

# 有耗介质覆盖平面导体表面波 传播特性的计算

颜锦奎 徐长龙 徐得名

(上海大学通信与信息工程学院 上海 201800)

**摘要** 本文推导了圆柱坐标系下有耗介质涂覆平面导体表面波的场函数和本征方程、每波长径向衰减常数  $\alpha$ ；分析了介质特性参数、介质层厚度与  $\alpha$  的关系；指出磁损耗介质比电损耗介质有更好的抑制表面波的效果。

**关键词** 有耗介质, 表面波, 径向衰减常数

## 1 引言

M. Barlow 和 A. L. Collen 等人<sup>[1]</sup>在 50 年代就对表面波进行了研究, 当时是为了寻找一种高频、低耗、廉价的微波、毫米波传输线。选用的介质材料是低损耗的、甚至是无耗的。在理论上, 采用小损耗近似条件, 分析表面波在介质中的传播行为。近年来, 随着隐身反隐身技术的发展, 为了有效地抑制雷达回波, 减小雷达散射截面 (RCS), 表面波在有耗或者高损介质中的传播特性越来越引起人们的关注。国内外许多学者在这方面做了研究, 但由于存在复方程组求根方面的困难, 在数值计算时仍然采用小损耗近似<sup>[2]</sup>。本文推导了圆柱坐标系下表面波的本征方程, 借助计算机克服了复方程组求根困难, 用数值方法得到了本征方程的精确解。

## 2 圆柱坐标系中的 TM 表面波

在一块无限大的金属表面, 覆盖一层厚度为  $d$ 、特性参数为  $\epsilon, \mu$  ( $\epsilon, \mu$  为复数) 的介质材料, 介质中有一很小的探针 (同轴线内导体的延伸) (图 1)。探针激励出的电磁波是很复杂的, 有表面波、辐射波。在远离探针的区域, 由于辐射波能量衰减比表面波快, 可以近似认为电磁波只含有表面波成份。这种表面波应有轴对称性, 因而采用圆柱坐标系来分析。探针很细, 它上面的电流近似为轴向分布, 激励出的电磁波没有轴向磁场, 因而为 TM 波。

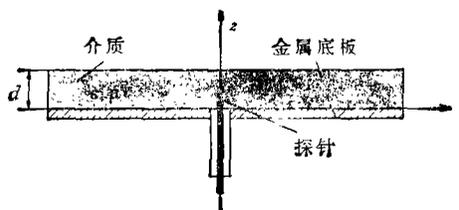


图 1 有耗介质层中的表面波的激励

1993-09-03 收到, 1994-03-12 定稿

颜锦奎 男, 1965 年生, 讲师, 博士生, 从事电磁场微波技术方面的研究。

徐长龙 男, 1941 年生, 副教授, 从事微波工程研究。

徐得名 男, 1934 年生, 教授, 博士生导师, 从事微波技术及微波与光相互作用方面的研究。

利用金属-介质界面和介质-空气界面的边界条件,可以求得空气和介质中 TM 导行表面波的电磁场分量。

空气中 ( $z > d$ )

$$\left. \begin{aligned} E_z &= \varepsilon \cos(k_z d) H_0^{(2)}(k_r, r) \exp[-jk_{0z}(z-d)], \\ E_r &= -\varepsilon \cos(k_z d) \frac{jk_{0z}}{k_r} H_0^{(2)'}(k_r, r) \exp[-jk_{0z}(z-d)], \\ H_\phi &= -\varepsilon \cos(k_z d) \frac{j\omega\varepsilon_0}{k_r} H_0^{(2)'}(k_r, r) \exp[-jk_{0z}(z-d)], \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

其中  $H_0^{(2)}(k_r, r)$  为第二类汉克尔函数。

介质中 ( $z < d$ )

$$\left. \begin{aligned} E_z &= \cos(k_z z) H_0^{(2)}(k_r, r), \\ E_r &= -\frac{k_z}{k_r} \sin(k_z z) H_0^{(2)'}(k_r, r), \\ H_\phi &= -\frac{j\omega\varepsilon_0\varepsilon}{k_r} \cos(k_z z) H_0^{(2)'}(k_r, r), \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

根据边界条件可以得到波数  $k_{0z}, k_z, k_r$  所满足的本征方程为

$$\varepsilon k_{0z} + jk_z \tan(k_z d) = 0, \quad (3)$$

(3)式与直角坐标系的 TM 表面波本征方程一样<sup>[3]</sup>。

另外,波数  $k_{0z}, k_z, k_r$  还满足以下两个相位条件

$$\left. \begin{aligned} k_{0z}^2 + k_z^2 &= k_0^2, \\ k_z^2 + k_r^2 &= \varepsilon \mu k_0^2. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

### 3 数值分析

**3.1 本征方程的求解** 分析表面波的传播性质,首先求解超越方程(3)式的根,求出传播常数  $k_{0z}$  和  $k_z$ 。

令  $x = k_{0z}d, y = k_z d$ , 问题变为求解

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon x + jy \tan y &= 0, \\ y^2 - x^2 &= (\mu\varepsilon - 1)(k_0 d)^2 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

的根,  $x, y$  均为复数。为保证表面波在空气中沿  $z$  轴正向衰减,  $x$  必须为  $-a - ib$  的形式,而  $y$  必须为  $\pm(a - ib)$  的形式,其中  $a > 0, b > 0$ <sup>[4]</sup>。(5)式实际上是一组四元非线性方程组,须用计算机数值方法求解。

**3.2 表面波径向衰减常数** 文献[5]给出表面波归一化阻抗  $Z_r$  和每波长径向衰减  $\alpha$  的近似表达式

$$Z_r = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \tanh(-jk_0 d \sqrt{\mu\varepsilon}) = R_r - jX_r, \quad (6)$$

$$\alpha \approx 54.6 X_r R_r. \quad (7)$$

利用(5)式的根,可以求出  $k_{0z}, k_z, k_r$ , 表面波在介质层中的每波长径向衰减常数为

$$\alpha = -20 \lambda \operatorname{Im}(k_r) \log_{10} e \quad (\text{dB}/\lambda), \quad (8)$$

其中  $\lambda$  为电磁波在自由空间中的波长。 $\alpha$  与材料参数、介质层厚度密切相关,可以用来评价材料对表面波的抑制效果。(8)式是每波长径向衰减常数的精确表达式。

在求解本征方程时,发现表面波高次模的 $\alpha$ 很大,比基模( $TM_0$ )的 $\alpha$ 大两、三个数量级,与 $TM_0$ 模相比,高次模完全可以忽略。下面所提到的表面波是指 $TM_0$ 表面波。

**3.3  $\alpha$ 与材料参数和介质层厚度的关系** 设微波频率为10GHz,介质参数 $\epsilon = 10 - j0.5$ ,  $\mu = 1.2 - j1.5$ ,介质厚度 $d$ 从0变化到3mm,图2反映了 $\alpha$ 与 $d$ 的关系。

图2中有两条曲线,一条由(8)式求得(实线),另一条由(7)式求得(虚线)。两条曲线相差不大。但(8)式(本文提供的结果)更加准确,这是因为(8)式无任何近似条件。从图2可看出, $\alpha$ 与 $d$ 的关系不是一种简单的关系,当 $d$ 较小时, $\alpha$ 随 $d$ 的增加而增加;在某个 $d$ 值, $\alpha$ 达最大值。当 $\alpha$ 为负数时,通过计算发现表面阻抗为容性,这正好说明这时表面波已不存在。

电损耗介质( $\mu$ 的虚部为零)和磁损耗介质( $\epsilon$ 的虚部为零)对表面波的抑制效果不同。下面我们分别研究 $\alpha$ 与电损耗介质和磁损耗介质的特性参数的关系。改变电损耗介质( $\mu = 1$ )的 $\epsilon$ 的实部,看看 $\alpha$ - $d$ 曲线的变化情况(图3)。在厚度很薄时, $\epsilon$ 的实部对 $\alpha$ 的影响很小,只有当 $d$ 较大时, $\epsilon$ 的实部才对 $\alpha$ 有较大的影响。随着 $\epsilon$ 实部的增大, $\alpha$ 也增大。图4为 $\alpha$ 与 $\epsilon$ 虚部的关系曲线。

在 $d$ 较小时, $\alpha$ 变化小,当 $d$ 较大时, $\alpha$ 随 $\epsilon$ 虚部的增大而增大。图5为磁损耗介质( $\epsilon = 10$ )的 $\mu$ 实部对 $\alpha$ 的影响。 $\mu$ 的实部几乎不改变 $\alpha$ 极大值的位置,而改变 $\alpha$ 极大值的大小,它对 $\alpha$ 的影响较大。图6为 $\mu$ 的虚部对 $\alpha$ 的影响。当 $\mu$ 的虚部增大时, $\alpha$ 的极大值减小;在厚度薄的情况下, $\alpha$ 随 $\mu$ 的虚部增大而增大,并且极大值的位置向坐标原点移动。从四张图可以看出,在厚度较薄的条件下,磁损耗介质比电损耗介质具有更加好的表面波抑制效果。提高 $\mu$ 的实部和虚部,可以有效地减薄介质涂层厚度。

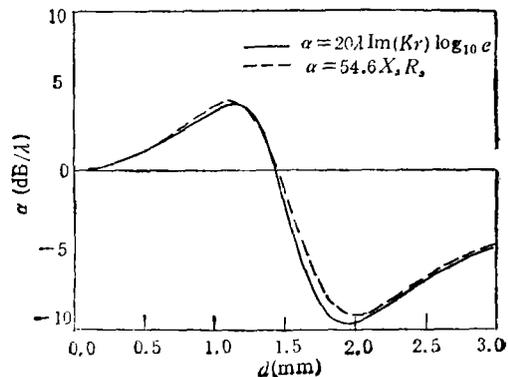


图2 每波长衰减常数 $\alpha$ 与介质层厚度 $d$ 的关系

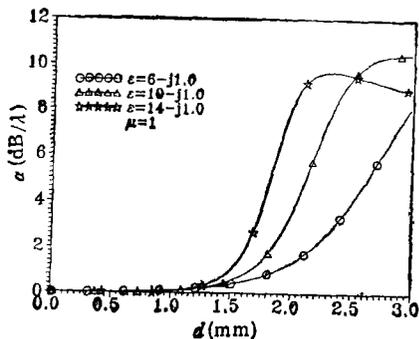


图3  $\epsilon$ 实部对 $\alpha$ 的影响

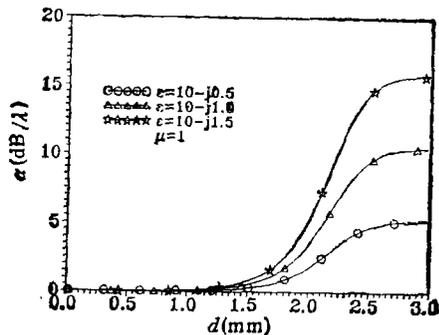


图4  $\epsilon$ 虚部对 $\alpha$ 的影响

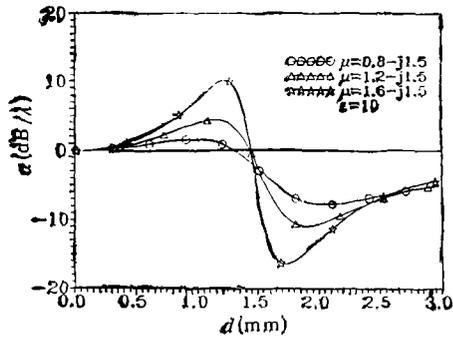


图 5  $\mu$  实部对  $\alpha$  的影响

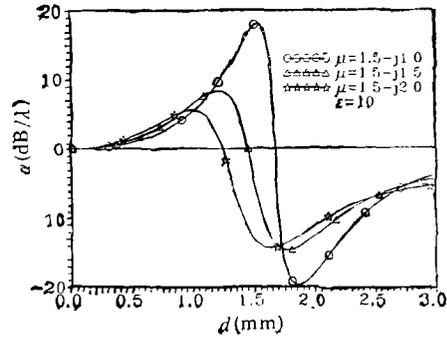


图 6  $\mu$  虚部对  $\alpha$  的影响

图 7(a), 7(b), 7(c), 7(d) 分别为厚度固定在 0.3mm, 0.5mm 两种情况下,  $\alpha$  与  $\epsilon, \mu$  的关系曲线, 其中  $\epsilon = \epsilon' - j\epsilon'', \mu = \mu' - j\mu''$ . 微波频率取 10GHz,  $\epsilon, \mu$  的中心值取为  $\epsilon = 10 - j2, \mu = 1.5 - j0.5$ . 从四张图看出,  $\alpha$  随各参数的变化大致为线性.  $\epsilon', \epsilon''$  对  $\alpha$  的影响较小,  $\mu', \mu''$  对  $\alpha$  的影响较大, 其中  $\mu''$  对  $\alpha$  的影响最大. 当  $\mu'' \approx 0$  时,  $\alpha \approx 0$ . 这与图 3 和图 4 的结论是一致的.

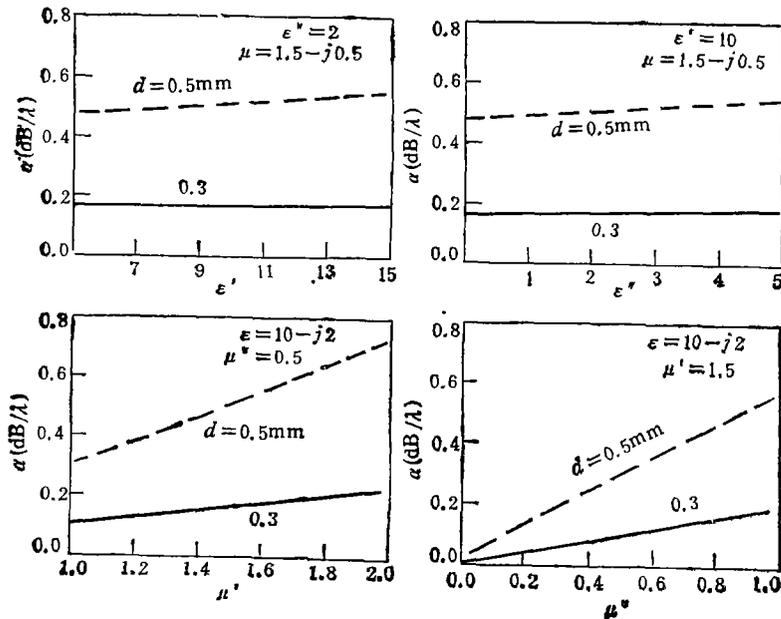


图 7  $d = 0.3\text{mm}, d = 0.5\text{mm}$  时,  $\alpha$  与  $\epsilon, \mu$  的实部、虚部的关系曲线

#### 4 结论

表面波在有耗介质覆盖导体表面的传播过程中, 不断地受到衰减, 其每波长径向衰减常数  $\alpha$  与介质本身的特性参数以及介质层厚度有关. 当介质层较薄时, 衰减随厚度的增

厚而增加;当介质层较厚时,衰减随厚度的增加而减小,故存在一个最佳厚度。磁导率对  $\alpha$  的贡献要比介电常数的贡献大得多,提高  $\mu$  的实部和虚部可以更有效地提高  $\alpha$  值,或者可以减薄介质层厚度。

### 参 考 文 献

- [1] Barlow M, Cullen A L. Proc. IEE, part III, 1953, 100: 321.
- [2] 饶克谨,等. 吸收表面波的薄涂层材料的性质,吸收剂评价方法专题研讨会,北京,1991.
- [3] Collin R E 著,侯元庆译. 导波场论,上海科学技术出版社,1966年,446—450.
- [4] 时振栋,等. 有耗介质涂覆导体平面上的表面波分析,1991年全国微波会议论文集,西安,1991,244—248.
- [5] 克拉特 F,等著,阮颖铮,等译. 雷达散射截面,北京:电子工业出版社,1988,263.

## PROPAGATION PROPERTY OF THE SURFACE WAVE ON CONDUCTOR-BACKED LOSSY DIELECTRIC PLANE

Yan Jinkui    Xu Changlong    Xu Deming

(Shanghai University of Science and Technology, Shanghai 201800)

**Abstract**    The eigenvalue equation, the attenuation constant  $\alpha$  and the field distribution function of the surface wave(SW) in a conductor-backed lossy dielectric layer are derived. The relationship between the  $\alpha$  and the parameters of the dielectric material is described. It was found that the magnetic-loss material showed better performance than the electric-loss material in attenuating the SW.

**Key words**    Lossy dielectric material, Surface wave, Radial attenuation constant