

文章编号:0253-9721(2008)11-0012-05

碳纤维织物的镍铜复合镀层及其毫米波 RCS 特性

侯 伟, 潘功配, 关 华, 朱晨光

(南京理工大学 化工学院, 江苏 南京 210094)

摘要 为制备一种新型毫米波无源干扰材料, 采用化学复合镀技术在碳纤维织物表面沉积镍和铜。利用扫描电镜和 X 射线能谱仪对复合镀镍铜碳纤维织物表面进行表征, 分别测量镀镍、镀铜及复合镀镍铜碳纤维织物的表面电阻, 并应用雷达散射截面测试系统对同样尺寸的镀镍、镀铜、复合镀镍铜碳纤维织物及未改性碳纤维织物的毫米波波段 RCS 值进行测试。结果表明: 采用这种化学镀工艺所得复合镀镍铜碳纤维织物的镀覆均匀, 光泽好, 有较强的导电性能。RCS 值随着镀金属碳纤维织物导电性能的增强而增大, 复合镀镍铜碳纤维织物的 RCS 值最高, 且与 RCS 理论计算值较接近, 是一种有效的毫米波干扰材料。

关键词 碳纤维织物; 化学镀镍铜; 毫米波; 雷达散射截面

中图分类号: TS 101.3 文献标识码:A

Ni-Cu plated carbon fiber fabric and RCS specialities in millimeter wave band

HOU Wei, PAN Gongpei, GUAN Hua, ZHU Chenguang

(School of Chemical Engineering, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China)

Abstract The Ni-Cu coating was deposited on the surface of carbon fiber fabric by electroless plating process to prepare a new passive jamming material. The surface of Ni-Cu deposited carbon fiber fabric was analyzed with SEM and EDAX, the surface resistances of Ni, Cu and Ni-Cu deposited carbon fiber fabrics were measured and the binding strength of plating layer was measured by method of repeating cold and heat. The RCS values of Ni, Cu and Ni-Cu deposited carbon fiber fabrics with the same size were tested with radar cross section (RCS) measurement system. The results show that Ni-Cu deposited carbon fiber fabric has better uniformity, luster, adhesion and conducting ability. The RCS values increase with the increasing of conducting ability of metal deposited carbon fiber fabric in millimeter wave band, and the RCS value of Ni-Cu deposited carbon fiber fabric is maximal and is close to the academic vale. The Ni-Cu deposited carbon fiber fabric would be an efficient material to interfere millimeter wave.

Key words carbon fiber fabric; electroless Ni-Cu plating; millimeter wave; RCS

碳纤维具有较高的比强度、比模量和良好的润滑与耐磨损特性, 并且具有一定的导电、导热性^[1]。金属基碳纤维复合材料兼有金属和碳纤维的优点, 具有高比强度、高比模量、导电性强和韧性好等优良性能, 在航空、航天、生物材料和工业领域具有广泛的应用前景^[2]。

近 20 年来, 国外毫米波雷达在军事上的应用引人注目, 特别是毫米波近程雷达技术和精确制导武

器的发展异常迅速, 给未来战争带来了难以预计的影响, 毫米波雷达的发展推进了对抗技术的研究步伐^[3]。本文采用化学复合镀在碳纤维织物表面镀覆镍铜金属薄膜, 增强其导电性, 从而获得较大的毫米波雷达散射截面(RCS, 定量表征目标散射强弱的物理量, 称为目标对入射雷达波的有效散射截面积^[4])值, 用于干扰毫米波通信。对各种织物表面进行改性并对其电磁屏蔽效能进行研究的报导已有较

收稿日期: 2007-11-11 修回日期: 2008-08-31

基金项目: 国防预研基金资助项目(51305090302)

作者简介: 侯伟(1978—), 男, 博士生。研究方向为烟火无源干扰材料技术。潘功配, 通讯作者, E-mail:pangongp@163.com。

多^[5-6],但在碳纤维织物表面进行化学复合镀镍铜金属薄膜,并对其毫米波 RCS 特性开展研究的报导较少。本文利用化学镀技术,通过对制备工艺的优化研究,成功地在碳纤维织物表面镀覆镍铜金属薄膜,对所制备的复合织物材料的导电性、镀层结合强度以及毫米波 RCS 值进行了测试,并着重研究了镀金属薄膜碳纤维织物的毫米波 RCS 特性。

1 实验部分

1.1 材料

碳纤维织物采用东丽 T300B-3000-40B 型 J-3K 碳纤维织物,织物组织为平纹,厚度为 0.28 mm,面密度为 200 g/m²,经纬密度均为 5 束/10 mm。本文所用试剂均为市售化学纯,未经特殊处理。

1.2 镀金属碳纤维织物的制备

在进行化学镀之前首先要对碳纤维织物表面进行预处理,具体方法见表 1。将活化处理后的碳纤维织物放入预先准备好的化学镀液中,反应过程中用磁力搅拌器搅拌并加热。镍铜复合镀层织物需先镀镍 10 min,用去离子水冲洗干净后直接放入化学镀铜液中施镀 10 min。单一镍镀层与单一铜镀层碳纤维织物的施镀时间均为 20 min,施镀完成后用去离子水冲洗干净,然后放入真空干燥器,室温干燥 10 h。镀镍工艺优选配方:硫酸镍 20 g/L,次亚磷酸钠 30 g/L,柠檬酸钠 10 g/L,氯化铵 30 g/L,镀液 pH 值 7.5~8.0,镀液温度 60 ℃。镀铜工艺优选配方:硫酸铜 10 g/L,甲醛 10 mL/L,酒石酸钾钠 40 g/L,氢氧化钠 10 g/L,镀液 pH 值 12.5~13.0,镀液温度 60 ℃。采用最佳化学镀工艺得到的镀镍碳纤维织物增重率为 119.71%,镀铜碳纤维织物增重率为 33.68%,复合镀镍铜碳纤维织物增重率为 122.35%。

表 1 碳纤维织物表面预处理工艺

Tab.1 Process of pretreatment for carbon fiber fabric

步骤	处理条件	温度/℃	时间/min
去胶	马弗炉灼烧	400	5
除油	无水乙醇浸泡	室温	5
粗化	强酸溶液	室温	15
敏化	SnCl ₂ 溶液	室温	5
活化	PdCl ₂ 溶液	40~50	10

1.3 镀金属碳纤维织物的测试

用 JEOLJSM-6380LV 型扫描电镜(日本电子株式会社)对复合镀镍铜碳纤维织物表层进行形貌观察。用 GENESIS 2000 型 X 射线能谱仪(美国 EDAX 公

司)分析镀层成分。采用冷热循环法测定镀层结合力^[7]。用 DT-830 型数字电表测量镀金属薄膜碳纤维织物的表面电阻。采用 HP-5301 型 RCS 测试系统(惠普公司)测毫米波 RCS 值。测试时将待测碳纤维织物分别制成 5 cm × 5.5 cm 的试样,垂直置于微波暗室旋转测试台上,调整微波发射源,取电磁波入射角为 0° 进行测试。

毫米波 RCS 测试系统实测值的单位为 dBsm(表示平方米的分贝数),但在实际应用中,RCS 值的单位一般为 m²,因此需要对其单位进行转换处理。由公式(1)^[4]可以计算出以平方米为单位的 RCS 值,同时根据理论公式(2)^[8]可以计算镀金属薄膜碳纤维织物的 RCS 理论计算值。

$$D = 10 \times \lg \sigma \quad (1)$$

$$\sigma = \frac{4\pi s^2}{\lambda^2} \quad (2)$$

式中:D 为仪器实测值,dBsm;s 为被测目标表面面积,m²;σ 为雷达散射截面积,m²;λ 为工作波长,m。

2 结果与讨论

2.1 碳纤维织物镍铜复合镀层表观分析

目视优化工艺制得的复合镀镍铜碳纤维织物,其表面为鲜亮的红铜色,镀覆均匀,金属光泽较强。图 1(a)为复合镀镍铜碳纤维织物的扫描电镜照片。可以看出,碳纤维织物经过复合镀镍铜后,在纤维表面沉积了一层金属,且镀层较均匀,但是有一些小颗粒存在,可能是由于化学镀铜时镀速过快导致局部沉积过快而形成。用扫描电镜所附带的 X 射线能谱仪(EDAX)对镀层内各元素的含量进行分析,结果如图 1(b)所示。镀层由镍、磷和铜元素组成,镍的质量分数为 74.14%,磷的质量分数为 4.27%,铜的质量分数为 21.59%。其中铜的质量分数较小,这是由于受化学镀铜特点的影响,镀铜层一般很薄,镀层厚度达到 2 mm 左右后镀速下降很快,反应难以继续进行。镀镍则不同,受镍的自催化作用,反应可以持续进行,复合镀层中镍的厚度约为 4 mm 左右。

2.2 镀金属碳纤维织物的导电性能

材料的反射效能与金属镀层的电导率和入射电磁波的频率有关。当电磁波的频率一定时,电导率越大,反射效能越高^[9]。当材料的反射效能越高时,毫米波 RCS 值越大,越接近于理想导体的 RCS 理论值,因此镀金属薄膜碳纤维织物的导电性能成为制约该材料在毫米波段 RCS 值大小的关键因素之一。

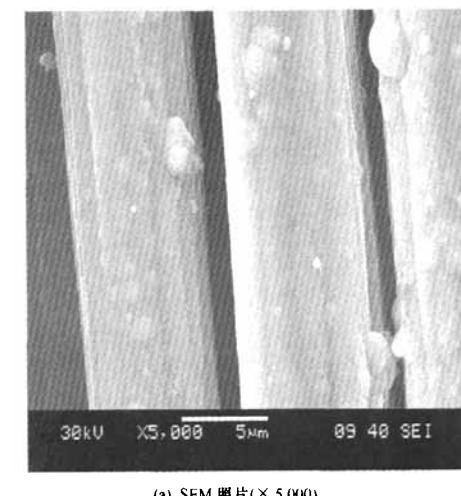
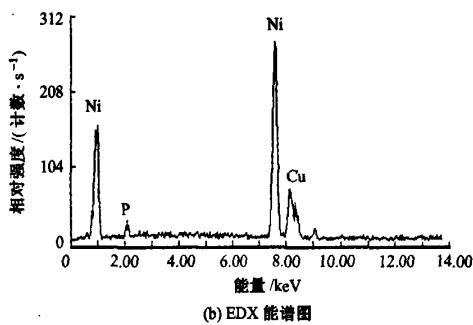
(a) SEM 照片($\times 5000$)

图 1 复合镀镍铜碳纤维织物的 SEM 照片及 EDX 能谱图

Fig.1 SEM photo (a) and EDX graph (b) of Ni - Cu deposited carbon fiber fabric

将按最佳配方制备的镀金属薄膜碳纤维织物制成 $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 试样,用 DT-830 数字万用表测试织物两端电阻,取平均值,测量结果见表 2。可以看出,未经表面金属改性处理的碳纤维织物表面电阻值最大为 $27.5 \Omega/\text{cm}$,复合镀镍铜碳纤维织物表面电阻最小,导电性能最强。这是因为通过复合镀镍铜后,复合镀层厚度整体加大,其表面电阻值较单独镀铜碳纤维织物的值减小。

表 2 织物表面电阻值

Tab.2 Values of surface resistance

织物类别	表面电阻($\Omega \cdot \text{cm}^{-1}$)
碳纤维织物	27.5
镀镍碳纤维织物	7.1
镀铜碳纤维织物	2.6
复合镀镍铜碳纤维织物	1.8

2.3 碳纤维织物镀铜复合镀层结合性能

金属镀层与碳纤维织物之间的结合性能直接影响

响着复合材料的工程实用性,因此需要对复合材料的镀层结合性能进行测试。基于碳纤维基材的特性,镀层结合性能测试采用冷热循环法^[10]。将复合镀镍铜碳纤维织物在 100°C 的沸水中煮 $20\sim25 \text{ min}$,然后在 $0\sim5^\circ\text{C}$ 的冷水浴中保持 3 min 后取出,镀层无起泡、脱落现象,此时镀层的结合力不低于 $7.84\sim8.82 \text{ N/cm}^2$ ^[7]。复合镀镍铜碳纤维织物样品经过 3 个周期的冷热循环测试,镀层无起泡、脱落现象,说明镀层的结合强度符合要求。

2.4 镀金属碳纤维织物毫米波 RCS 特性

2.4.1 3 mm 波段 RCS 值

图 2 示出不同金属镀层碳纤维织物和未表面改性碳纤维织物在 3 mm 波段 RCS 值的仪器测试结果。由图可以看出,碳纤维织物实测值最小,镀镍、镀铜、复合镀镍铜碳纤维织物的实测值依次增大。

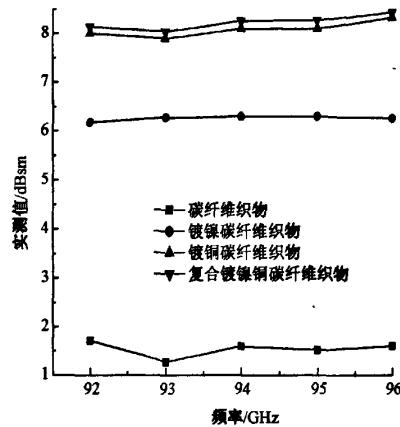


图 2 试样 3 mm 波段 RCS 值测试结果

Fig.2 Testing results of samples RCS value in 3 mm wave

依据式(1)进行单位转化,并依据式(2)计算镀金属碳纤维织物的理论 RCS 值,计算结果见图 3。由图可以看出,未经表面改性处理的碳纤维织物的 RCS 实测值最小,而表面金属改性的碳纤维织物随着导电性能的提高而增大,复合镀镍铜碳纤维织物的 RCS 值最大,5 个测试频率点的平均值为未表面改性处理的碳纤维织物的 4.66 倍,与理论计算值较接近,约为理论计算值的 78.4%。

2.4.2 8 mm 波段 RCS 值

图 4 示出不同金属镀层碳纤维织物和未表面改性碳纤维织物在 8 mm 波段 RCS 值测试结果。与 3 mm 波段相似,RCS 实测值随织物导电性能的增强而增大。根据图 4,由式(1)、(2)分别计算表面金属改性碳纤维织物以及未改性碳纤维织物在 8 mm 波段的 RCS 实测值和理论值,结果见图 5。从图可以

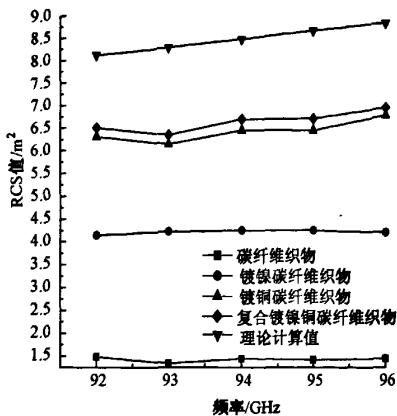


图 3 在 3 mm 波段实测值与理论值的比较图

Fig.3 Comparison of testing and academic values in 3 mm wave

看出,同 3 mm 波段一样,在 8 mm 波段未经表面金属改性处理的碳纤维织物的 RCS 实测值最小,而经过表面金属改性处理的碳纤维织物的 RCS 实测值随其导电性能的提高而增大,复合镀镍铜碳纤维织物的 RCS 值最大,5 个测试点的平均值为未表面改性处理碳纤维织物的 1.55 倍,与理论计算值较接近,约为其 82.6%。

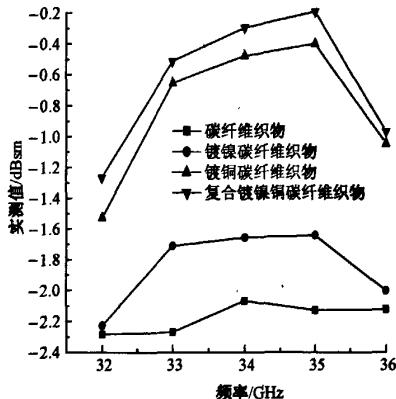


图 4 试样 8 mm 波段 RCS 值测试结果

Fig.4 Testing results of samples RCS value in 8 mm wave

2.4.3 实验结果分析

由图 3、5 看出,未经表面金属改性处理的碳纤维织物在毫米波波段其 RCS 实测值最小,这是因为碳纤维本身具有吸波作用^[11],使得毫米波散射能力下降造成的。镀镍碳纤维织物的 RCS 值较小,是因为金属镀镍层属于镍磷共沉积层,电导率较小,同时具有一定磁性,入射电磁波有一部分会因电磁损耗而被吸收,造成反射效能降低。在 3 mm 和 8 mm 波段,RCS 值都与织物的导电性能关系密切,随着织物导电性能的增强而增大。复合镀镍铜碳纤维织物的 RCS 实测值,

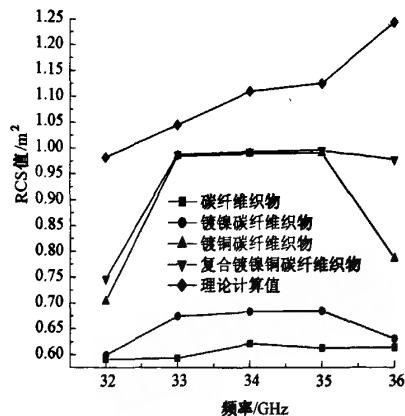


图 5 在 8 mm 波段实测值与理论值的比较图

Fig.5 Comparison of testing and academic values in 8 mm wave

在 8 mm 波段比 3 mm 波段更接近于理论计算值,这与电磁波的入射频率相关,因为当镀层金属电导率一定时,入射电磁波频率越大,反射效能越低^[9]。

RCS 理论计算值稍高于复合镀镍铜碳纤维织物的实际测量值,是因为理论计算时视金属方片为无损耗(导电率无穷大)的理想导体,而实际上金属层是有一定损耗的^[8],测试时受测试环境的影响,被测目标周围会存在一些杂波;同时受化学镀工艺条件的影响,金属镀层内部晶体排列存在缺陷,使得镀层电导率降低,这些因素都将导致实际测量值小于理论计算值。

总之,碳纤维织物表面经复合镀镍铜改性后,因为导电性显著增强,其 RCS 实测值不管是在 3 mm 还是 8 mm 波段,都明显高于碳纤维织物及镀镍、镀铜碳纤维织物的 RCS 值,且与理论计算值较接近,在 3 mm 约为理论值的 78.4%,在 8 mm 波段约为理论计算值的 82.6%,因此经过表面复合镀镍铜改性的碳纤维织物吸波效能下降,毫米波散射效能提高,该复合织物材料可以有效干扰毫米波。

3 结 论

- 制备的复合镀镍铜碳纤维织物表面光滑平整,金属光泽强,有良好的镀层结合强度及较强的导电性能。

- 织物在毫米波波段的 RCS 值随着导电性能的增强而增大,复合镀镍铜碳纤维织物实测值与理论值计算较接近,与同尺寸的未改性碳纤维织物相比,在 3 mm 波段为其 4.66 倍,在 8 mm 波段为其

(下转第 22 页)

- [11] 李明忠, 卢神州, 吴徵宇, 等. 多孔丝素膜的制备及形态结构[J]. 纺织学报, 2000, 21(5): 268 - 271.
- [12] 卢神州, 李明忠, 王洪杰, 等. 聚多元醇环氧树脂交联丝素膜的研究[J]. 纺织学报, 2001, 22(6): 402 - 404.
- [13] 李明忠, 卢神州, 李丛新, 等. 复合丝素膜的制备[J]. 纺织学报, 1998, 19(6): 45 - 46.
- [14] 王晓英, 孙东豪, 吴徵宇. 丝素/聚氨酯共混膜的制备与性能研究[J]. 苏州大学学报: 工科版, 2002, 22(1): 15 - 19.
- [15] 鲍俊杰, 刘都宝, 黎兵, 等. 医用聚氨酯材料研究进展[J]. 聚氨酯, 2007(64): 72 - 78.
- [16] 徐卫林, 郭维琪, 李文斌. 一种用于加工有机纳米粉末的磨盘: 中国, ZL 02154128.0[P]. 2006 - 08 - 09.
- [17] 徐志磊, 赵雨花, 尤茂青, 等. 聚氨酯多孔膜的结构和透湿性能研究[J]. 中国塑料, 2004, 18(6): 62 - 66.
- [18] Huang Jianhua, Qian Xiaoming. A new test method for measuring the water vapour permeability of fabrics [J]. Measurement Science and Technology, 2007, 18: 3043 - 3047.
- [19] 邓春雨, 黄开勋, 徐卫林. TiO₂/羊毛粉体复合改性聚氨酯膜及其性能[J]. 纺织学报, 2006, 27(4): 83 - 86.
- [20] Xu Weilin, Fang Jian. Modification of polyurethane by superfine protein powder [J]. Polymer Engineering and Science, 2006, 46: 617 - 622.

(上接第 15 页)

1.55 倍。

3) 经过表面化学复合镀镍铜处理后的碳纤维织物吸波效能明显下降, 毫米波散射效能显著提高, 该复合织物材料可以作为一种有效的毫米波干扰材料。

参考文献:

- [1] 张晓君, 应美芳, 王成福. 短碳纤维-铜复合材料的研制[J]. 材料科学进展, 1990, 4(3): 223 - 226.
- [2] 罗天骄, 姚广春, 张晓明, 等. 连续碳纤维表面金属化[J]. 东北大学学报, 2005, 26(9): 882 - 885.
- [3] 付伟. 毫米波无源干扰技术的发展现状[J]. 火控雷达技术, 2001, 30(1): 22 - 25.
- [4] 阮颖铮. 雷达截面与隐身技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998: 30.
- [5] 王进美, 朱长纯, 李毅, 等. 纳米管状聚苯胺织物涂层与导电及微波屏蔽性能[J]. 纺织学报, 2005, 26(4): 10 - 13.
- [6] 李克兢, 汪秀琛. 电磁屏蔽服装的开发探讨[J]. 纺织学报, 2005, 26(4): 148 - 150.
- [7] 伍学高. 塑料电镀技术[M]. 成都: 四川科技出版社, 1983: 359 - 370.
- [8] 赵洁, 闵江. 毫米波段 RCS 测试技术研究[J]. 光电对抗与无源干扰, 1995(1): 14 - 23.
- [9] 顾国锋, 胡航. 化学镀电磁辐射防护织物的屏蔽效能分析[J]. 广西物理, 2005, 26(1): 38 - 40.
- [10] 高嵩, 姚广春. 化学镀铜前碳纤维预处理的研究[J]. 材料保护, 2005, 38(7): 43 - 45.
- [11] 赵乃勤, 邹田春, 师春生, 等. 活性碳毡电路屏(直立碳纤维)/树脂复合吸波材料[J]. 复合材料学报, 2006, 23(2): 47 - 52.

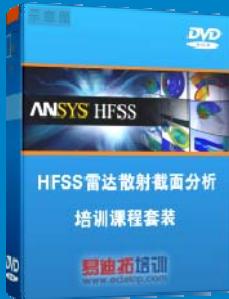
雷达散射截面（RCS）分析培训课程

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，致力和专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养，是国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地。客户遍布中兴通讯、研通高频、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

雷达散射截面（Radar Cross Section，简称 RCS）是雷达隐身技术中最关键的概念，也是电磁理论研究的重要课题，使用 HFSS 软件可以很方便的分析计算各种目标物体的 RCS。

由易迪拓培训推出的《HFSS 雷达散射截面分析培训课程套装》是从零讲起，系统地向您讲授如何使用 HFSS 软件进行雷达散射截面分析的全过程。该套视频课程由专家讲授，边操作边讲解，直观易学。

HFSS 雷达散射截面分析培训课程套装



套装包含两门视频培训课程，其中：《两周学会 HFSS》培训课程是作为 HFSS 的入门培训课程，帮助您在最短的时间内迅速熟悉、掌握 HFSS 的实际操作和工程应用；《HFSS 雷达散射截面(RCS)分析》培训课程是专门讲授如何使用 HFSS 来分析计算雷达散射截面，包括雷达散射截面、单站 RCS、双站 RCS 等的定义，实例讲解使用 HFSS 分析单站 RCS、双站 RCS 和宽频 RCS 的相关设置和实际操作等。视频课程，专家讲授，从零讲起，直观易学...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/130.html>

● 更多培训课程：

● **HFSS 培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/>

● **CST 培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/cst/>

● **天线设计培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/>