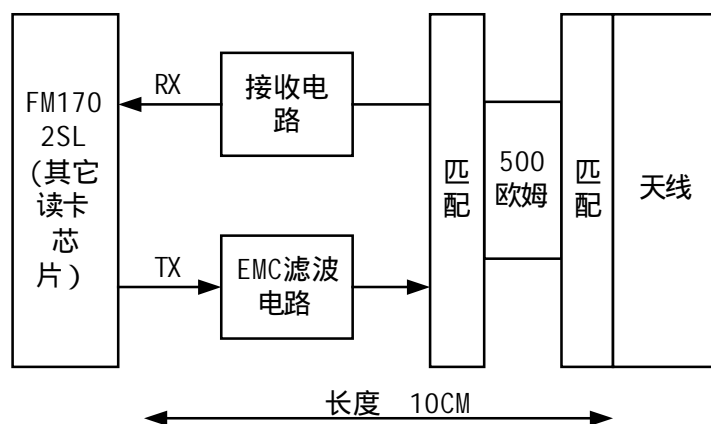


图 1 完全匹配天线原理框图（匹配到 500 欧姆）

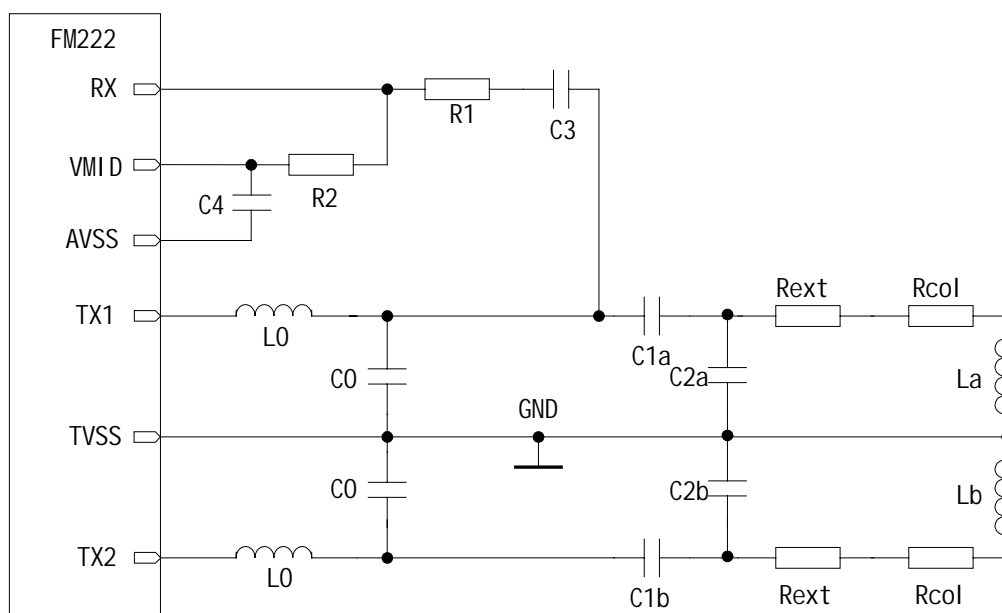


图 2 完整天线电路

电路中参数说明

| 元 器 件                           | 描 述                             |
|---------------------------------|---------------------------------|
| La、Lb、Rcoil                     | 天线线圈固有电感，电阻。                    |
| Rext                            | 调整品质因数所外接的电阻，并且要计算其损耗。          |
| C <sub>0</sub> ..C <sub>3</sub> | 用低公差、SMD 封装（0805、0603、0402）。    |
| C1a、C1b、C2a、C2b                 | 用低公差、SMD 封装（0805、0603、0402）。    |
| C <sub>4</sub>                  | XR7 电容器。                        |
| L <sub>0</sub>                  | 自感系数小，高 Q 的电感，并且满足频率范围和最大的灌入电流。 |
| R1、R2                           | 用 SMD 封装（0805、0603、0402）。       |

## 2. 基本参数设计

根据已确定参数来设计非接触卡天线电路参数，按照以下来确定非接触卡天线电路的参数。

- 设计天线线圈，测量电感 L、电阻 R 和品质因数（见章节 5.2）；
- 根据天线电感，计算谐振电容来设计谐振电路（见章节 5.3-5.5）；
- 计算外接电阻来调整谐振电路（见章节 5.6）；
- 连接谐振电路到 EMC 低通滤波电路的输出，来检查天线谐振性能（见章节 5.7）；
- 检查并调整品质因数（见章节 5.8）；
- 检查并调整接收电路（见章节 5.9）。

## 2.1. 已给定参数

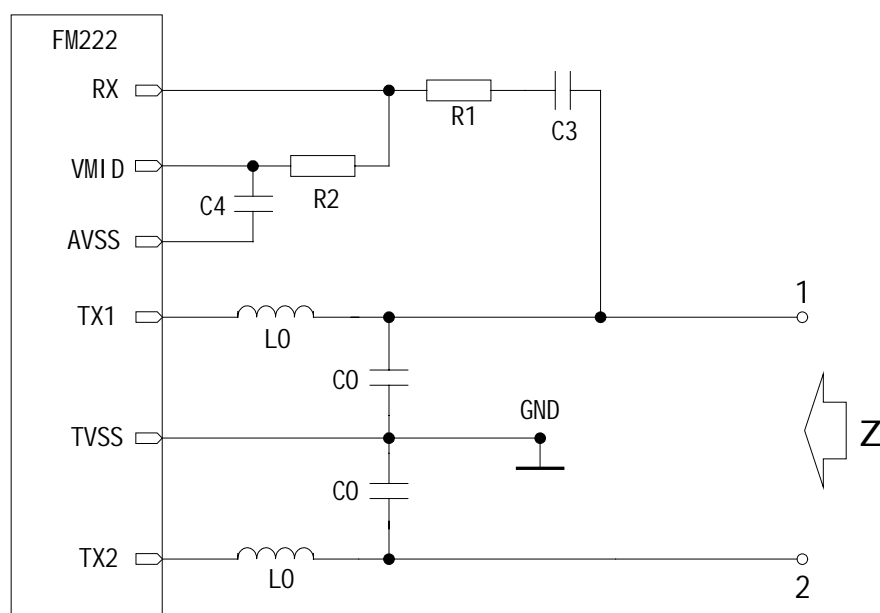


图 3 已给定电路参数 (EMC 滤波和匹配电路)

为了减少天线电路设计参数的数量，所以给定以下已确定的参数，主要是发射支路和接收支路的匹配电路中参数，见图 3 所示。

- $L0=1\mu\text{H}$  ( TDK NL322522T-1R0J );
- $C0=100\text{PF}=2\times 50\text{pF}$  ( 陶瓷 NP0，公差小于正负 2% );
- $C3=15\text{PF}$  ( 陶瓷 NP0，公差小于正负 10% );
- $C4=0.01\mu\text{F}$  ( 陶瓷 NP0，公差小于正负 10% );
- $R1=470\Omega \text{---} 2.7\text{K}\Omega$  ( 根据天线线圈的值来确定见章节 4.9 );
- $R2=820\Omega$  ;
- $Z_{\text{ant}}=Z=500\Omega$ 。

### 2.1.1. 分析给定参数电路

接收电路见章节 4.9，在这里我们主要分析发射支路匹配电路 EMC 滤波器。

实践中对阻抗匹配网络提出以下三个要求：

- 1) 实现将负载变换为功率管所要求的匹配负载阻抗，以保证射频功率管能输出所需的功率；
- 2) 能完成滤除不需要的各次谐波分量，以保证负载上能获得所需频率的功率；
- 3) 匹配网络的损耗要小，既网络的功率传输效率要尽可能的高。

匹配网络很多，有 L 型、T 型、 $\pi$  型还有电感耦合匹配网络，由 FM222 芯片输出特性知道，输出负载为  $15\Omega \text{---} 20\Omega$ ，要匹配到  $500\Omega$ 。采用 L 型 2

节匹配网络。图 4 为 L 型匹配网络的模型，X1、X2 是两个异性电抗元件，通常 X1 为电容元件，而 X2 为电感元件。这种匹配网络结构简单，只适用于  $R_S < R_L$  的匹配情况。

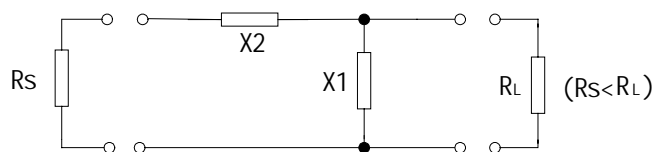


图 4 L 型匹配网络

$$Q_e = \sqrt{\frac{R_L}{R_S} - 1} = \frac{X2}{R_S} = \frac{R_L}{X1}$$

$$X1 = \frac{R_L}{Q_e} = R_L \sqrt{\frac{R_S}{R_L - R_S}}$$

$$X2 = Q_e R_S = \sqrt{R_S (R_L - R_S)}$$

其中  $Q_e$  为匹配网络的品质因素，X1 为电容元件，X2 为电感元件。

由上面公式就可以推导出  $L_0$ 、 $C_0$

$$X2 = \omega \times L_0 \Rightarrow L_0 = \frac{X2}{\omega} = \frac{\sqrt{R_S (R_L - R_S)}}{\omega}$$

$$X1 = \frac{1}{\omega \times C_0} \Rightarrow C_0 = \frac{1}{\omega \times X1} = \frac{1}{\omega \times R_L \times \sqrt{\frac{R_S}{R_L - R_S}}}$$

取  $R_S = 15\Omega$ ， $R_L = 500\Omega$ ， $\omega = 2\pi \times f$ ， $f$  为工作频率 13.56MHz。根据上面的计算公式，计算出电感  $L_0$  为 1uH，电容  $C_0$  为 133PF。图 5 为 EMC 滤波器的幅频特性其中红颜色的是 S21，绿颜色的是 S22。此时仿真结果只作为参考。

实际调试结果  $L_0$  为 1uH，电容  $C_0$  为 100PF

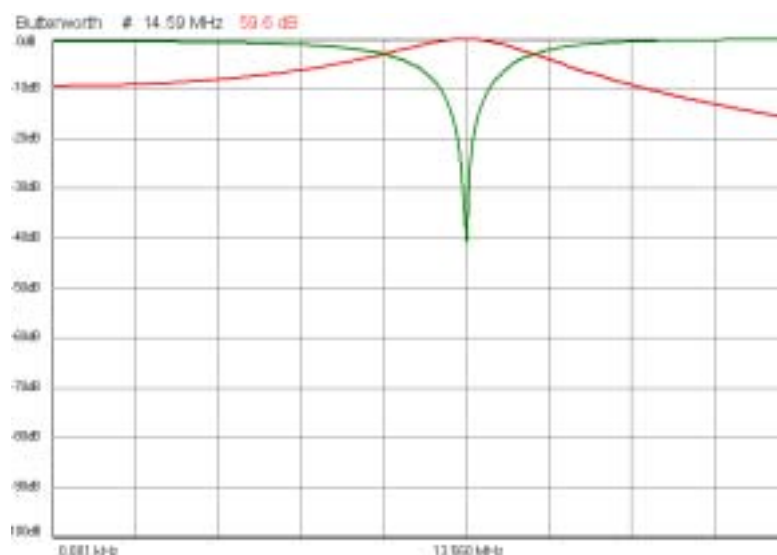


图 5 EMC 滤波器的幅频特性

## 2.2. 天线线圈的设计和测试

### 2.2.1. 射频卡和读写器的能量信息交换及互感原理

能量的传送为单向，数据的传送则为双向。读写器上的天线和卡上的天线可以看成一互感系统，天线线圈结构也可以解释为变压器（变压器耦合），设读写器上天线和卡上天线的互感系数为  $M$ ，则根据互感原理得到：

$$MI = N_1 \Phi$$

式中： $N_1$  为非接触卡中天线圈圈数， $\Phi$  为穿过卡上天线中的磁通量， $I$  为流过读写器天线的电流。

设天线是半径为  $R$  的圆形，根据毕奥-沙伐尔定律，在过圆形天线圆心且垂直天线平面的线轴上的磁感应强度为：

$$B = \frac{\mu_0 I N_1 R^2}{2\sqrt{(R^2 + X^2)^3}}$$

其中： $R$  为读写器上天线的半径， $N_1$  为读写器天线线圈圈数， $X$  为非接触卡上天线到读写器上天线的距离， $I$  为流过读写器天线的电流，

$$\mu_0 = \frac{1}{\epsilon_0 c^2} = 4\pi \times 10^{-7} \text{ (N/A}^2\text{)} \text{ 为真空磁导率。}$$

由法拉第定律知道，感应电动势  $V = -N \frac{d\Phi}{dt}$ ，而磁通量  $\Phi = \int B \cdot dS$ 。

$$\begin{aligned}
 \text{非接触卡天线上的感应电动势 } V &= -N_2 \frac{d\Phi_{21}}{dt} = -N_2 \frac{d}{dt} \left( \int B \cdot dS \right) \\
 &= -N_2 \frac{d}{dt} \left[ \frac{u_0 i_1 N_1 R^2}{2(R^2 + X^2)^{\frac{3}{2}}} \cdot dS \right] \\
 &= - \left[ \frac{u_0 N_1 N_2 R^2 S_2}{2(R^2 + X^2)^{\frac{3}{2}}} \right] \frac{di_1}{dt} \\
 &= -M \frac{di_1}{dt} \\
 &\approx 2\pi \times f N_2 S_2 Q_2 B_0
 \end{aligned}$$

其中：  $f$  为传输信号的频率，  $N_2$  为非接触卡中天线线圈圈数，  $S_2$  为非接触卡中天线线圈的面积，  $Q_2$  为非接触卡中天线的品质因数，  $B_0$  距读写器天线  $X$  处的磁场强度。

$$\text{互感系数为： } M = \frac{\mu_0 N_1 N_2 R^2 S}{2(R^2 + X^2)^{\frac{3}{2}}}$$

其中：  $R$  为读写器上天线的半径，  $N_1$  为读写器上天线线圈圈数，  $N_2$  为非接触卡中天线线圈圈数，  $S_2$  为非接触卡中天线线圈的面积，  $X$  为非接触卡上天线到读写器上天线的距离，  $i_1$  为流过读写器天线的电流，

$$\mu_0 = \frac{1}{\epsilon_0 c^2} = 4\pi \times 10^{-7} \text{ (N/A}^2\text{)} \text{ 为真空磁导率。}$$

### 2.2.2. 天线的物理实现和等效电路

读写器中的天线用于产生磁通量，而磁通量用于向非接触卡片提供电源并在读写器与非接触卡之间传送信息。因此，对读写器天线的构造有以下几个基本要求：

- 1) 使天线线圈的电流最大，用于产生最大的磁通量；
- 2) 功率匹配，以最大程度地利用产生磁通量的可用能量；
- 3) 足够的带宽，以无失真地传送用数据调制的载波信号。

根据互感原理可知，半径越大，圈数越多，读写器上天线和卡上的天线的

互感系数就越大，耦合系数也就越大，这样读写器和非接触卡片的通信距离就越大。根据国际标准，非接触卡和读写器的通信距离为 10cm。一般来说读写器的天线的半径约等于通信距离。

天线的等效电路见 6 所示，天线电感  $L=L_a+L_b$  和串联电阻  $R_L=2 \times R_{coil}$ 。设计好 PCB 板天线后，可用阻抗分析仪或 LCR 测试仪（HP4258）谐振频率在  $F=13.56\text{MHz}$  从 A 点和 B 点之间测量得到天线的电器参数 L 和 R。

天线线圈参数一般介于以下数值之间

$$L=L_a+L_b=300\text{nH} \dots 2\mu\text{H}$$

$$R_L=2 \times R_{coil}=0.5 \dots 5 \Omega$$

### 2.2.3. PCB 板天线电感、圈数、半径之间的关系

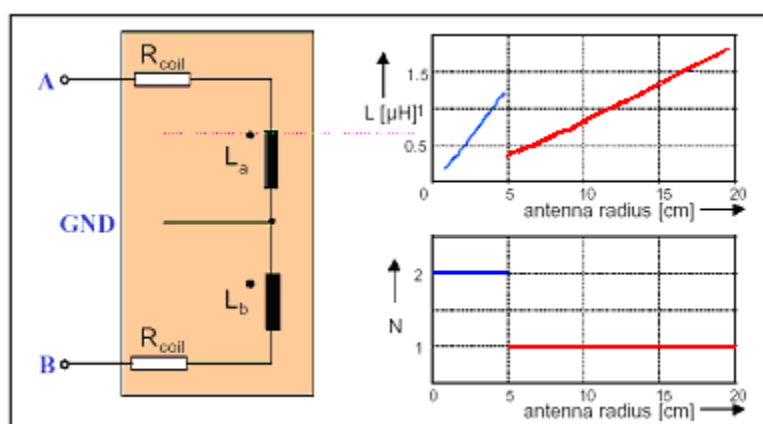


图 6 天线线圈等效电路和天线电感与圈数、半径的关系

天线线圈等效电路见图 6 的左图所表示，右图表是 PCB 天线电感、圈数和半径之间的关系。

图 5 中右上图表示，天线半径和电感的关系。蓝颜色的线表示天线半径小于 5cm 和电感的关系；红颜色的线表示天线半径大于 5cm 和电感的关系。

图 5 中右下图表示，天线半径和圈数的关系。当天线半径小于 5cm（蓝颜色）时，圈数为 2；天线半径大于 5cm（蓝颜色）时，圈数为 1

这两幅图说明了画 PCB 天线的规则，当要实现相同的电感值，如果 PCB 天线半径大于 5cm，只需 1 圈就可以满足；当 PCB 天线半径小于 5cm，要得到相同的电感值，就需要 2 圈才可以实现。

### 2.2.4. PCB 天线线圈电感的理论计算

PCB 天线有圆形和矩形两种情况，线圈电感计算公式如下：

$$L[\text{nH}] = 2 \times l[\text{cm}] \times \left( \ln\left(\frac{l[\text{mm}]}{D[\text{mm}]}\right) - K \right) \times N^{1.8}$$

其中：L 为天线线圈的电感；



$l$  为天线线圈一圈的长度；

$D$  为天线线圈直径或导体的宽度；

$K$  为天线线圈外行因子(  $K=1.07$  为圆形天线 , $K=1.47$  为矩形天线 )；

$N$  为天线线圈圈数；

## 2.3. 外接电阻

天线线圈的品质因数通常定义是

$$Q = \frac{\omega \times L}{R_L} \text{ 或 } R_L = \frac{\omega \times L}{Q}$$

所以，整个电阻就是

$$R = 2 \times (R_{\text{ext}} + R_L) = 2 \times R_{\text{ext}} + 2 \times R_{\text{coil}}$$

一般取品质因数  $Q=35$  ( 虽然 I-编码通常用高品质因数，FM1702SL 需要  $Q$  小于 40 )，

外接电阻  $R_{\text{ext}}$  被计算出来

$$R_{\text{ext}} = \frac{R_L - R}{2} = \frac{\omega \times L}{2Q} - R_{\text{coil}} \quad ( = 2 \times \quad \times 13.56\text{MHz} )$$

忽视其它方面的影响，这个计算值仅作为估计值使用，但是估计值在下面计算匹配电容将要用到。

在后面 5.8 章节调整品质因数时，将得到外接电阻的更准确的值。

## 2.4. 串并联电容的确定

一般说来，天线是有一定负载阻抗的谐振回路，读写器又具有一定的源阻抗。为了获得最好的性能，必须通过无源的匹配回路将线圈阻抗转换为源阻抗。图 2 中  $C1a$ 、 $C1b$ 、 $C2a$ 、 $C2b$  就起到谐振和匹配作用，由于天线线圈、谐振电路、匹配电路是对称，所以可以将图 2 完整天线简化为图 7 所示。根据串、并联阻抗等效互换与回路抽头时的阻抗变换，可以推导出下面公式。

在确定天线线圈电感、电阻 ( 包括外接电阻 )，现在根据公式计算并联电容  $C2$  和串联电容  $C1$ 。

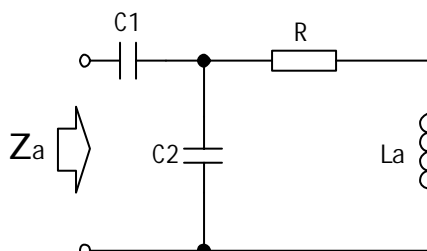


图 7 简化天线等效电路

$$C_2 = C_{2a} = C_{2b} = \frac{1}{\omega \times \left( \sqrt{\left( \frac{\omega L_a}{1 - R/Z_a} \right)^2 - \frac{R^2 + \omega^2 L_a^2}{1 - R/Z_a}} + \frac{\omega L_a}{1 - R/Z_a} \right)}$$

$$C_1 = C_{1a} = C_{1b} = \frac{R^2 + (\omega L_a - 1/\omega C_2)^2}{\frac{\omega L_a}{C_2} (1/\omega C_2 - \omega L_a) - \frac{R^2}{C_2}}$$

其中  $L_a = L_b = L/2$ ,  $Z_a = 500 \Omega$ ,  $\omega = 2\pi \times f = 2\pi \times 13.56 \times 10^6$ , 尽管计算结果和实际有所偏差, 但是作为以后调谐的初始值。

## 2.5. 天线电路的单独调试

在以上步骤中已经确定天线电路中的参数  $L$ ,  $R_{ext}$ ,  $C_{1a}$ ,  $C_{1b}$ ,  $C_{2a}$  和  $C_{2b}$ , 但是理论和实际有偏差, 所以我们将对天线电路进行调试, 来补偿测量、计算中不确定因素和器件的误差。图 9 为天线电路的单独调试的步骤。推荐使用阻抗分析仪, 但是简单方法就是用示波器和一个信号源来调试, 见附录 1 所示。

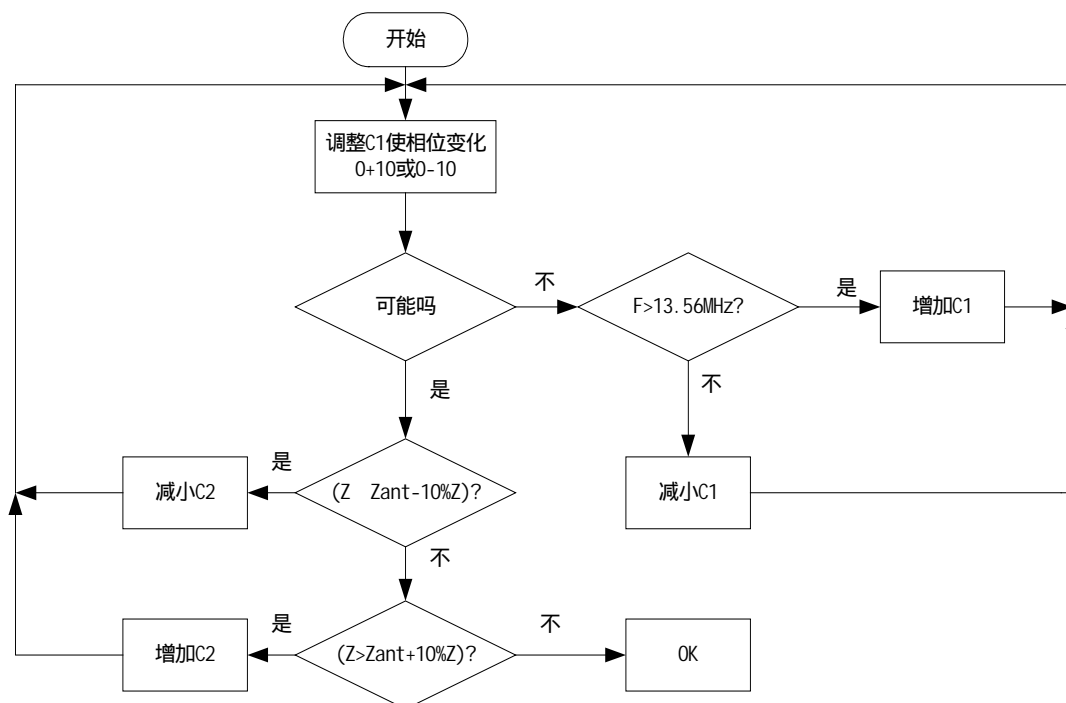


图 9 天线电路的单独调试程序

为了调试方便, 可用可调电容 (20PF), 并在  $C_{1a}$ ,  $C_{1b}$ ,  $C_{2a}$  和  $C_{2b}$  上进行调试。调试完毕后将加在  $C_{1a}$ ,  $C_{1b}$ ,  $C_{2a}$  和  $C_{2b}$  上, 天线电路完全匹配阻抗和相位见图 10。

## 2.6. 天线和读卡机联调

在天线电路单独调试之后将天线电路连接到 FM222 电路的输出的 EMC 滤波电路，由于连接器及其他因素的影响使得天线没有工作在最佳状态。为了得到更远距离的读卡性能，我们再进行细调。调试程序见 11 所示。

调试过程就是在 C2a 和 C2b 跨接一个可变电容（10PF）进行调试，调试完毕后将可调电容值的两倍分别加到 C2a 和 C2b。

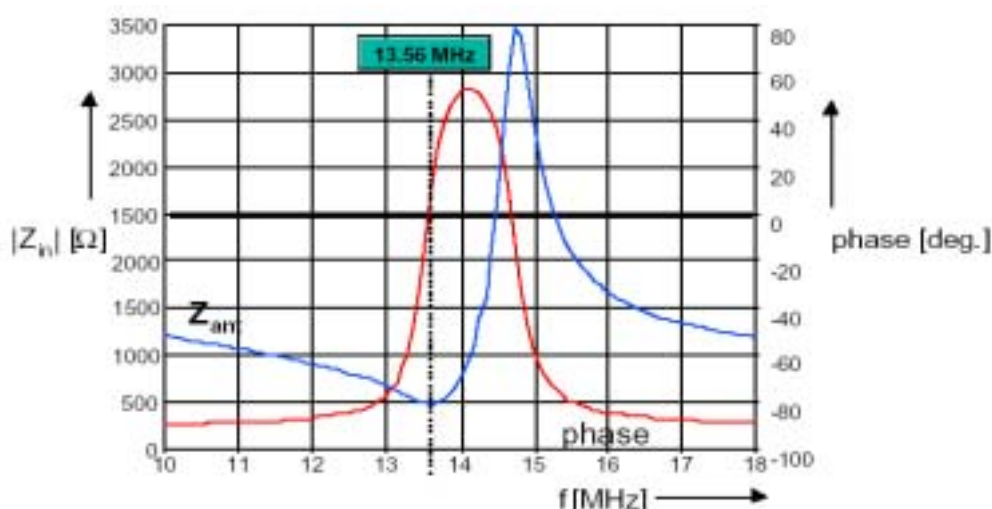


图 10 天线完全匹配的典型阻抗

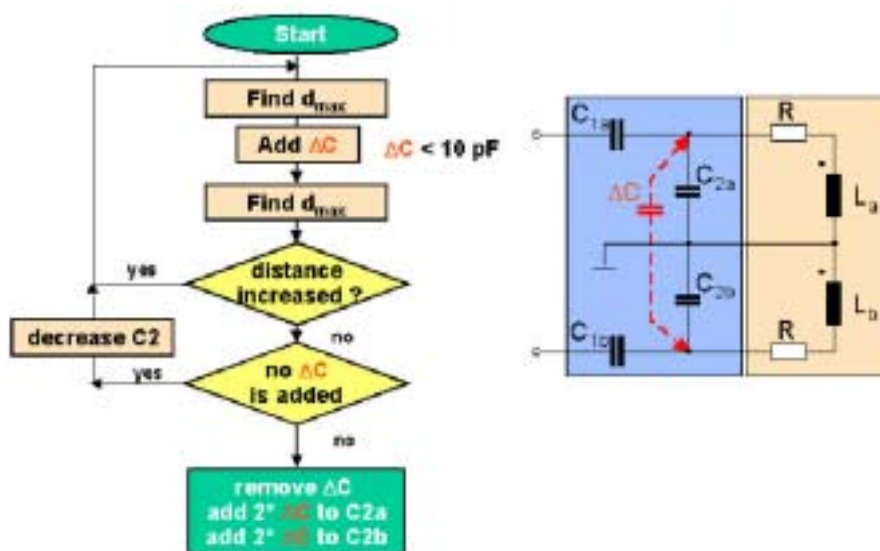


图 11 天线电路和读卡机一起调试程序

## 2.7. 调试品质因素

品质因素是天线设计中的重要参数，它直接影响调制波形的边沿及读卡的性能。一般来说，较高的品质因数的值会使天线线圈中的电流强度大些，由此改善对非接触卡的功率传送。与之相反，天线的传输带宽刚好与品质因

数值成反比例变化，选择的品质因数过高会导致带宽缩小从而明显地减弱非接触卡接收到的调制边。许多系统给出的最佳品质因数为 10~30。Q 值最高为 50~60，如果太高，卡将无法准确地识别复位响应。该系统品质因数选择为 35。测试装置的连接如图 12 所示。

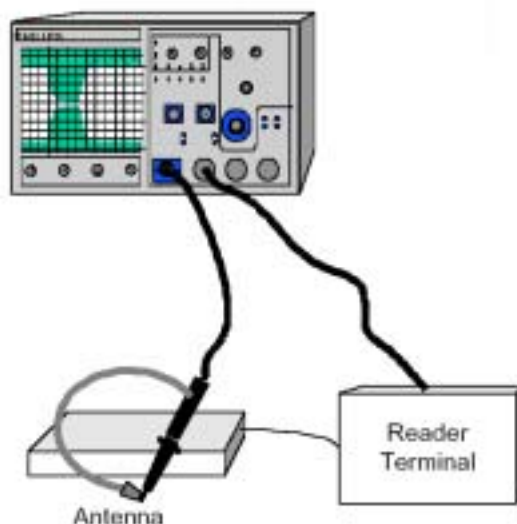


图 12 测试品质因素的装置

### 2.7.1. 测试步骤

- a) 按照图 12 方法连接，用 CH2 同步 CH1。  
通道一（CH1）：将探头的地线弯成环来感应信号。此环放在靠近天线的顶部。  
通道二（CH2）：连接探头到 FM222 的管脚 4，测量信号输出。
- b) 设置 FM222 微波输出信号选择寄存器（设置为“2”用内部编码器产生调制信号，米勒编码或“3”串行数据流，非米勒编码）。
- c) 测试信号与标准 ISO14443A 脉冲波形相对比，调试外接电阻  $R_{ext}$ ；  
测试信号见图 13，标准 ISO14443A 脉冲波形见图 14。

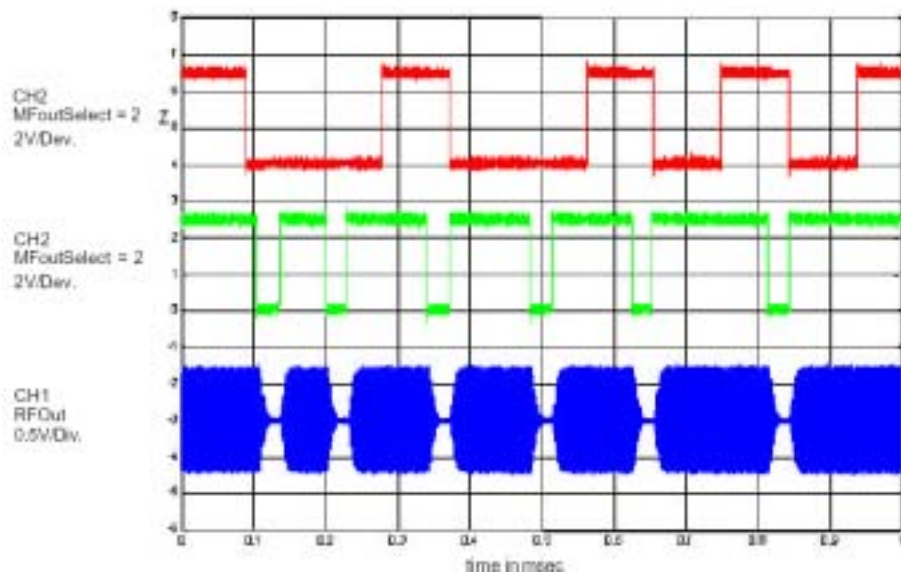


图 13 NB0307 读卡机天线测试信号

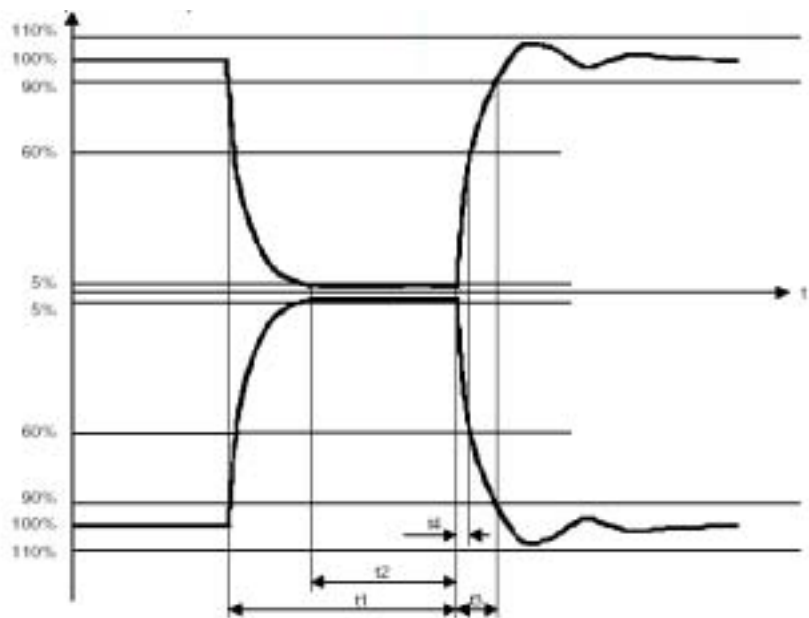


图 14 ISO14443A 标准脉冲波形

FM1702SL 测试信号与标准 ISO14443A 脉冲波形相对比，依照值见表 1。

表 1 脉冲的持续时间按照标准 ISO14443

| 脉冲长度   | T1[us] | T2[us] | T3[us] | T4[us] |
|--------|--------|--------|--------|--------|
| T1 最大值 | 3.0    | 1.4    | 1.0    | 0.4    |
| T1 最小值 | 2.0    | 0.7    | 1.0    | 0.4    |

t1-t2 的时间为信号幅度从 90% 跌到 5% 的信号时间宽度。对于 FM222 的脉冲宽度是一个确定值，我们只检测时间 T2，即信号保持在信号幅度的 5% 以下的时间。

为了保证正天线的品质因素，时间 T2 应介于： $0.7\mu s < t2 < 1.4\mu s$ 。

如果  $t_2 \geq 1.4\mu s$  , 品质因数太大 (  $Q > 35$  ),  $R_{ext}$  应该增加 ;

如果  $t_2 \leq 0.7\mu s$  , 品质因数太小 , 作用距离将不能满足 ,  $R_{ext}$  应该减小。

## 2.8. 接收电路

接收电路参数章节 4.1 已经给定。

- $C_3 = 15PF$  ( 陶瓷 NP0 , 公差小于正负 10% );
- $C_4 = 0.01\mu F$  ( 陶瓷 NP0 , 公差小于正负 10% );
- $R_1 = 470 \sim 2.7K \Omega$  ( 根据天线线圈的值来确定见章节 4.8 );
- $R_2 = 820 \Omega$ 。

由 FM1702SL 芯片的特性知道 , RX 输入管脚应满足下面两点 :

- 1) 在 RX 输入管脚 ( PIN29 ) 直流电平应保持在  $V_{mid}$  ( 由  $R_2$  和  $C_4$  决定 );
- 2) 在 RX 输入管脚 ( PIN29 ) 交流电压应介于  $1.5V_{pp} < V_{RX} < 3V_{pp}$  ( 由电阻  $R_1$  决定 )。

RX 输入管脚 ( PIN29 ) 电压调试方法 :

将一卡片放在天线有效区域的最远和最近处测出 RX 输入管脚 ( PIN29 ) 电压 , 如果  $V_{RX} > 3V_{pp}$  ,  $R_1$  应增加 ,  $V_{RX} < 1.5V_{pp}$  ,  $R_1$  应减小。

## 3. 记录

调试完成后 , 应填写附录 B 调试记录表 , 已备后面参考使用。

## 附件 A 测试天线阻抗的简单方法

如果在没有阻抗测试仪的情况下 , 用简单的方法测试天线阻抗和调试。

测试的设备有 :

- 1) 信号源一台
- 2) 带低阻抗探头的示波器一台

测试电路见图 16。示波器的两个探头 (  $C_{xprobe}$   $C_{yprobe}$  ) 一个连接函数发生器输出、另一个并联到参考电阻上。示波器上显示出一个 Lissajous 图象 , 得到其大小和相位。Lissajous 图象的角度得到大小 , 面积描述角度。

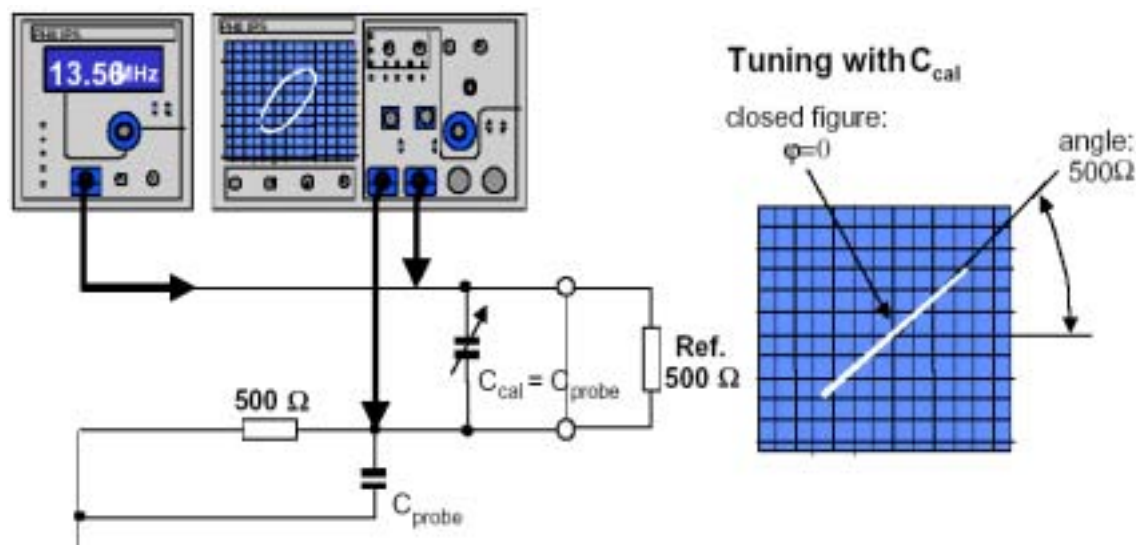


图 16 简单阻抗测试方法、标准

X 探头电容  $C_{xprobe}$  只能减少函数发生器的输出信号幅度，这对调试天线结果没有影响。Y 探头电容  $C_{yprobe}$  影响相位的偏移，相位的改变引起 Lissajous 图形区域的变化。为了补偿其影响。电容  $C_{cal}$  并联成匹配网络。

调试程序由以下两步组成：

- 步骤一：校准

为了校准，采用高精度 500 Ω 参考电阻来代替天线，校准程序见图 16

函数发生器应设置为：

波形：正弦波

频率：13.56MHz

幅度：2V-5V

调整可变电容直到 Lissajous 图形完全闭合，标志相位为 0。此时可变电容  $C_{cal}$  电容值就等于电容  $C_{yprobe}$ 。Y 探头的电压值标志相位和 X 探头振幅就是函数发生器电压的一半

注意：

- a) 如果 X 探头的刻度接近 Y 探头刻度的 2 倍（比如：X 刻度：2V/DIV 和 Y 刻度 1V/DIV）Lissajous 图形角度将为 45 度；
- b) 避免将探头的地线弯成环使从天线耦合能量减小，见图 17 所示。

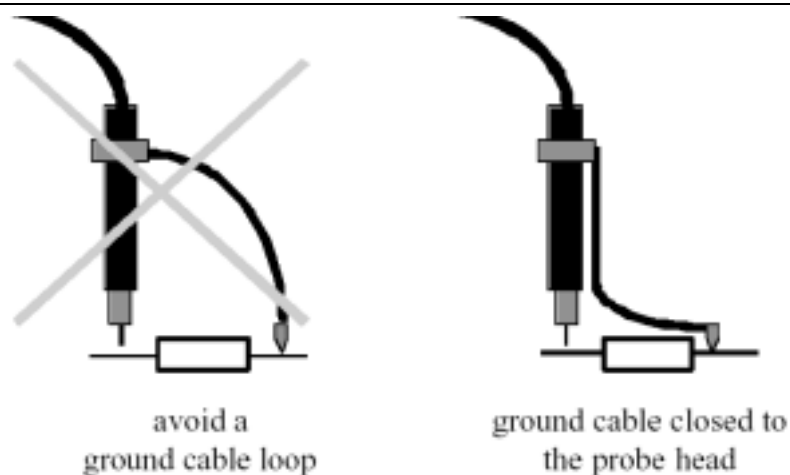


图 17 探头的连接方法

● 步骤二：调试程序

校准之后，参考电阻被天线电路  $Z$  代替见图 18。匹配网络通过调整可变电容  $C_1$  和  $C_2$  直到 Lissajous 图形完全闭合，图形角度正好等于校准步骤中的角度，这样天线阻抗  $Z=2Z_{ant}=500\ \Omega$ 。

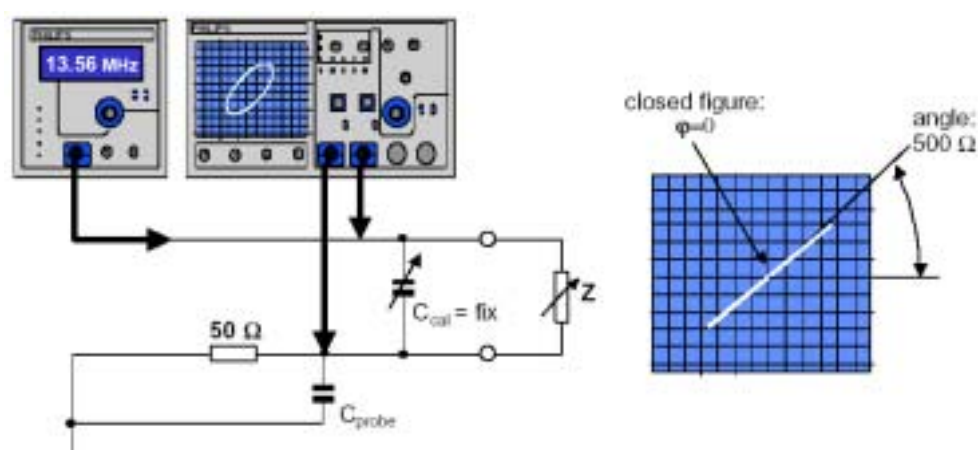


图 18 简单阻抗测试方法

图形解释：

- a) 图形没有闭合表示  $X$  和  $Y$  的相位还没有等于零；
- b) 如果相位等于零，图形将会完全闭合；
- c) 如果角度大于  $45^\circ$ ，天线阻抗  $Z$  大于  $500\ \Omega$ ；
- d) 如果角度小于  $45^\circ$ ，天线阻抗  $Z$  小于  $500\ \Omega$ 。