

一种矩形 Minkowski 分形微带天线设计

卫冬冬

摘要: 本课题先介绍微带天线, 再介绍分形理论的定义, 分形维数的概念及其分形结构的函数迭代生成。最后以矩形微带天线开始设计, 具体分析矩形微带线的辐射机理, 分析分形微带天线的辐射机理根据 Minkowski 分形理论设计矩形分形微带天线。

关键词: 微带天线 分形 Minkowski

Abstract: This paper first introduces microstrip antenna theory, and then introduces the definition of fractal theory, the iterative generation concept and the fractal dimension of the fractal structure. Finally the rectangular microstrip antenna radiation mechanism design, detailed analysis of rectangular microstrip line, in the radiation mechanism of fractal microstrip antenna based on Minkowski fractal theory to the design of rectangular microstrip fractal patch antennas.

Key Words: Microstrip Antenna Fractal Minkowski

1. 引言

对于现在传统上的天线, 例如单极子天线, 偶极子天线和螺旋天线都是欧式几何结构的天线。他们虽然可以满足无线通信系统的要求, 但是在天线的小型化和多频化的处理比较难, 特别是在短波波段、超短波波段天线设计时, 传统的欧式几何天线比较难设计。而且为了多频段天线时, 欧式几何天线通过多分支寄生贴片单元来实现, 但是这样的话天线就比较复杂。相对于传统的欧式几何的天线, 分形天线比较好的解决天线的小型化和实现多频技术。

对于用于宽频通讯的微带分形天线, 谢宾斯基(Sierpinski)毯天线获得多频工作性能。缩放因子为 1/3, 与一个完全几何对称的分形结构, 当迭代次数为 3, 在励磁装置的 1 倍频, 3 次三个不同频率的谐振频率的天线的工作频率, 频率的 9 倍。从测试结果的表明, 在每个频段, 回波损耗优于-10dB, 增益都大于 7dB。而且在三个工作频率都表现较好的阻抗匹配性能^[1]。

新的天线效率更高的共形通信柱(conformal communications cylinders: ComCyl)天线。这是一个薄的电路板更复杂的天线蚀刻, 最后将板压在空心套筒。在美国佛罗里达州的分形天线系统完成公布 2000 comcyl 天线, 可以防止用户接触天线有效^[2]。

2. 微带天线与分形天线

微带天线是由比较薄的金属贴片以远小于波长的间隔置于接地面上而形成的天线^[3]。微带贴片具有侧发光方向的最大辐射, 这可以通过使用不同的斑块形状的激励来实现的, 不同的斑块形状的端射辐射也可以实现。一般来说矩形贴片天线, 其长度一般为三分之一的波长到二分之一波长之间。微带贴片与接地面之间有一层介质基片。

分形, 是作为数学术语, 其主要研究分形特征的数学理论。分形理论是非线性科学的最重要的分支。相对于几何形态, 很好的与微分方程和动力系统的相结合。分形几何是一门几何学, 研究的对象也是欧式的一类比较复杂的结构的子集^[4]。分形天线是一种具有分形特征的天线, 也是一种探索天线的小型化和多频化重要的研究方面。它从结构上解决了传统天线的性能高度依赖天线的电尺寸以及参数随工作频率改变而改变的两个主要局限性并具有一个复杂形状的特别的优势^[5]。

分形天线单元在分形阵列应用中比较典型的是谢宾斯基(Sierpinski)垫片天线、康托(Cantor)集分布的阵列。而且还可以快速计算阵列方向图的迭代算法可以系统地稀疏也平面阵列实现大低旁瓣设计战略的有效设计。

3. 辐射机理

微带天线的辐射机理实际上是高频的电磁泄露, 由于微波电路不是被导体完全封闭, 那么电路中就不连续的地方产生了电磁辐射。例如, 开放式微带电路, 由于突变的结构尺寸和弯曲产生的电磁泄露不连续。相对频率的变化时电磁辐射的量也大有不同, 当低频时, 微带天线的电尺寸较小, 因此电磁泄露量比较小, 随着频率的变高, 电尺寸随之变大, 泄露量也随之变大。若经过了特殊的设计时, 即就是放大尺寸变成贴片状, 而且使其工作在谐振频率状态。其贴片状模块的辐射就明显增强, 更加辐射效率大大提高, 因而成为有效的天线^[6]。经典的型的贴片尺寸: 其长度为 L 、宽度为 W 和基片的厚度为 t , 同时用同轴馈电在贴片的左缘的中点。通常纵向的长度为 $L = \lambda/2$, 辐射主要在由宽度方向两端的边缘场产生。

4. 矩形微带天线

4.1 矩形微带天线的性能指标

微带天线最初用于导弹和火箭上的导航或引信, 由于微带天线的优点比较多, 更加适合现代化的通信设备的集体大规模的批量生产、调试、以及简化整体的生成制造。但是微带天线的最大的缺点是带宽比较窄(谐振式微带天线的带宽特别窄), 为了扩展微带天线的频带也是重要的研究课题。对于矩形微带贴片天线来说, 其介电常数 ϵ_r , 宽度和长度的比 W/L , 介质板的厚度 h , 以及介质的正切损耗为 $\tan\delta$, 且微带天线采用的是同轴线背馈。其天线的带宽受其几何尺寸的影响如表 1 所示^[7]。

表 1 影响微带天线的带宽的因素

变化因素	变化情况	品质因数	带宽	
基板厚度	h	增厚	Q_c 变大, Q_r 、 Q_w 变小	增加
介电常数	ϵ_r	越小	Q_r 、 Q_w 变小	增加
长宽比	W/L	增大	Q_r 、 Q_w 变小	增加
正切损耗	$\tan\delta$	变大	Q_d 变小	增加

对于不同的天线的性能以及不同天线的使用的功能, 天线的带宽的定义不同的。一般在工程上带宽的定义, 一种为绝对带宽, 就是天线的工作频率的最高频与最低频率的差也就是 $f_{\max} - f_{\min}$, 另一种带宽是相对带宽, 其定义为绝对带宽与其工作中心频率的比值 $(f_{\max} - f_{\min})/f_0$, 一般用于宽频天线的重要的参数。

4.2 矩形微带天线在 HFSS 中仿真

1. 微带天线的在 HFSS 中建模的概述^[8]

为了方便优化矩形微带天线的模型在 hfss 中定义着的变量如表 2 所示：

表 2 HFSS 定义的变量

	结构名称	变量名	变量值 (mm)
介质基板	厚度	H	1.6
辐射贴片	边长	L0	50
同轴馈点	距中心点向 x 的长度	Lx	5
	距中心点向 y 的长度	Ly	5

在 HFSS 中建立的模型如图 1 所示。中心点在原点上，方形贴片天线的边长沿着 x 轴与 y 轴的方向。为了方便介质板的大小是辐射片的 2 倍，参考地面和辐射贴片是理想导体。对于 50ohm 的同轴线来说建立外圈为 1.5mm，里圈为 0.6mm。求解类型：模式驱动求解器。边界条件：理想导体底板和辐射贴片、辐射边界条件的空气框。激励条件：集总端口激励。求解设置：2.9GHz 的求解频率，快速扫频，扫频范围为 1—10GHz。

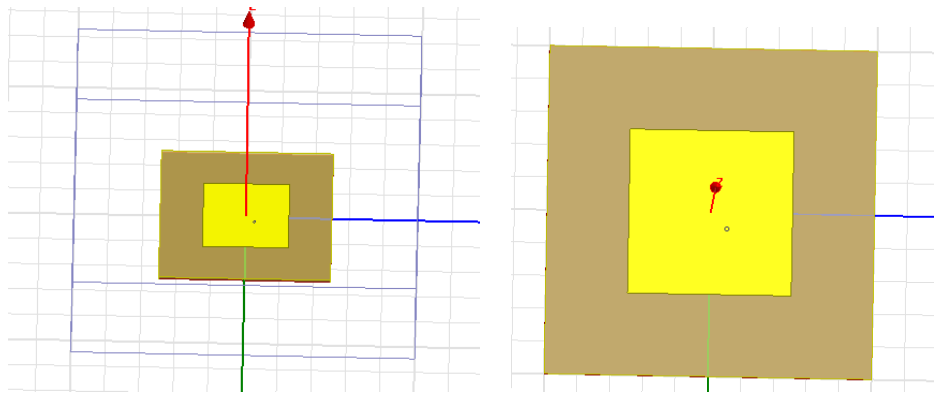


图 1 HFSS 建立的模型

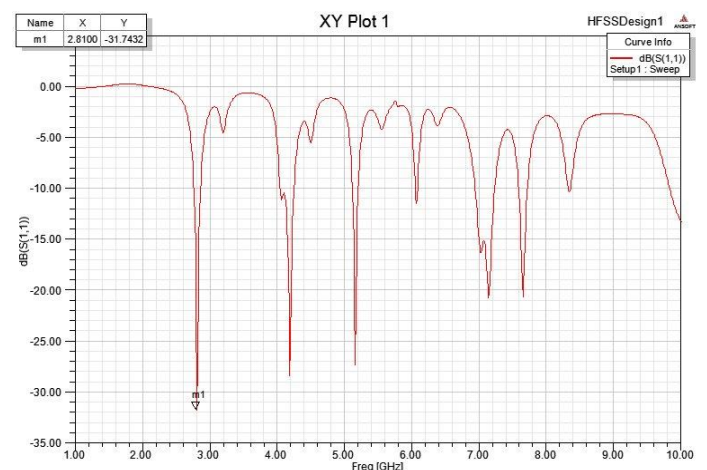


图 2 微带的天线的回波损耗

模型的仿真结果：矩形微带天线的回波损耗如图 2 所示，其工作中心频率为 2.81GHz、4.19GHz 和 5.16GHz，与理论计算时 f11 比较接近，但是 f12 和 f22 的理论误差比较大。

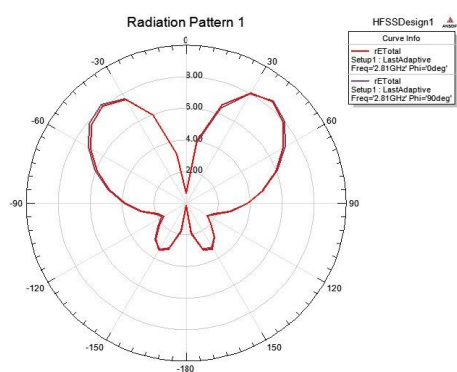


图 3 微带天线的 E 面的方向图

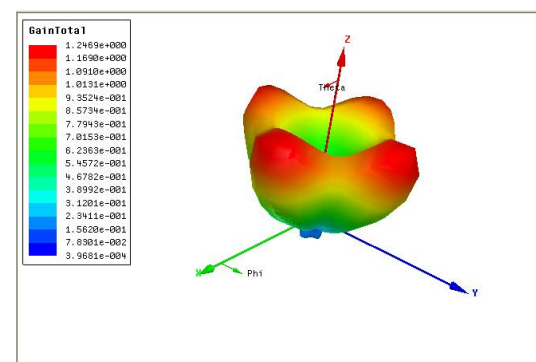


图 4 微带天线的三维增益的方向图

矩形微带天线的 E 面的方向图如图 3 和矩形微带天线的三维增益的方向图如图 4 所示，其工作频率为 f11 时，其方向图类似于偶极子天线。由于微带天线的辐射机理来看，方形微带天线天线工作在 f11 的工作频率时，在微带天线的四周都产生辐射。在四个角上面由四边的电场的叠加，部分电场相互抵消，从而在四个拐角辐射强度比较弱，从而在微带天线的三维增益图中在四边的中心产生了增益的高峰。

4.3 矩形分形微带天线

有上面的方形分形微带天线可知，其辐射的场类似于偶极子天线，为了使微带天线拟合偶极子天线，由辐射机理可知，如果对方形矩形微带天线进行分形处理。

1. 在 HFSS 中建立模型

Minkowski 分形微带天线在 HFSS 的模型，如下图 5 一阶 Minkowski 分形微带天线所示，如下图 6 二阶 Minkowski 分形微带天线所示如下图 7 三阶 Minkowski 分形微带天线所示。

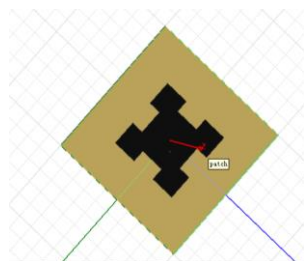


图 5 一阶分形天线

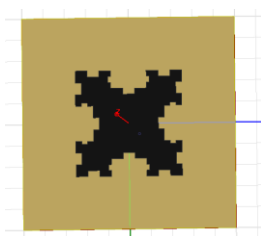


图 6 二阶分形天线

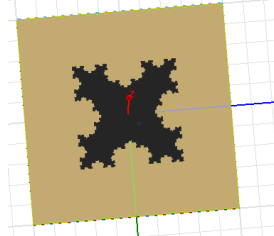


图 7 一阶分形天线

2. Minkowski 分形微带天线仿真结果

以下是各阶 Minkowski 分形微带天线的回波损耗与各阶 Minkowski 分形微带天线的 E 面的方向图及三维方向图：

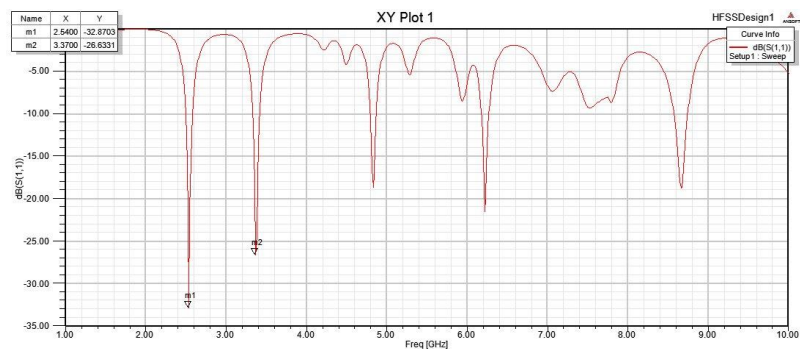


图 8 一阶天线的回波损耗

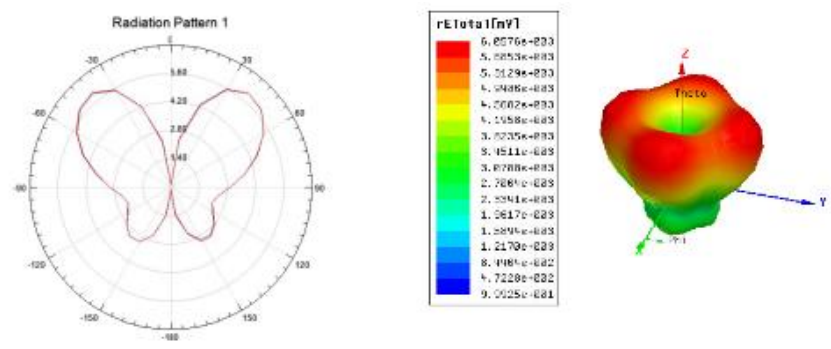


图 11 一阶微带天线的 E 面的方向图及三维方向图

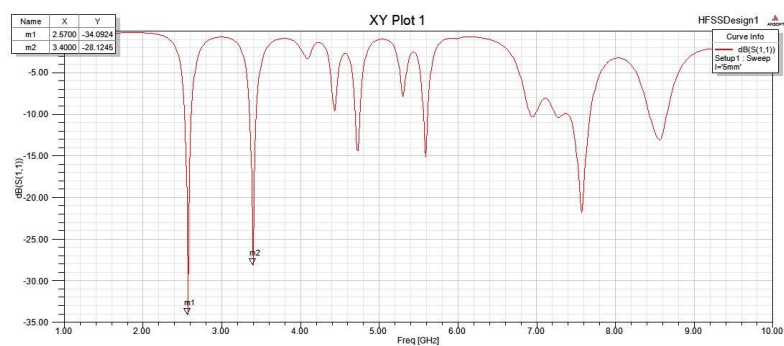


图 9 二阶天线的回波损耗

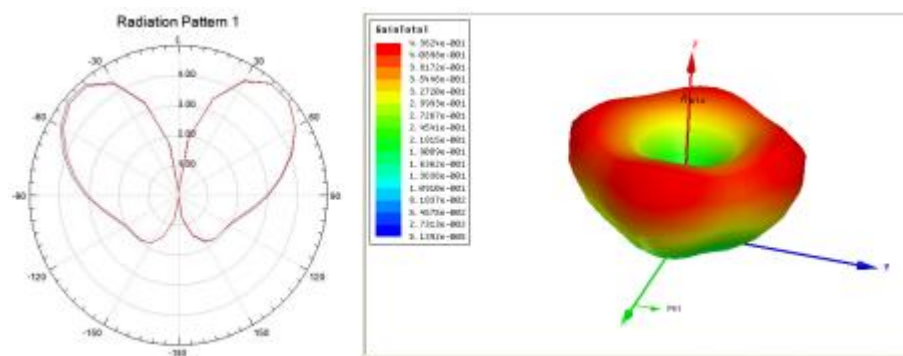


图 12 二阶微带天线的 E 面的方向图及三维方向图

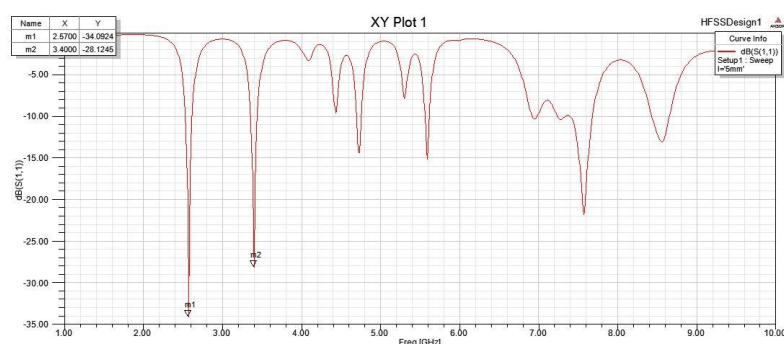


图 10 三阶天线的回波损耗

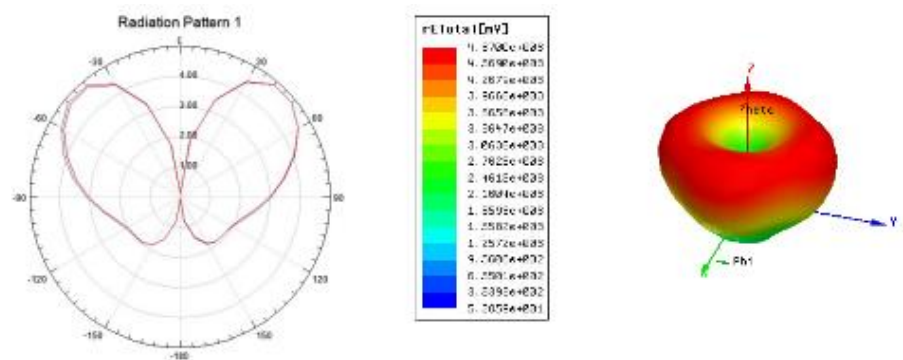


图 13 三阶微带天线的 E 面的方向图及三维方向图

一阶 Minkowski 分形微带天线的回波损耗如图 8 所示，其工作中心频率分别为 2.54GHz，3.37GHz 与上述的方形微带天线的工作中心频率有所下降。二阶 Minkowski 分形微带天线的回波损耗如图 9 所示，其工作中心频率分别为 2.57GHz，3.4GHz。三阶 Minkowski 分形微带天线的回波损耗如图 10 所示，其工作中心频率分别为 2.56GHz，3.4GHz。对应一阶，二阶和三阶来看其工作中心频率比较接近，大致相同。

一阶 Minkowski 分形微带天线的 E 面的方向图及三维方向图如图 11 所示。从图中可知在 x 轴与 y 轴中的辐射强度还是比较大，在四边上产生了辐射强度的高峰，但是相对上面的矩形微带天线来说其辐射强度的高峰比较平缓。由于方形微带天线在进行 Minkowski 分形处理时，增加方形微带天线的边，从而使天线辐射比较均匀，所以其边缘辐射比较平缓。二阶 Minkowski 分形微带天线的 E 面的方向图及三维方向图如图 12 所示，其在 x 轴和 y 轴的辐射强度相对其他相对平缓。在比较一阶微带天线的辐射强度来说比较好，更加接近于偶极子天线的方向图。三阶 Minkowski 分形微带天线的 E 面的方向图及三维方向图如图 13 所示，其方向图与二阶方向图比较接近。

4.4 微带天线的测量

在我校的实训基地制作的天线如图 14（在左上角的微带天线是方形微带天线，以逆时针方向为一阶天线，二阶天线，三阶天线，未焊同轴线），如图 15 所示为同轴线焊接微带天线，用的是介电常数为 4.4 和厚度为 1.6mm 的 FR4 双面敷铜介质板，采用的是同轴线背馈。

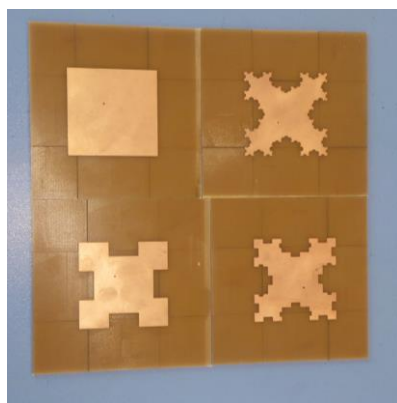


图 14 天线的实物



图 15 同轴线焊接

对加工好的实物进行测量，主要测量的是方向图和回波损耗。其工作中心频率如表 3 所示。

表 3 天线的回波损耗

名称	第一个中心频率	第二个中心频率	第三个中心频率
0 阶	2.73GHz	4.1GHz	
1 阶	1.24GHz	2.45GHz	3.2GHz
2 阶	1.24GHz	2.5GHz	3.3GHz
3 阶	1.24GHz	2.5GHz	3.32GHz

由上表可知其方形微带天线的回波损耗的工作中心频率是 2.81GHz、4.19GHz，其实际测量的为 2.73GHz，4.1GHz 其误差分别为 800MHz，90MHz 相对来说其第一个中心的误差比较大。同样在一阶到三阶 Minkowski 分形微带天线天线上出现 1.24GHz 的中心频率。一阶的天线的第二个中心频率为 2.45GHz 与仿真的出的 2.57GHz 误差相对来说比较大，至于第二个中心频率为 3.2GHz 与仿真 3.4GHz 也有一定的误差。同样的对于二阶和三阶天线来说其主要的中心频率的误差也向下下降的一些。对于这种普遍的误差的产生的应该是由于介质板的介电常数的于仿真时的介电常数不一致导成的。与其中心频率下降可知其介电常数应该大于仿真时的介电常数 4.4。

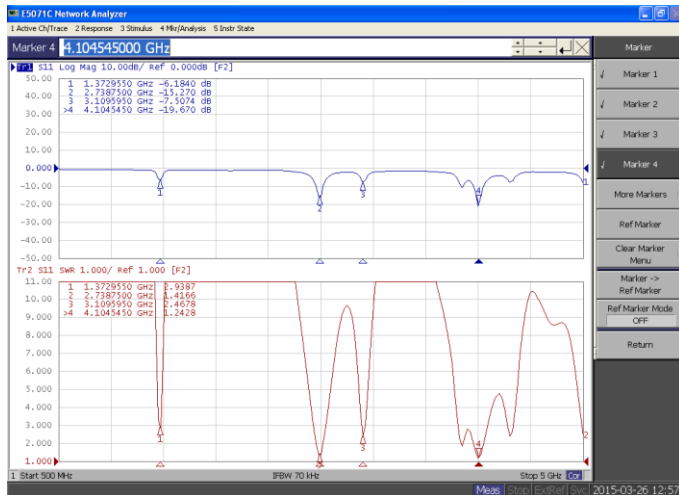


图 16 方形贴片天线的回波损耗和驻波比

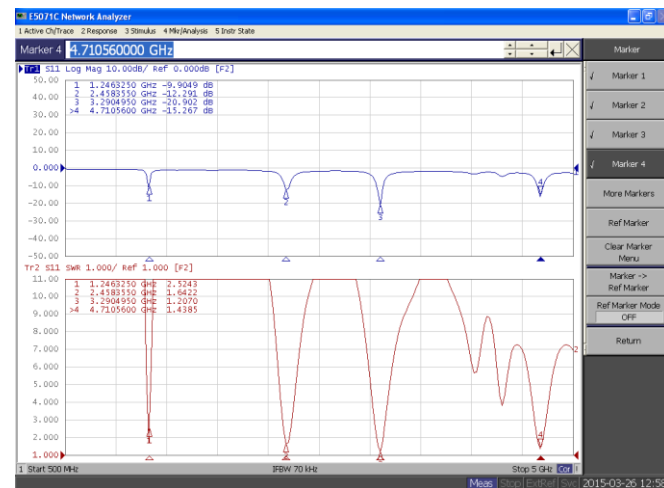


图 16 方形贴片天线的回波损耗和驻波比

上图是设计的天线在用微波矢量网络分析仪测量的回波损耗的实物图，如图 16 可知方形贴片微带天线的产生的频段共有 4 个其中第一个的中心频率为 1.37GHz 比较接近于方形天线的理论计算但是不符合仿真结果，其最大的回波损耗为 6dB 小于 10dB 可以忽略。其第二个的中心频率为 2.73GHz 与仿真的 2.8GHz 较为接近，其回波损耗为 15.2dB 大于 10dB 但是与仿真的结果 31dB 差距比较大。第三个中心频率为 3.1GHz，与理论的 2.9GHz 比较接近但是由上可知其工作频率往往向下偏移那么在其 3.7GHz 的工作频率相似，其的回波损耗也不是很高在仿真时其回波损耗比较小，可忽略。第四个回波损耗为 4.1GHz，与仿真 4.18GHz 比较接近，其回波损耗为 19.6dB 也是比较理想但是与仿真的结果误差还是比较大。

如图 17 可知一阶分形贴片微带天线的产生的频段共有 4 个其中第一个的中心频率为 1.24GHz 比较接近于上面方形天线的测量的第一个的中心频率的 1.37 符合分形结构相当于方形天线的中心频率的下降。其最大的回波损耗为 9.5dB 接近 10dB 与仿真的误差比较大极大的可能是馈电的焊接不理想从而使阻抗失配产生了新的工作频段。其第二个的中心频率为 2.45GHz 其回波损耗为 12.5dB 大于 10dB。第三个中心频率为 3.29GHz，其回波损耗为 20.9dB 也是比较理想但是与仿真的结果误差还是比较大。第四个为 4.7GHz 其回波损耗为 -15.24dB 但是相对来说比较远可忽略。

由图 18 可知其二阶天线与三阶天线的回波损耗图的大似相同。都共有三个频段分为为 1.24GHz，2.49GHz，和 3.3GHz。与一阶天线的回波损耗相比来说，第一个的工作中心频率相同回波损耗的值较为接近，其回波损耗为 9.76dB。第二个中心频率相对来说有所提高，其中心频率为 2.5GHz，可能是由于分形的介绍的增加使其边界的长度增加从而使去等效电流长度减小，使其工作频率增加。其回波损耗为 13.8dB 有所减小。第三个工作频率为 3.3GHz 其回波损耗为 18.2dB 同时大于 10dB。

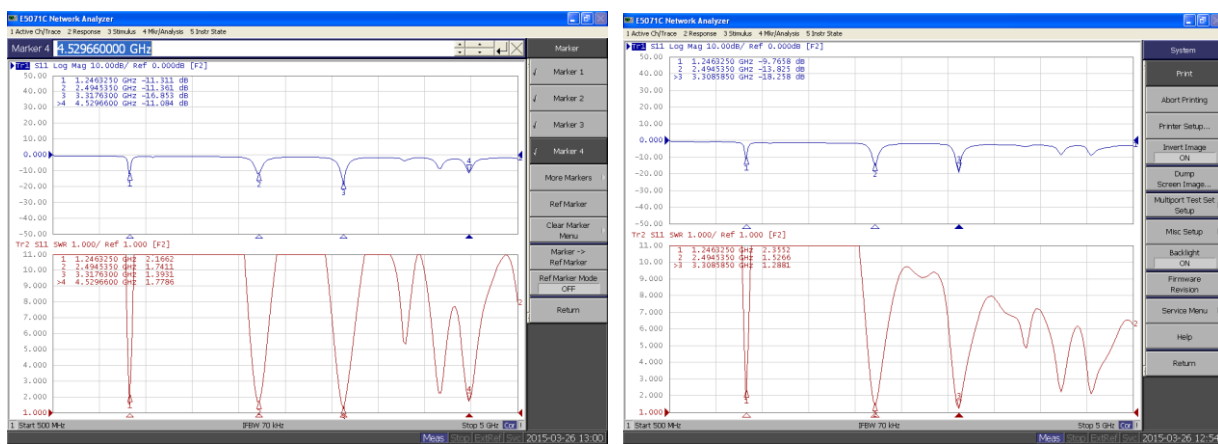


图 18 所示为二阶和三阶天线的回波损耗和驻波比

为了拟合偶极子天线，其工作频率为 f_{11} ，其方向图是最重要的参数，该天线的方向图在微波暗室的测量的天线的参数。

如图 19 方形天线的 E 面的方向图，其天线的工作频率为 f_{11} 其 E 面的方向图与普通贴片的工作频率为 f_{01} 的 E 面的方向图有很大的区别。其 E 面的方向可知与偶极子天线的方向图有一定的相似性。其天线的方向图的最大副瓣的增益为 5.04dB，波束宽度为 53.7 度，方向系数为 7.3dBi，其最大值为 53.9dB。我们测量的工作频率为 2.73GHz，其测量的结果与仿真的结果大致相似，对比可知其方向系数的相对来说有所降低其副瓣的增益也有所的提高，波束宽度也变大了。

如图 20 所示为二阶分形天线的 E 面的方向图，由图可知其方向图的产生大量的毛刺，其主要的原因是由于在天线测量的时候没有调节好微波矢量网络分析仪输出和输入的端口。从图 20 可大概判断出 E 面的方向图。其最大副瓣的增益值为 3.36dB 相对于方形的微带贴片天线的最大副瓣来说有很好的减少。其波束宽度为 32.7 度相对于方形的天线的波束宽度有一定的提高。

但是其方向系数为 7.073dBi 较差。其最大值增益为 53dB 相对来说也比较小。总体来说分形天线的 E 面的方向图相对于方形贴片天线来说有所提高，但是存在比较大误差。

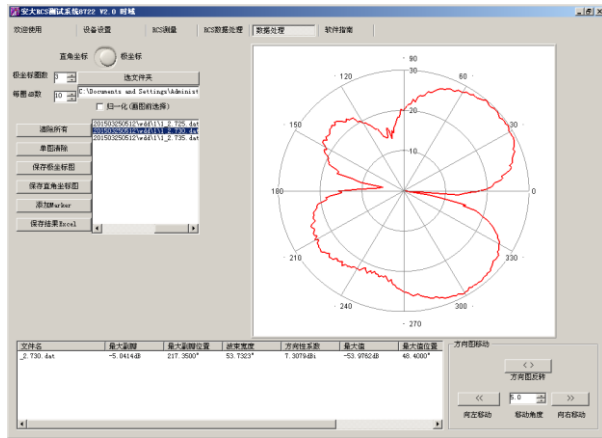


图 19 方形天线的 E 面的方向图

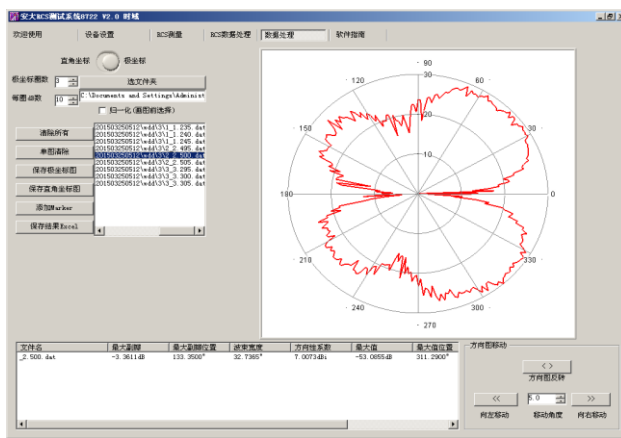


图 20 二阶分形天线的 E 面的方向图

4.5 总结

通过天线的测试可知，由其回波损耗可知实物的工作中心频率相对于 HFSS 的仿真的数据均有下降，可能是介电常数高于 HFSS 软件中的 FR4 的板材的 4.4 的介电常数。在方形微带天线的回波损耗图中可知多出了 1.24GHz 的工作频率，但是其回波损耗为 6dB 小于 10dB 的，在分形天线中也出现了 1.23GHz 的工作频率其回波损耗为 9.6dB 接近于 10dB。产生的原因可能是由介电常数与软件的板材参数不同和焊接处的并没有焊接好，以及馈点直径与仿真不同。

天线的方向图是在微波暗室所测的 E 面的方向图。由方形微带天线工作于 f_{11} 时，其方向图类似于一个蝴蝶形，相似与偶极子天线。其分形天线的 f_{11} 的工作频点时，相对于方形天线其拟合偶极子天线较好。

参考文献

- [1] 姚娜, 石小卫. 关于 Sierpinski 毯式分形天线实现多频的几点讨论[C]. 2005 全国微波毫米会议论文集:17-20.
- [2] 高艳华, 张广求; 分形天线—一种新颖的天线小型化技术及其应用[J]; 现代电子技术; 2004 年 17 期.
- [3] 钟顺时. 微带天线理论与应用. 西安市: 西安电子科技大学出版社, 1991. 06.
- [4] 潘金贵. 分形艺术程序设计[M]. 南京市: 南京大学出版社, 1998.
- [5] 刘英, 龚书喜, 傅德岷. 分形天线的研究进展[J]. 微波学报. 2002, 17(1):54-55.
- [6] 康行健. 天线原理与设计[M]. 北京市: 北京理工大学出版社, 1993 .
- [7] 郑书峰. 微带天线综述与设计实例[M]58-65.
- [8] 李明洋, 刘敏. HFSS 电磁仿真设计从入门到精通[M]. 人民邮电出版社, 2013.