

文章编号:1001-9014(2004)03-0221-04

## 3mm 涂层隐身材料的天线温度模型

缪晨, 娄国伟, 李兴国

(南京理工大学毫米波、光波近感技术研究所, 江苏 南京 210094)

**摘要:**根据电磁场理论导出了3mm涂层隐身材料的辐射率.在此基础上建立了涂层隐身材料的辐射计天线温度模型.给出了天线温度与涂层材料的厚度、相对介电常数、相对磁导率之间的定量关系.并将数值计算结果与实际测量值进行了比较,其结果的一致性说明了该模型的有效性.

**关键词:**毫米波辐射计;天线温度;建模;隐身材料

**中图分类号:**059;Q631 **文献标识码:**A

## ANTENNA TEMPERATURE MODEL OF 3MM COATING STEALTH MATERIAL

MIAO Chen, LOU Guo-Wei, LI Xing-Guo

(Research Institute of Millimeter Wave and Light Wave Near-sensing Technology,  
Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:**Based on the theory of electromagnetic field, the emissivity of 3mm coating stealth material was deduced. Then the radiometer antenna temperature of coating stealth material was modeled. This model proposes the quantitative relations among the antenna temperature, material thickness, material relative permittivity and material relative permeability. The results of numerical calculation agree well with the measured results. So this model is effective.

**Key words:** millimeter wave radiometer; antenna temperature; modeling; coating stealth material

### 引言

隐身技术作为电子战与信息化战争的重要组成部分,已受到高度重视.对毫米波隐身材料特性的研究与测量也逐渐引起广大学者的重视<sup>[1-2]</sup>.利用毫米波辐射计对隐身材料的特性进行测量具有测试方便、测试系统价格便宜等优点,具有广阔的前景.

已有文献一般都只给出了辐射率与天线温度之间的关系,并未见公开报导涂层材料的各物理参数与天线温度之间定量关系.若单从实验出发研究这些参数对天线温度的影响,无疑工作量大,耗资多,具有盲目性.因此有必要进行理论研究.本文利用电磁场理论及辐射计相关知识,建立了辐射计对涂层材料测量时的天线温度模型.这一模型确立了涂层材料的厚度、相对介电常数、相对磁导率与天线温度之间的关系,从而为毫米波辐射计测量涂层隐身材料特性提供了理论基础.

### 1 3mm 涂层隐身材料辐射率

3mm 涂层材料结构示意图如图1所示, $d$ 为厚度, $\epsilon_1$ , $\mu_1$ 分别为涂层材料的复相对介电常数和复相对磁导率.为得到其辐射率,先根据电磁场理论推导出其反射率.

对均匀平面波,任意极化的电场 $E$ 都可分解为与人射面(入射线与法线构成的面)平行和垂直的两个分量.为简单起见,只对电场平行于人射面情况进行讨论.如图1,当电磁场入射到涂层表面时,一部分反射,一部分入射.在第 $i$ 层中( $i=0$ 表示自由空间, $i=1$ 表示涂层),合成电场可以表示为 $E_i = E_{ix} \hat{e}_x + E_{iz} \hat{e}_z$ , $E_i^+$ 与 $E_i^-$ 分别为 $i$ 层中入射波和反射波的振幅,略去时间因子 $\exp(j\omega t)$ ,则自由空间和涂层中的电场可分别表示如下:自由空间中: $E_0 = E_{0x} \hat{e}_x + E_{0z} \hat{e}_z$ ,涂层中: $E_1 = E_{1x} \hat{e}_x + E_{1z} \hat{e}_z$ ,其中:  
$$E_{0x}(x, z) = E_0^+ \cos\theta_0 \cdot a - E_0^- \cos\theta_0 \cdot b,$$

收稿日期:2003-03-24,修回日期:2004-02-15

作者简介:缪晨(1978-),男,江苏如东人,南京理工大学在读硕士,硕士,主要从事目标毫米波辐射特性研究.

Received date: 2003-03-24, revised date: 2004-02-15

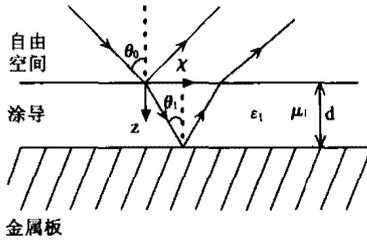


图1 电磁场入射示意图

Fig. 1 Sketch map for the incidence of electromagnetic field

$$E_{0z}(x, z) = E_0^+ \sin\theta_0 \cdot a - E_0^- \sin\theta_0 \cdot b, \quad (1)$$

$$E_{1x}(x, z) = E_1^+ \cos\theta_0 \cdot e - E_1^- \cos\theta_1 \cdot f, \quad (2)$$

$$E_{1z}(x, z) = E_1^+ \sin\theta_1 \cdot e - E_1^- \sin\theta_1 \cdot f, \quad (2)$$

$$a = \exp(-jk_0(x \cdot \sin\theta_0 + z \cos\theta_0)),$$

$$b = \exp(jk_0(-x \cdot \sin\theta_0 + z \cos\theta_0)),$$

$$e = \exp(-jk_1(x \cdot \sin\theta_1 + z \cos\theta_1)),$$

$$f = \exp(jk_1(x \cdot \sin\theta_1 + z \cos\theta_1)),$$

$$k_0 = \omega \sqrt{\epsilon_0 \mu_0}, \quad k_1 = \omega \sqrt{\epsilon_0 \mu_0 \epsilon_1 \mu_1},$$

$\theta_0$ 、 $\theta_1$  分别为涂层表面入射角和金属表面的入射角，它们之间的关系可由斯耐尔折射定律  $\sin\theta_0 = \sqrt{\mu_1 \epsilon_1} \sin\theta_1$  确定。

根据麦克斯韦方程： $\nabla \times E_i(x, z) = -j\omega \mu_0 \mu_1 H_i(x, z)$  可得自由空间和涂层中的合成磁场。

自由空间：

$$H_{0y} = \sqrt{\epsilon_0 / \mu_0} E_0^+ \cdot a + \sqrt{\epsilon_0 / \mu_0} E_0^- \cdot b \quad (3)$$

涂层中：

$$H_{1y} = \sqrt{\epsilon_0 \epsilon_1 / \mu_0 \mu_1} E_1^+ \cdot e + \sqrt{\epsilon_0 \epsilon_1 / \mu_0 \mu_1} E_1^- \cdot f \quad (4)$$

由边界条件可知：

$$E_{0x}(x, 0) = E_{1x}(x, 0),$$

$$H_{0x}(x, 0) = \epsilon_1 E_{1z}(x, 0),$$

$$H_{0y}(x, 0) = H_{1y}(x, 0). \quad (5)$$

式(5)对任意  $x$  成立，令  $x=0$ ，代入式(1)-(4)得：

$$E_0^+ - E_0^- = \cos\theta_1 / \cos\theta_0 \cdot (E_1^+ e^{jk_1 d \cos\theta_1} - E_1^- e^{-jk_1 d \cos\theta_1}),$$

$$E_0^+ + E_0^- = \sqrt{\frac{\mu_0 \epsilon_1}{\mu_1 \epsilon_0}} \cdot (E_1^+ e^{jk_1 d \cos\theta_1} + E_1^- e^{-jk_1 d \cos\theta_1}),$$

对金属板  $-E_1^- / E_1^+ = -1$ ，则涂层表面的电压反射系数为：

$$\Gamma_h(\theta_0, d, \epsilon_1, \mu_1) = -E_0^- / E_0^+ = (m - lq) / (l - mq), \quad (6)$$

$$m = \sqrt{\mu_1 \epsilon_1 - \sin^2 \theta_0} - \epsilon_1 \cos\theta_0,$$

$$l = \sqrt{\mu_1 \epsilon_1 - \sin^2 \theta_0} + \epsilon_1 \cos\theta_0,$$

$$q = \exp(-j2k_1 d \sqrt{\mu_1 \epsilon_1 - \sin^2 \theta_0} / \sqrt{\mu_1 \epsilon_1}).$$

则涂层隐身材料水平极化的辐射率为<sup>[4]</sup>：

$$\epsilon_h(\theta_0, d, \epsilon_1, \mu_1) = 1 - |\Gamma_h|^2 = 1 - |(m - lq) / (l - mq)|^2. \quad (7)$$

与上面推导过程类似，当电场垂直于入射面时可得涂层隐身材料垂直极化的辐射率为：

$$\epsilon_v(\theta_0, d, \epsilon_1, \mu_1) = 1 - |\Gamma_v|^2 = 1 - |(J + Kq) / (K + Jq)|^2, \quad (8)$$

$$J = \mu_1 \cos\theta_0 - \sqrt{\mu_1 \epsilon_1 - \sin^2 \theta_0},$$

$$K = \mu_1 \cos\theta_0 + \sqrt{\mu_1 \epsilon_1 - \sin^2 \theta_0}.$$

## 2 涂层隐身材料板的辐射计天线温度模型

辐射计对涂层隐身材料测量如图2所示， $Z$ 轴与天线的对称轴重合。设涂层隐身材料板为无限大，天线是线极化，只接受一个极化方向的能量，并忽略大气的的影响。则无耗天线的天线温度可表示为<sup>[4]</sup>：

$$T_a(\theta_F) = 1 / (4\pi) \int_{4\pi} T(\theta, \phi) G(\theta, \phi) d\Omega \quad (9)$$

其中  $T(\theta, \phi)$  为物体的表观温度， $\theta_F$  为天线中心轴与垂直方向的夹角， $G(\theta, \phi)$  为天线的功率方向图。在天空无云的情况下，物体在  $(\theta, \phi)$  方向的表观温度可表示为：

$$T(\theta, \phi) = T_0 \epsilon(\theta_0, \phi) + T_s (1 - \epsilon(\theta_0, \phi)),$$

$$= \begin{cases} T_0 \epsilon(\theta + \theta_F, d, \epsilon_1, \mu_1) + T_s (1 - \epsilon(\theta + \theta_F, d, \epsilon_1, \mu_1)) \\ T_0 \epsilon(|\theta_F - \theta|, d, \epsilon_1, \mu_1) + T_s (1 - \epsilon(|\theta_F - \theta|, d, \epsilon_1, \mu_1)) \end{cases}$$

$$\begin{cases} \phi \in (0, \pi) \\ \phi \in (\pi, 2\pi) \end{cases}, \quad (10)$$

式(10)中， $T_0$  为物体的物理温度， $T_s$  为天空温度。为书写方便，下面将  $\epsilon(\theta_0, d, \epsilon_1, \mu_1)$  记为  $\epsilon(\theta_0)$ 。而辐射计天线功率方向图可由实际测量并通过曲线拟合得到。一般辐射计方向图多比较尖锐，所以可以忽略水平线以上角度对积分的贡献。将式(10)代入式(9)并考虑上述情况得：

$$T_a(\theta_F) = T_{a1}(\theta_F) + T_{a2}(\theta_F), \quad (11)$$

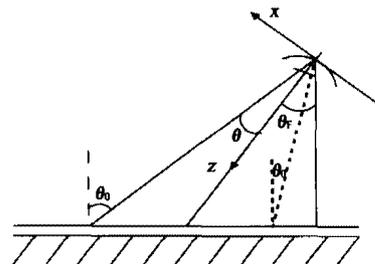


图2 辐射计测量示意图

Fig. 2 Diagram of radiometer measurement

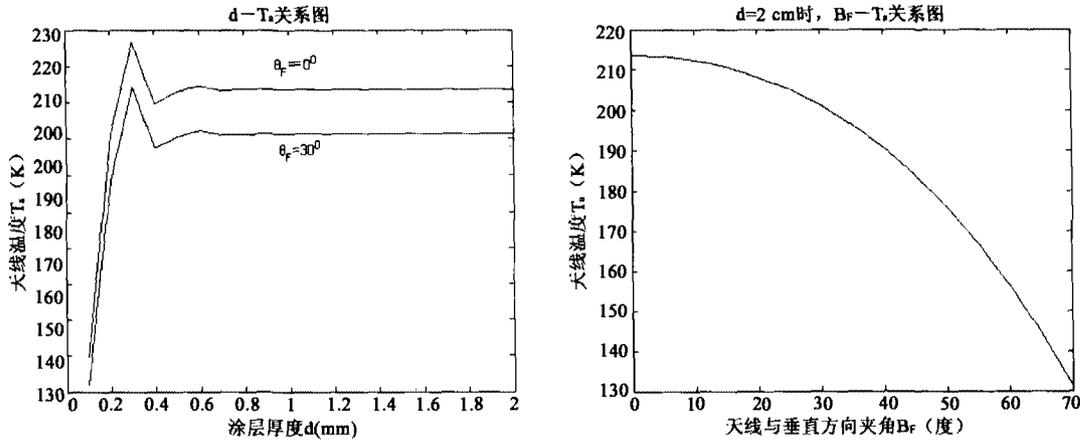


图3 仿真结果  
Fig.3 Simulation results

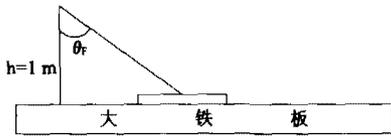


图4 辐射计测量涂层材料示意图  
Fig.4 Measurement of coating stealth material with radiometer

$$T_{a1}(\theta_F) = 1/2 \int_0^{\pi/2 + \theta_F} (T_0 \varepsilon(\theta_F + \theta) + T_s(1 - \varepsilon(\theta_F + \theta))) G(\theta) \sin\theta d\theta$$

$$T_{a2}(\theta_F) = 1/2 \int_0^{\pi/2 - \theta} (T_0 \varepsilon(|\theta_F - \theta|) + T_s(1 - \varepsilon(|\theta_F - \theta|))) G(\theta) \sin\theta d\theta$$

以上即为涂层隐身材料的辐射计天线温度模型,利用数值计算方法对以上模型进行仿真,其结果如图3所示.仿真时所用参数为: $\varepsilon_1 = 20.6 - j3.07$ , $\mu_1 = 1.24 - j0.93$ , $f = 95 \text{ GHz}$ , $T_0 = 293 \text{ K}$ , $T_s = 60 \text{ K}$ ,极化方向为垂直极化.由图3可以看出,当涂层材料在厚度为某一值时(本文参数下,近似为0.35mm),其天线温度有最大值,也即在此情况下辐射率最大.当涂层厚度达到一定厚度后,其天线温度基本不再变化.当然,上述模型也可

以用来研究涂层材料的介电常数和磁导率与天线温度之间的关系.

### 3 对实际3mm 隐身涂层板的测量

实际测量示意图见图4,由于实际涂层材料的尺寸有限,利用大的铁板作为测量的背景,以减少大地对测量的影响.

对两块3mm 隐身涂层板进行了测量,隐身涂层板的物理参数及测量结果如表1.从中看出,由3mm 涂层隐身材料的天线温度模型所得结果与测量值基本吻合,其误差在工程允许范围之内.理论值和测量值之间的小的差别主要是由于:1.模型假设涂层材料板为无限大,而实际的涂层材料不可能无限大,以铁板作为其背景对其有一定的影响;2.模型没有考虑大气对毫米波传输的影响,而大气对毫米波或多或少存在影响;3.用于模型的天线功率方向图是由测量值经曲线拟合得到的,与实际的功率方向图有一定的差别.

### 4 结束语

利用毫米波辐射计测量目标特性关键是建立目标的天线温度模型.本文建立了3mm 涂层隐身材料的天线温度模型,该模型能够很好地应用于工程中.

表1 3mm 涂层隐身材料测量值和理论值  
Table 1 The measured results and the theory results of 3mm coating stealth material ( $\varepsilon = \varepsilon_r - j\varepsilon_i, \mu = \mu_r - j\mu_i$ )

参数 涂层板编号	$\varepsilon_r \times \varepsilon_i$	$\mu_r \times \mu_i$	d (mm)	测量值 $T_a$ (K)			理论值 $T_a$ (K)		
				15°	30°	45°	15°	30°	45°
T-051XA	0.793	0.6272	0.8	221.3	209.5	196.4	222.9	215.7	201.8
T-051XB	0.590	0.4212	0.85	210.5	202.4	197.2	213.8	208.3	197.9

关于更精确的模型正在进一步改进中. 辐射计测量的最终目的是得到目标的特性参数. 在 3mm 涂层隐身材料的天线温度模型基础上, 由辐射计天线温度反演涂层材料的各物理参数也正在研究之中.

### REFERENCES

- [1] LOU Guo-Wei, LI Xing-Guo, WANG Min. The wave absorbing property testing and analysis of the MMW coating stealth material [J]. *J. Infrared Millim Waves* ( 娄国伟, 李兴国, 汪敏. 毫米波涂层隐身材料吸波性能的测试研究. *红外与毫米波学报*), 2000, **19**(4):318—320.
- [2] PENG Shu-Sheng, LI Xing-Guo. Analysis of anti-coating-stealth-airplane with a millimeter wave radiometer [J]. *J. Infrared Millim. Waves* ( 彭树生, 李兴国. 毫米波辐射计反空中涂层隐身飞机的分析. *红外与毫米波学报*), 1998, **17**(6):454—458.
- [3] PENG Shu-Sheng, LI Xing-Guo. Study on anti-coating-stealth objective in air with an active millimeter wave radiometer [J]. *System Engineering & Electronic Technology* ( 彭树生, 李兴国. 主动毫米波辐射计反空中涂层隐身研究. *系统工程与电子技术*), 1998, **4**:27—30.
- [4] LI Xing-Guo. *Millimeter Wave Near-sensing Technology and Application* [M]. Beijing: National Defense Industry Publishing House ( 李兴国. *毫米波近感技术及其应用*. 北京: 国防工业出版社), 1991, 22—51.
- [5] PAUL F D. Microwave Absorbers [J]. *J. Microwave Journal*, 1993, **11**:88—94.

## 第 20 届国际光学委员会大会第二轮会议征文通知

### 挑战新世纪光学科技

2005 年 8 月 21—26 日中国 长春

**发起单位:** 国际光学委员会(ICO)

**主办单位:** 中国光学学会(GOS)

**承办单位:** 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所(CIOMP)

ICO 20 大会秘书处

CIOMP, 中国长春东南湖大路 16 号, 邮编 130033

电话: +86 - 431 - 6176815 传真: +86 - 431 - 5682346 电子邮件: ICO\_20@ciomp.ac.cn

网址: <http://www.ico-optics.org> <http://www.spie.org>

<http://www.coscentral.org> <http://www.ciomp.ac.cn>

#### 论文要求:

会议语言及论文请用英语. 作者需通过电子邮件提交 150 字论文摘要和 2 页论文文摘(电子版), 文章格式见会议网页. 会议接受光学所有相关领域论文. 论文应包括摘要、引言、正文、结论、参考文献等. 需提供作者姓名、单位和地址. 录用论文将被刊登在 SPIE 论文集中, 程序册将于 2005 年 4 月中旬发布在会议网页上. 请注意浏览.

#### 截止日期

摘要及论文截止日期: 2005 年 1 月 15 日

提前注册截止日期: 2005 年 7 月 1 日

会议注册费: 代表 1600 元, 学生 800 元, 中国光学学会会员 1400 元(以中国光学学会会员证为准). 2005 年 7 月 1 日之前优惠 200 元.