

三频小型化倒 F 天线设计

宋涛

摘要: 本文设计的三频小型化倒 F 天线是工作在 GSM/PCS/ISM 三个频段的。最后通过仿真得出此三频天线的各个参数标准符合设计所需要的。这个天线另一个优点就是使用的是一个同轴探针馈电, 结构比较简单且符合小型化的设计要求。

关键词: 三频特性; 平面倒 F 天线; U 型槽

Abstract: The novel designed three frequency inverted F antenna miniaturization is work in GSM/PCS/ISM three frequency bands. Finally, all parameters of the simulation it is concluded that the three frequency antenna standard meets the needs of design. Another advantage is that the antenna using a coaxial probe feed, structure is simple and conform to the miniaturization of the design requirements.

Key Words: Three frequency characteristics; Planar inverted F antenna; U-shaped slot

1. 引言

目前国内外的倒 F 天线都有如下研究: 主要对 PIFA 进行多频段、宽频段和对天线中的地板特性等方面的研究。例如: (1) 可以在辐射贴片上开矩形槽并加上三个负载贴片, 并且这些负载贴片要求是容性的, 这样设计可以满足 PIFA 天线多频段的要求, 能在四个不同频段工作; (2) 用两个尺寸大小不相同的半圆形作为辐射贴片。两个半圆形贴片采用不同的馈电方式, 分别是采用同轴馈电和耦合馈电, 每个半圆形的贴片都必须要通过短路金属片与接地板连接, 为了降低天线的高度, 在其中添加了介质材料, 这样就设计了一个用于 IMT2000 的宽频带 PIFA 天线; (3) 还有一种很创新的开槽的方式就是在地板的两侧分别交叉开出 12 个矩形槽, 贴片既要向下弯曲折叠也要以蜿蜒的路径延长电流, 这样设计不仅仅增大了天线的带宽和增益, 而且使天线的尺寸更小。(4) 还有一种不同的辐射方式, 这个天线是在 PCB 板上印刷辐射单元, 贴片的后部要折叠回旋, 贴片的右侧接地短路采用的是切角形式, 对左右的贴片采用微带线进行馈电, 这样就实现了 2.4GHz 和 5.2GHz 谐振^[1]。

综上所述可知倒 F 天线的性能的影响因素很多, 比如可以在天线的辐射贴片、短路金属片, 馈电方式、接地板开槽都可以较大的改变天线的性能。所以在设计的时候要综合考虑每个部分的影响, 这样就可以设计多频段的天线。

2. PIFA 的基本理论和特性参数

PIFA(Planar Inverted F-shaped Antenna)天线就是平面倒 F 天线的英语首字母缩写, 因为天线的结构像一个倒着的字母“F”, 所以就将这种天线称为倒 F 天线^[2]。这么多年来, 倒 F 天线一直作为手机设备的天线使用, 据不完全统计超过 60% 的手机的内置天线就是平面倒 F 天线。PIFA 天线的就是采用辐射体为金属辐射单元, 外加一个接地平面作为反射, 短路金属片连接辐射单元和接地平面的结构。如图 1 所示为一个双频 PIFA 天线实物。

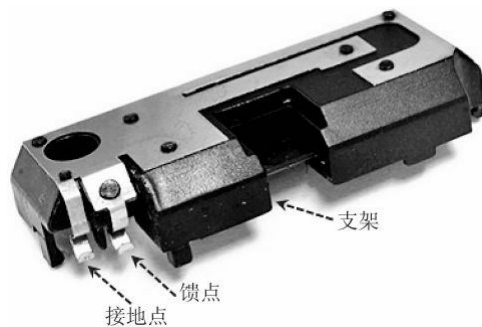


图 1 双频手机 PIFA 天线实物

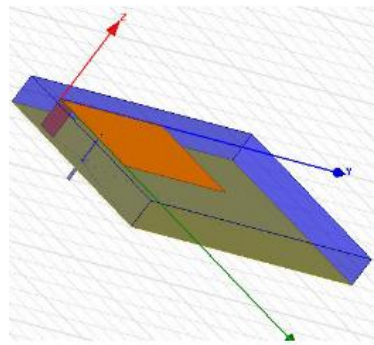


图 2 PIFA 天线设计模型

3. 利用 HFSS 进行仿真和优化

3.1 HFSS 的基本介绍

HFSS 是 ANSYS 公司开发出来的一个可以进行三维电磁仿真的软件, 因为这个软件仿真的结果较为可靠且仿真速度很快和比较成熟的自适应网络剖分技术, 所以在进行电磁仿真的时候都首先选用 HFSS^[3]。HFSS 的操作界面简洁直观, 功能无比强大的数据处理器, 求解方式是利用切方向的有限元法求解, 而且还可以仿真设计天线和天线阵列。就 HFSS 其快速和精确计算的特点, 可以计算出天线的方向性、增益、S 参数和电压驻波比等各个参数^[4]。

3.2 GSM 900 单频 PIFA 天线设计和分析

图 2 所示的是利用 HFSS 仿真设计的 PIFA 天线的结构模型, 这个模型有以下几个部分: 接地金属片、辐射单元金属片、短路金属片、同轴馈线和泡沫支架。长度为 60mm、宽度 120mm 的是设置接地平面的长宽。辐射金属片位于最上方, 根据上述的理论可知, 1/4 个工作波长要求是对与辐射金属片而言的, 必须要求和长宽之和满足这个要求, 这里辐射金属片的长度和宽度分别取为 55mm 和 32mm。为了能获得一个较好的天线带宽的性能, 所以对天线的高度取为 10mm。这个 PIFA 天线使用内外半径分别为 0.25mm 和 0.59mm 的同轴馈线。在辐射金属片和接地平面之间填充 Rohacell 射频泡沫, 此种材料介电常数较低对整个平面倒 F 天线的三频、回波损耗和带宽性能无太大影响, 所以在这里起到一个支撑的作用。

PIFA 天线的性能随着天线各个结构参数的变化而变化, 从后期的参数优化的方便来考虑, 在创建模型的时候的一些参数利用一系列的变量来定义的。其中, 以长度 $L1$ 和宽度 $W1$ 的辐射金属片在平面上的一顶点作为坐标的原点。天线的高度用变量 H 表示。辐射金属片的正下方就是以变量是 $(-Xg, -Yg, -H)$ 为顶点的接地平面, 其长度和宽度分别用变量 Lg 和 Wg 来表示。在接地平面和辐射单元的中间填充的是跟接地平面的大小一致的射频泡沫。在辐射金属片的最左侧就是与原点距离为 Xs 的短路金属片。短路金属片宽度 SW 表示, 其长度即为天线的高度 H 。同轴馈线就是位于辐射金属片的左半部分的中间位置, 在辐射金属片上的圆心坐标可以表示为 (Xf, Yf) , Xf 与 $W1$ 的关系是 $Xf=W1/2$ 。另外分别用变量 $r1$ 和 $r2$ 表示同轴线的内径和外径。表 1 所示为当前设计中所定义的变量名称、变量表示的参数意义和刚开始设置的初值。

表 1 变量定义

变量定义	变量名	变量初始值
天线高度	H	10mm
辐射金属片 x 方向上的距离	L1	55mm
辐射金属片 y 方向上的距离	W1	32mm
接地平面顶点 x 坐标	Xg	10mm
接地平面顶点 y 坐标	Yg	5mm
接地平面 x 方向上的距离	Lg	120mm
接地平面 y 方向上的距离	Wg	60mm
同轴馈线圆心坐标在 x 上的值	Xf	W1/2
同轴馈线圆心坐标在 y 上的值	Yf	5mm
短路金属片与辐射金属片上顶点的距离	Xs	0mm
短路金属片的宽度	SW	6mm
同轴线内径	r1	0.25mm
同轴线外径	r2	0.59mm

(1) 查看天线的谐振频率

如图 3 所示的是天线的谐振频率和带宽。图中所反映的信息是：天线的谐振点的位置在 0.92GHz 这个地方，对应的带宽约为 101MHz，即相对带宽约为 11%。从理论上可以看出来该仿真设计的天线满足 GSM 900 这个频段要求。

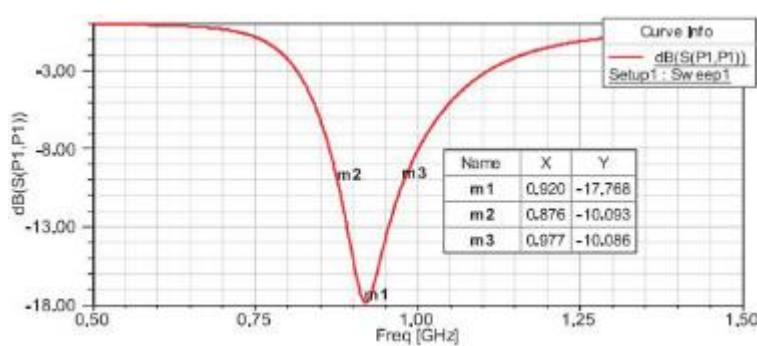


图 3 回波损耗 S11 的扫频分析结果

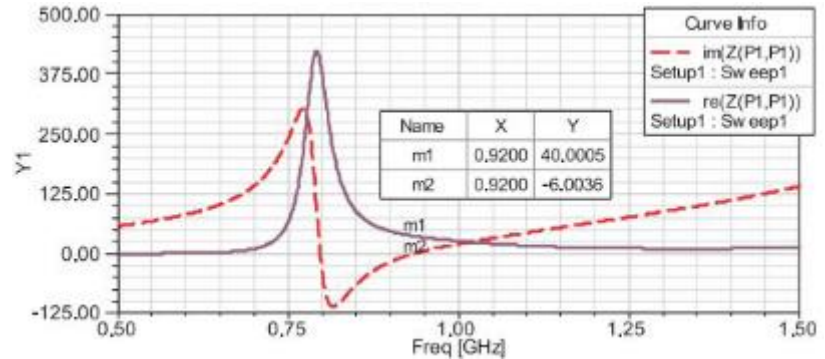


图 4 输入阻抗结果图

(2) 查看天线的输入阻抗

在直角坐标系下和 Smith 圆图下分别查看天线的输入阻抗随频率的变化关系。如图 4 所示是天线输入阻抗结果报告，从报告中可以看出在中心频率为 0.92GHz 时，天线的输入阻抗为 $(40+j6) \Omega$ 。

3.3 GSM 900 和 DCS 1800 双频 PIFA 天线设计和分析

在已经建立的 GSM 900 单频 PIFA 天线模型的基础上进行修改：在其辐射金属片上开出宽度为 2mm 的 U 型槽来实现双频工作的。如图 5 所示是双频 PIFA 的 HFSS 模型。在这个模型中，U 型槽的缝隙宽度用变量 W_{slot} 表示，U 型槽的长度和宽度分别用变量 $L2_{slot}$ 和 $L1_{slot}$ 表示，基准点位置坐标用变量表示为 (X_{slot}, Y_{slot}, H) 。这样可以通过改变变量 $L1_{slot}$ 、 $L2_{slot}$ 和 W_{slot} 来改变 U 型槽的大小，通过改变 U 型槽的位置，从而方便天线的仿真调试，以及分析 U 型槽的大小和位置对天线性能的影响。

在设计中，U 型槽主要改变电流回路路径，实现天线在 DCS 1800 频段的工作。从理论上讲，U 型槽长度 $L2_{slot}$ 和宽度 $L1_{slot}$ 之和约为 $1/4$ 个工作波长，然而在实际设计时，谐振频率会受到天线高度、短路金属片的宽度、U 型槽的位置等多种因素的影响，没有一组准确的理论值，需要不断地调试才能得到最终的结果。在这里， W_{slot} 的初始值取 2mm， $L1_{slot}$ 和 $L2_{slot}$ 的初始值分别取 27mm 和 23mm， Y_{slot} 的初始值取 43mm，U 型槽位于辐射贴片的中央，所以 X_{slot} 的值用变量表达式 $(W1-L1_{slot})/2$ 表示。利用 HFSS 的数据处理模块来查看天线的谐振频率，如图 6 所示。从结果报告图中可以看出，设计的 PIFA 天线有两个谐振频率，分别是 824MHz 和 1803MHz。与单频设计结果相比较，在辐射金属片上开槽后，可以成功引入 1800MHz 左右的高频谐振点，但是开槽也影响了天线的低频谐振点，所以为了使双频平面倒 F 天线符合一个工作在 GSM 频段和一个工作在 PCS 频段，由最初的 920MHz 变成现在的 824MHz。为了提高低频谐振点，使天线工作在 GSM 900 频段，需要适当减少辐射贴片的长度值 $L1$ ，把 $L1$ 由之前的 60mm 减小到 53mm。同时，为了降低高频谐振点，需要适当增加 U 型槽的长度值 $L2_{slot}$ ，由原先的 23mm 增加到 25mm。微调参数后的 S_{11} 扫频分析结果如图 7 所示。

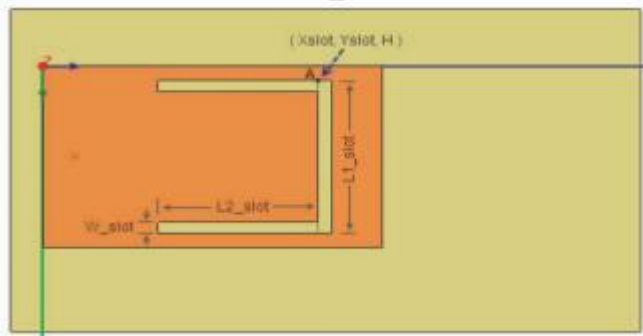


图 5 双频 PIFA 天线模型的俯视图

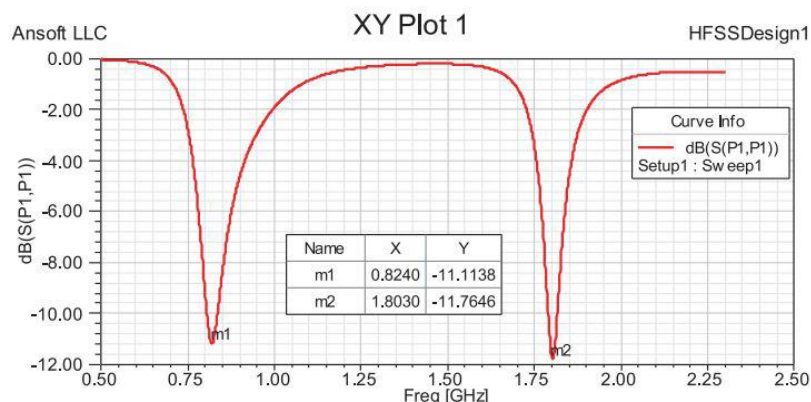


图 6 S11 的扫频分析结果

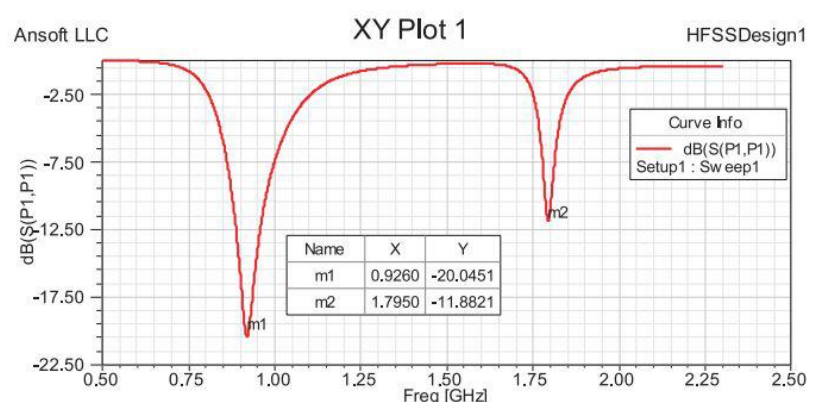


图 7 微调后的 S11 扫频分析结果

3.4 GSM、DCS 和 ISM 三频 PIFA 天线设计和分析

在 GSM 900 和 DCS 1800 双频的基础上,在已有的 U 型槽内部再开出一个宽度为 2mm 的 U 型槽来实现三频。如图 8 所示是三频 PIFA 的 HFSS 模型图。模仿上一个 U 型槽的开槽办法设置标准点坐标为 (X_LU,Y_LU,H),宽度依然是 W_slot,U 型槽的长度和宽度分别是 LU2 和 LU1。通过改变变量 LU1、LU2 和 W_slot 来改变 U 型槽的大小,通过改变变量 X_LU 和 Y_LU 来改变 U 型槽的位置。

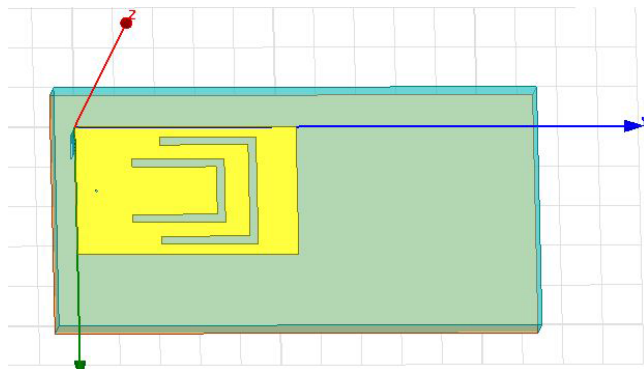


图 8 三频 PIFA 天线的仿真模型

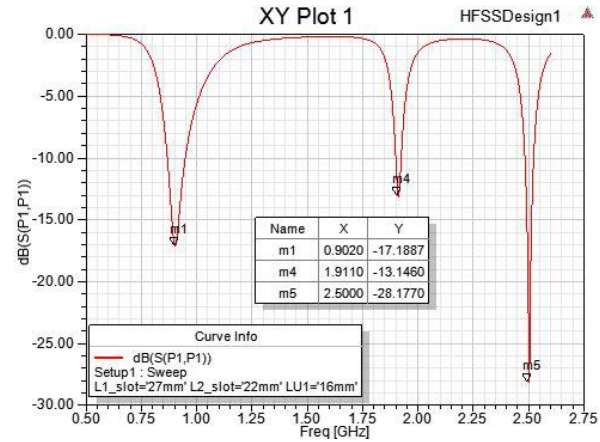


图 9 S₁₁ 的扫频分析结果

查看天线的谐振频率及天线的带宽,如图 9 所示。从结果报告图中的确可以产生三个频率谐振点,第一个谐振点的中心频率是在 0.90GHz 这个位置,对应的回波损耗是-17.18dB;第二个谐振点的中心频率是在 1.91GHz 这个位置,对应的回波损耗是-13.14dB;第三个谐振点的中心频率是在 2.50GHz 这个位置,对应的回波损耗是-28.17dB。理论上满足三频 PIFA 天线的基本要求。最后通过不断的优化参数,使之满足三频天线的实际要求,回波损耗小于-10dB,谐振频率也满足 GSM、PCS、ISM 的要求^[5]。

3.5 改进三频 PIFA 天线方案

上节仿真设计的三频 PIFA 天线虽然满足论文题目的基本要求,但是学校的制作工艺和微波材料有限,设计的三频天线在学校无法加工。为了可以将设计仿真的三频天线做出实物来,开始改进上节的天线的模型。将使辐射金属片和接地板平行的射频泡沫材料改成空气,但是这样就缺少支架了,所以在辐射金属片和接地板上开了四圆孔架起来四个圆柱体,方便采用塑料支柱进行支撑。辐射单元是一层薄薄的金属片,但是学校是无法加工薄层的金属片。所以在上层用了一个 Rogers 4350 微波板上雕刻了两个 U 型的辐射单元金属片,这样就应该可以满足学校的制作工艺要求了,改进后的三频 PIFA 天线如图 10 所示。

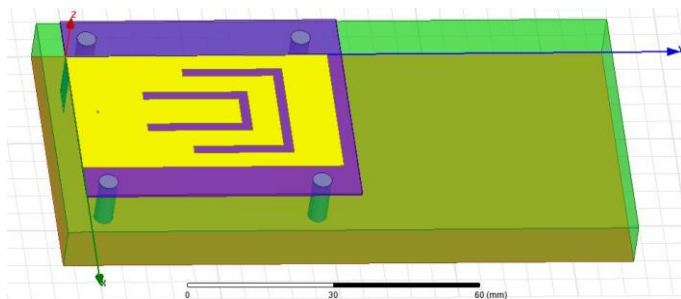


图 10 改进后的天线模型

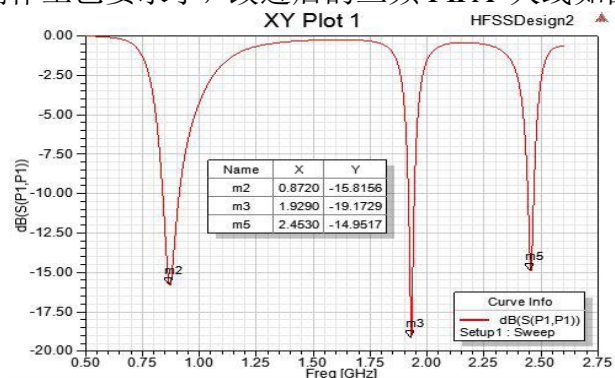


图 11 S₁₁ 参数扫描分析结果

(1)查看天线的谐振频率

图 11 所示是 S₁₁ 的扫频分析结果图。从图中可以看到第一个谐振点的中心频率是在 0.90GHz 这个位置,对应的回波损耗是-17.18dB;第二个谐振点的中心频率是在 1.91GHz 这个位置,对应的回波损耗是-13.14dB;第三个谐振点的中心频率是在 2.50GHz 这个位置,对应的回波损耗是-28.17dB。理论上满足三频 PIFA 天线的基本要求。

与图 9 所示的三频小型化倒 F 天线的 S₁₁ 的扫频分析结果相比较,三个谐振点的中心频率更符合三频 GSM/PCS/ISM 这三个频段的要求。通过分别计算这三个谐振点在-10dB 处的两个交点横坐标的差值,计算出相应的相对带宽是符合设计要求的。

查看天线三个频率的 3D 方向增益图,图 12、图 13、图 14 分别为三个频率方向的增益图。

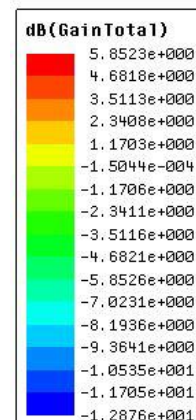
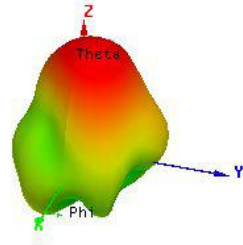
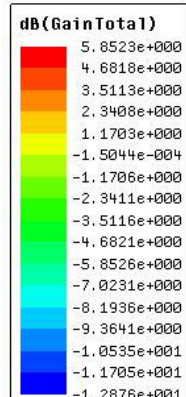
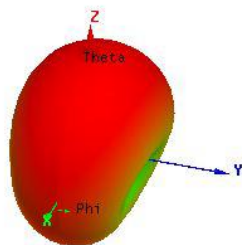
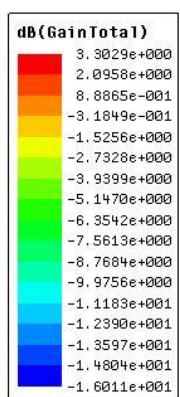


图 12 频率为 0.87GHz 的 3D 方向增益图

图 13 频率为 1.92GHz 的 3D 方向增益图

图 14 频率为 2.45GHz 的 3D 方向增益图

3.6 该三频 PIFA 天线的优点

此款双 U 型槽设计的三频 PIFA 天线可以参数优化分别对三个不同谐振频率进行调整且相互几乎没有什么干扰。如图 15 所示,改变 LU1 的大小,第一和第二给谐振点几乎没有变化,可以单独的改变 U 型槽的大小位置调节参数,这样有利于参数的优化和调节。

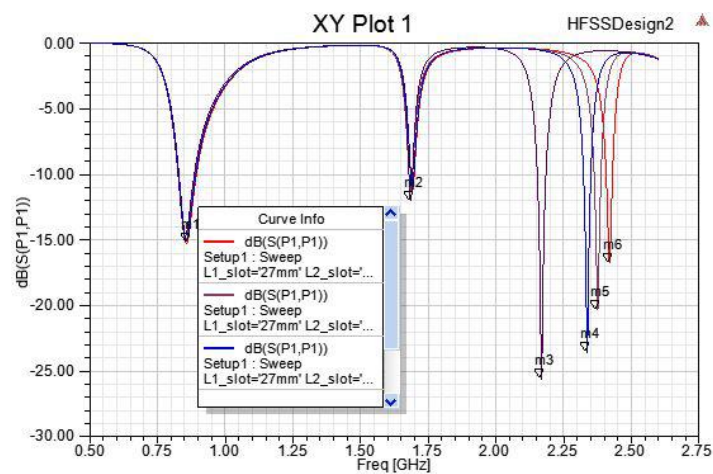


图 15 只改变 LU1 的 S₁₁ 参数分析结果图

5. 实物制作与测试

将仿真的文件模型参数拿去加工。然而对于电磁场中的大多数问题，验证设计的合理性和可行性最重要的手段是实际测试。为验证仿真结果的准确性，在完成三频倒 F 天线的设计和仿真之后，还需该天线进行一系列测试。加工实物如图 16 所示。使用矢量网络分析仪对天线实物进行测试，结果如下图 17 所示。

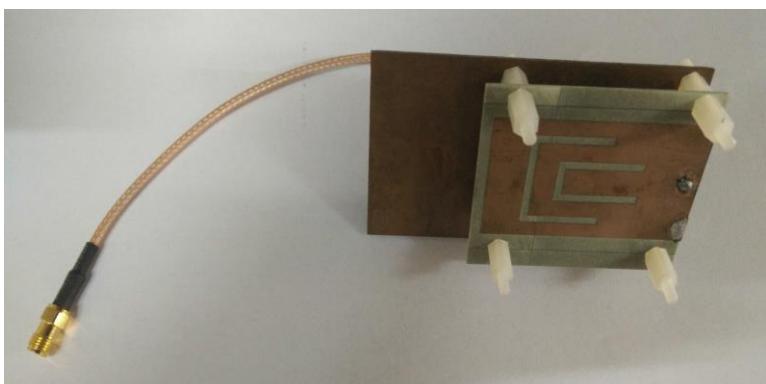


图 16 天线实物正面图

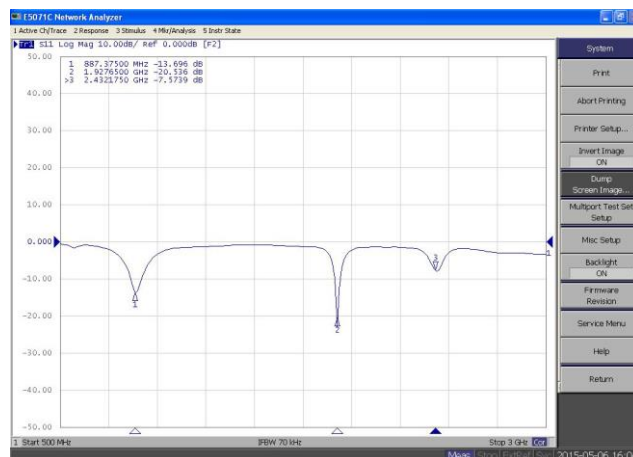


图 17 S₁₁ 参数(测试)

从图 5-4 中可以看出三个谐振点分别位于 887MHz, 1.92GHz, 2.43GHz。

5.3 对比分析

通过矢量网络分析仪对天线实物进行测试，测试结果如图 17 所示。从表 2 中可以看出，测试的结果与优化后参数计算结果有点差距，具体原因可能是加工工艺造成的。

表 2 仿真结果与测试结果对照

参数	仿真结果			测试结果		
S ₁₁ 参数	-17.18dB	-13.14dB	-18.17dB	-13.69dB	-20.53dB	-7.57dB
f ₀ 中心频率	0.90GHz	1.91GHz	2.50GHz	0.88GHz	1.92GHz	2.43GHz

6. 小结

本文设计的三频小型化倒 F 天线采用的双 U 型槽加载来实现三频的这个功能的。刚开始是通过书籍中实例模仿设计单频的倒 F 天线，然后接着在单频天线的基础上在辐射单元上开出一个 U 型槽来实现双频的功能，通过调整各个参数是双频天线符合要求。最后通过上海交大学期刊的介绍，采用了双 U 型槽来实现三频的功能，通过调整 U 型槽的位置和大小使三频天线符合要求。设计的天线的制作成本较低且结构也相对比较简单，最佳的优点就是三个谐振点可以相互不干扰，这对优化参数来说非常有利，也非常节约调试时间。

参考文献

- [1] 周秀梅.三频内置手机天线的时域有限差分法分析与设计[D].合肥: 合肥工业大学, 2006.
- [2] 张兴宇.小型化宽频带和多频带平面倒 F 天线研究[D].北京: 北京交通大学, 2008.
- [3] 李明洋.HFSS 电磁仿真设计应用详解[M].北京: 人民邮电出版社, 2011.
- [4] 李明洋, 刘敏.HFSS 天线设计[M].北京: 电子工业出版社, 2011.
- [5] 陈蕾, 张艳玲, 魏峰.一种适用于蓝牙的折叠 PIFA 天线的分析和设计[J].无线通信, 2008.