

# 影响 Salisbury 屏高频响应的若干因数

伍瑞新<sup>†</sup> 王相元 钱 鉴 张明雪 朱航飞 徐培华

(南京大学电子科学与工程系, 南京 210093)

(2003 年 4 月 11 日收到, 2003 年 5 月 26 日收到修改稿)

应用传输线理论研究了金属薄膜 Salisbury 屏的反射率频谱特性, 得到了 Salisbury 屏的反射系数公式和带宽系数的表达式. 理论和数值分析表明, Salisbury 屏的反射频谱是谐振型的, 在谐振频率处, 反射率的大小仅与金属薄膜的归一化面电阻  $\alpha$  有关, 而在其他频率处则取决于  $\alpha$  和隔离层波阻抗  $\eta_2$ . 反射率带宽系数  $\Delta$  取决于反射率的考察值  $\Gamma_a$ ,  $\eta_2$  和  $\alpha$ . 当  $\alpha \rightarrow \alpha_c$ ,  $\eta_2 \rightarrow \eta_0$  时  $\Delta$  取得极大值,  $\alpha_c$  的大小与  $\Gamma_a$  有关, 且通常  $\alpha_c \neq 1$ .

关键词: Salisbury 屏, 反射率, 频带宽度, 金属薄膜

PACC: 2842Q, 5235H, 5270G

## 1. 引 言

Salisbury 屏是一种经典的电磁波吸收材料, 经过设计的 Salisbury 屏在一定的频率范围内能有效地吸收电磁波. 对 Salisbury 屏的研究在多年以前已做了一些工作<sup>[1,2]</sup>, 但是由于其应用范围有限, 所以没有引起人们的注意. 近年来, 随着通信、计算机网络等技术的发展, 电磁兼容问题日益突出, 如何解决这一问题成为人们研究的重点. 由于 Salisbury 屏具有良好的电磁波吸收功能, 因而对它的研究再次受到人们的重视. 例如, Neo 等人<sup>[3]</sup>研究了如何应用 Smith 圆图设计多层结构的 Salisbury 屏; Takizawa 等人<sup>[4]</sup>研究了铟锡金属薄膜构成的透明吸收材料; Smith<sup>[5]</sup>研究了如何设计自适应的 Salisbury 屏等. 这些工作更多的是侧重于工程设计问题, 没有能够解释清楚与 Salisbury 屏相关的诸因数究竟是如何影响其频率响应特性. 为此, 本文以由金属薄膜构成的 Salisbury 屏为例, 分析了其反射率的高频响应特性, 并就其频带宽度与相关的诸因数间的关系做了较为深入的探讨, 得到了频带宽度系数的解析表达式.

## 2. 基本理论

金属薄膜 Salisbury 屏的结构如图 1 所示, 它由

金属薄膜、介质隔离层和金属衬底构成. 如果它的表面积远大于所考虑的电磁波波长, 并假定入射波为平面波且垂直入射到屏表面, 那么屏的反射特性可以用传输线理论来分析.

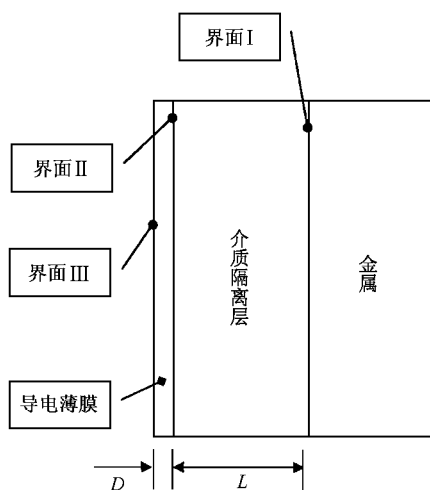


图 1 金属薄膜 Salisbury 屏结构示意图

根据传输线理论<sup>[6]</sup>, 在图 1 中三个区域的交界面 I, II 和 III 处的输入阻抗分别为

$$\begin{aligned} Z_I &= 0, \\ Z_{II} &= j\eta_2 \tan(\beta_2 L), \\ Z_{III} &= \eta_3 \frac{Z_{II} + j\eta_3 \tan(\beta_3 D)}{\eta_3 + jZ_{II} \tan(\beta_3 D)}, \end{aligned} \quad (1)$$

<sup>†</sup> 通讯联系人. E-mail: rxwu@nju.edu.cn

式中  $\eta_2 = \sqrt{\mu_2/\epsilon_2}$  为介质隔离层中的波阻抗,  $\beta_2 = \omega \sqrt{\mu_2 \epsilon_2}$  为传播常数,  $\epsilon_2$  和  $\mu_2$  为隔离层材料的介电常数和磁导率,  $\omega$  为入射波的角频率. 同样  $\eta_3$  和  $\beta_3$  为金属薄膜中的等效波阻抗和传播常数, 它们与薄膜的有效介电常数  $\epsilon_3$  和磁导率  $\mu_3$  的关系为

$$\eta_3 = \sqrt{\frac{\mu_3}{\epsilon_3}}, \quad \beta_3 = \omega \sqrt{\mu_3 \epsilon_3}. \quad (2)$$

金属薄膜的有效介电常数可以表示为  $\epsilon_3 = \epsilon_0(1 + \sigma/j\omega\epsilon_0)$ . 由于  $\sigma/\omega\epsilon_0 \gg 1$  故有

$$\eta_3 = \sqrt{\frac{\mu_3}{\epsilon_3}} \approx \sqrt{\frac{j\omega\mu_3}{\sigma}}, \quad \beta_3 = \sqrt{-j\omega\mu_3\sigma}. \quad (3)$$

如果  $\beta_3 D \ll 1$  则  $\tan(\beta_3 D) \approx \beta_3 D$ , 从而由(1)式得

$$Z_{III} = \eta_3 \frac{Z_{II} + j\eta_3\beta_3 D}{\eta_3 + jZ_{II}\beta_3 D}.$$

将(3)式代入上式, 则有

$$Z_{III} = \frac{j}{\sigma D} \frac{Z_{II} + j\omega\mu_3 D}{\frac{j}{\sigma D} + jZ_{II}} = \frac{1}{\sigma D} \frac{Z_{II} + j\omega\mu_3 D}{\frac{1}{\sigma D} + Z_{II}}. \quad (4)$$

如果上式中  $Z_{II} \rightarrow \infty$ , 则可以进一步化简为

$$Z_{III} = R_s = \frac{1}{\sigma D}. \quad (5)$$

显然  $R_s$  就是金属薄膜的直流面电阻. 将(5)和(1)式中  $Z_{II}$  的表示式代入(4)式, 得到 Salisbury 屏输入阻抗的一般表示式

$$Z_{III} = R_s \frac{\eta_2 \tan(\beta_2 L) + \omega\mu_3 D}{\eta_2 \tan(\beta_2 L) - jR_s}. \quad (6)$$

由上式结合在界面 III 上的反射率公式

$$\Gamma = \frac{Z_{III} - \eta_0}{Z_{III} + \eta_0}, \quad (7)$$

就得到 Salisbury 屏的频率特性. 式中  $\eta_0$  为空气的波阻抗. 如果隔离层的损耗很小可以忽略不计, 那么当  $\beta_2 L \rightarrow \frac{\pi}{2}$  且  $R_s \rightarrow \eta_0$  时反射为零, 而在偏离该条件时反射率就增加. 因此, Salisbury 屏的反射率具有“谐振”型的频率特性.

在忽略隔离层损耗的条件下,  $\beta_2 L = \frac{\pi}{2}$  确定了 Salisbury 屏的“谐振”频率  $f_0$ , 它可以表示为

$$f_0 = \frac{1}{4} \sqrt{\epsilon_2 \mu_2} L. \quad (8)$$

引入无量纲频率  $\bar{f} = f/f_0$ , 则(6)式改写为

$$Z_{III} = R_s \frac{\eta_2 \tan\left(\frac{\pi}{2}\bar{f}\right) + 2\pi f_0 \mu_3 D \bar{f}}{\eta_2 \tan\left(\frac{\pi}{2}\bar{f}\right) - jR_s}. \quad (9)$$

通常隔离层的波阻抗  $\eta_2 \approx 10^1 - 10^2$ , 对金属薄膜 ( $D \approx 10^2$  nm) 而言,  $2\pi f_0 \mu_3 D \approx 10^{-4}$ . 因此只要不是  $\bar{f} \ll 1$ , 总有  $\eta_2 \tan\left(\frac{\pi}{2}\bar{f}\right) \gg 2\pi f_0 \mu_3 D \bar{f}$ , 从而(9)式可以变为

$$Z_{III} \approx R_s \frac{\eta_2 \tan\left(\frac{\pi}{2}\bar{f}\right)}{\tan\left(\frac{\pi}{2}\bar{f}\right) - jR_s}. \quad (10)$$

由此, 可以得到 Salisbury 屏的反射率大小  $\Gamma_a$  为

$$\Gamma_a = \sqrt{\frac{(\alpha - 1)^2 \eta_2^2 \tan^2\left(\frac{\pi}{2}\bar{f}\right) + \alpha^2 \eta_0^2}{(\alpha + 1)^2 \eta_2^2 \tan^2\left(\frac{\pi}{2}\bar{f}\right) + \alpha^2 \eta_0^2}}, \quad (11)$$

式中  $\alpha = R_s/\eta_0$  为归一化面电阻. 由(11)式可以看到决定 Salisbury 屏的反射率频率响应的因数是金属薄膜的面电阻  $\alpha$  和隔离层的波阻抗  $\eta_2$ .

### 3. 影响 Salisbury 屏频率特性因数的讨论

在上面的讨论中, 已经注意到 Salisbury 屏的频率响应具有“谐振”的特性. 通常谐振曲线特性可以用谐振点的频率及其幅度和谐振曲线的频率宽度(或  $Q$  值)来描述. 在谐振点  $\bar{f} = 1$ , 即入射电磁波的频率和 Salisbury 屏的谐振频率相等时(11)式成为

$$\Gamma_0 = \left| \frac{\alpha - 1}{\alpha + 1} \right|. \quad (12)$$

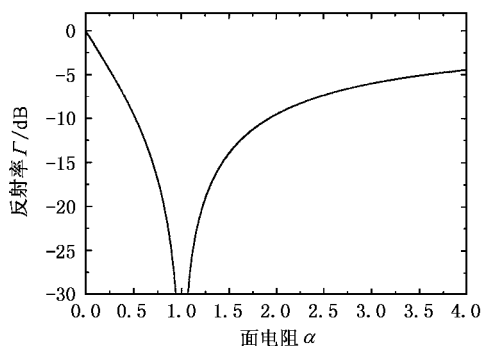


图2 在谐振频率( $\bar{f} = 1$ )点反射率随金属薄膜面电阻的变化

(12)式表示谐振点反射率的大小只与金属薄膜的面电阻有关, 与隔离层无关. 当  $\alpha = 1$  时  $\Gamma_0 = 0$ . 而当  $\alpha \neq 1$  时  $\Gamma_0$  为有限值, 它与  $\alpha$  的关系如图2所示. 从图2可以看到反射率的大小随  $\alpha$  偏离  $\alpha = 1$  迅速增大, 但是对  $\alpha > 1$  和  $\alpha < 1$   $\Gamma_0$  增长率不相同.  $\alpha < 1$  时  $\Gamma_0$  的增长率大于  $\alpha > 1$  时的情况. 对于频率  $\bar{f} \neq 1$  的情况, 图3a给出不同  $\alpha$  值下  $\Gamma_a$  的频率响应, 图3

(b) 给出不同材料的隔离层对  $\Gamma_a$  谱的影响. 可以看到  $\Gamma_a$  的大小不但与  $\alpha$  有关, 而且还与隔离层的波

阻抗  $\eta_2$  有关.

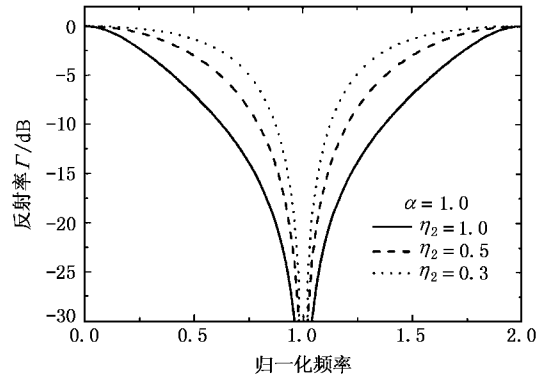
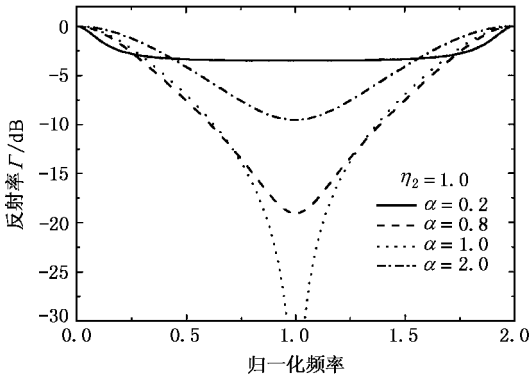


图 3(a) 隔离层波阻抗一定时, 反射率频谱随金属薄膜面电阻的变化

(b) 金属薄膜面电阻一定时, 反射率频谱随隔离层波阻抗的变化

图 3 反射率频谱曲线

由图 3 可以看到反射率是关于  $\bar{f} = 1$  对称的曲线, 因此对于给定的考察值  $\Gamma_a$ , 频率宽度系数  $\Delta$  可以写成

$$\Delta = 2 \left| \frac{f_a - f_0}{f_0} \right| = 2 |\bar{f}_a - 1|,$$

式中  $\bar{f}_a$  为  $\Gamma = \Gamma_a$  处的频率. 由 (11) 式可以解出  $\bar{f}_a$  的表示式为

$$\bar{f}_a = \frac{2}{\pi} \arctan \left( \frac{\alpha \eta_0}{(\alpha + 1) \eta_2} \sqrt{\frac{1 - \Gamma_a^2}{\Gamma_a^2 - \Gamma_0^2}} \right),$$

式中  $\Gamma_0$  为在  $\bar{f} = 1$  时的反射率大小. 图 4 给出带宽系数  $\Delta$  与  $\alpha, \eta_2, \Gamma_a$  的相互关系曲线. 结果显示对于给定的  $\Gamma_a$ , 存在一个  $\Delta \neq 0$  的  $\alpha$  取值范围;  $\alpha$  的取值范围随  $\Gamma_a$  的增加而减小, 如图 4(b) 所示. 在  $\alpha$  的取值范围内, 不同的  $\alpha$  值所对应的频带宽度不同. 适当调节  $\alpha$  值, 可以使 Salisbury 屏取得最大的带宽系数  $\Delta_c$ .  $\alpha$  的最优值  $\alpha_c$  与  $\Gamma_a$  的大小有关. 图 5 给出  $\alpha_c$  与  $\Gamma_a$  的相互关系. 从图 5 可以看到, 当  $\Gamma_a$  较小时,  $\alpha_c < 1$ , 即金属薄膜的最佳面电阻值稍小于空气的波阻抗  $\eta_0$ . 随  $\Gamma_a$  增加,  $\alpha_c \rightarrow 1$ . 与  $\alpha_c$  对应的最大带宽系数  $\Delta_c$  同样随  $\Gamma_a$  的增加而减小, 如图 5 所示. 在  $\Gamma_a = 10\text{dB}, \eta_2 = 1.0$  条件下,  $\Delta_c \approx 80\%$ . 隔离层材料的性质对谐振点的反射率大小没有影响 (见 (12) 式), 但对带宽系数却有明显的作用. 图 4(a) 显示隔离层波阻抗的减小导致在  $\alpha$  取值范围内带宽系数的缩减. 由图 5 可以看到  $\eta_2/\eta_0 \neq 1$  时,  $\alpha$  的最佳值没有改变, 有变化的只是对应的最佳带宽系数  $\Delta_c$ , 它们均较  $\eta_2/\eta_0 = 1.0$  时要小. 减小的程度与反射率

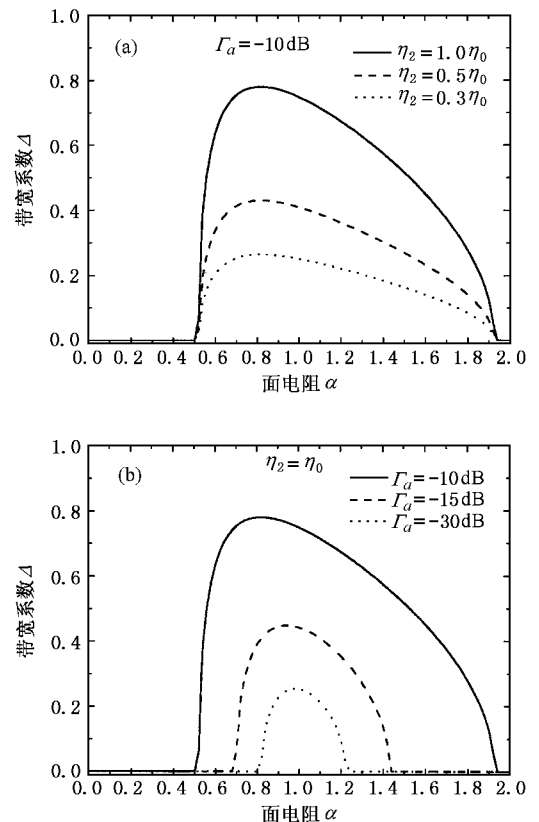


图 4 反射率考察值  $\Gamma_a$ 、隔离层波阻抗  $\eta_2$  和金属薄膜面电阻  $\alpha$  对反射率带宽系数的影响

的考察值  $\Gamma_a$  有关,  $\Gamma_a$  越小,  $\Delta_c$  的变化就越明显. 因此为了提高 Salisbury 屏对电磁波吸收的频带宽度, 隔离层宜采用波阻抗较接近于  $\eta_0$  的材料.

此外, 还应注意到 (11) 式是在  $\beta_3 D \ll 1$  的条件

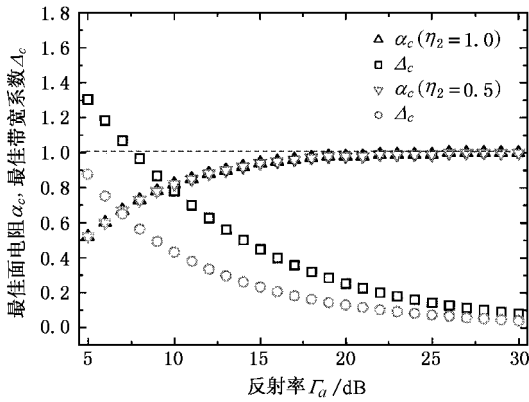


图5 反射率考察值  $\Gamma_a$ 、隔离层波阻抗  $\eta_2$  对金属薄膜最佳面电阻  $\alpha_c$  和最佳带宽系数  $\Delta_c$  的影响

下得到的,即  $\sqrt{\omega\mu_3\sigma}D \ll 1$ . 由于金属薄膜的电导率  $\sigma \approx 10^6 - 10^7 \text{ s/m}$ , 因此在微波频率下  $\sqrt{\omega\mu_3\sigma} \approx 10^{-5} - 10^{-6} \text{ m}^{-1}$ , 因此金属薄膜的厚度  $D$  应取为

$10^{-7} - 10^{-8} \text{ m}$ , 即为  $10^1 - 10^2 \text{ nm}$  尺度. 这说明并非只要是金属薄膜就能构成 Salisbury 吸收屏, 而必须将金属薄膜的厚度控制在亚微米或纳米量级.

## 4. 小 结

本文研究了金属薄膜 Salisbury 屏的反射率频谱特性. 根据传输线理论, 得到了 Salisbury 屏的反射系数公式和带宽系数的表达式. 理论和数值分析表明, Salisbury 屏在谐振频率处的反射系数大小仅与金属薄膜的归一化面电阻  $\alpha$  有关, 而在其他频率处则与  $\alpha$ 、隔离层材料的波阻抗  $\eta_2$  有关; 其带宽系数  $\Delta$  取决于参数  $\Gamma_a$ 、 $\alpha$  和  $\eta_2$ . 当  $\alpha \rightarrow \alpha_c$ ,  $\eta_2 \rightarrow \eta_0$  时,  $\Delta$  取得极大值,  $\alpha_c$  的大小与  $\Gamma_a$  有关, 且通常  $\alpha_c \neq 1$ . 本文还指出, 金属薄膜 Salisbury 屏中金属薄膜的厚度应控制在亚微米或纳米量级.

- [1] Ruck G T, Barrick D E, Stuart W D and Krichbaum C D 1970 *Radar Cross-Section Handbook* (New York: Plenum)
- [2] Fante R L and Maccormack M T 1988 *IEEE Trans. Antennas Propagat.* **36** 1443
- [3] Neo C P et al 2003 *IEEE Microwave Wireless Components* **13** 24
- [4] Takizawa K and Hashimoto O 1999 *IEEE Trans. Microwave Theor.*

*Theor.* **47** 1137

- [5] Smith F C 2002 *Electron. Lett.* **38** 1052
- [6] Tang H 1990 *The Principle of Microwaves* (Nanjing: Nanjing University Press) 唐 汉 1990 微波原理(南京: 南京大学出版社)]

# High frequency response of Salisbury screen and its related factors

Wu Rui-Xin<sup>†</sup> Wang Xiang-Yuan Qian Jian Zhang Ming-Xue Zhu Hang-Fei Xu Pei-Hua

( Department of Electronic Science and Engineering , Nanjing University , Nanjing 210093 , China )

( Received 11 April 2003 ; revised manuscript received 26 May 2003 )

## Abstract

In this work , the high-frequency response of the Salisbury screen made of metallic thin film was investigated. The formulas of reflectivity and bandwidth coefficient were derived. Theoretical and numerical studies show that the spectrum of reflectivity presents a resonance type , which is symmetric to the resonance frequency. The reflectivity is determined only by the normalized surface resistance  $\alpha$  of the metallic film at resonance , and by both  $\alpha$  and wave impedance  $\eta_2$  of the isolation layer at other frequencies. For the bandwidth coefficient  $\Delta$  , it is determined by the examined reflectivity  $\Gamma_a$  ,  $\eta_2$  and  $\alpha$  . Bandwidth coefficient can be improved by changing the wave impedance  $\eta_2$  , and tuning the surface resistance to the optimum value  $\alpha_c$  which is correlated to  $\Gamma_a$  and not equal to the one in most cases. It is also noted that the thickness of the metallic thin film should be in the order of sub-micron or nanometers .

**Keywords** : Salisbury screen , reflectivity , bandwidth , metallic thin film

**PACC** : 2842Q , 5235H , 5270G

---

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail : rxwu@nju.edu.cn