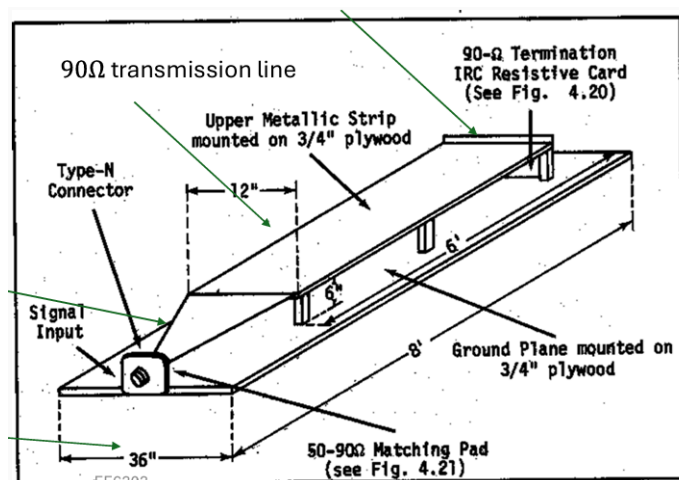


平行板传输线/TEM小室/GTEM小室

平行板传输线



平行板传输线

平行板传输线中电磁波传播的模式是TEM波，与远场中电磁波的传输模式相同。

通常Stripline地层最大是信号层的3倍宽，在末端会用与特性阻抗相同大小的电阻连接以消除反射（传输线阻抗匹配）。

在锥形部分，信号层的宽度和高度始终维持 $\frac{w}{h} = 2$ 的关系。

平行板传输线相关公式

传输线单位长度的电容和电感：

$$C_l = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 w}{h} (F/m)$$

$$L_l = \frac{\mu_r \mu_0 h}{w} (H/m)$$

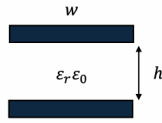
(空气近似于自由空间, $\epsilon \approx 1$)

相速度

$$v_p = \frac{1}{\sqrt{C_l L_l}} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r \epsilon_0 \mu_r \mu_0}}$$

特征阻抗

对于平行板传输线：



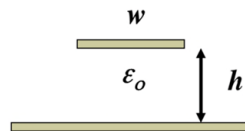
平行板传输线

$$\eta = \sqrt{\frac{\mu_r \mu_0}{\epsilon_r \epsilon_0}}$$

自由空间下的特征阻抗（空气或者真空）：

$$Z_0 = \eta_0 \frac{h}{w} (\Omega)$$

对于带状线（我怎么觉得这玩意应该叫microstrip微带线呢）：



带状线

$$Z_0 \approx \frac{\eta_0}{\frac{w}{h} + 2}$$

如果其中的电介质是不色散的，那么传输线的特征阻抗和频率无关。

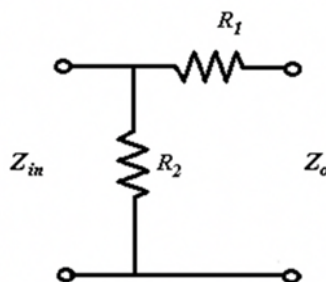
插入损耗

插入损耗可以用匹配网络前后的电压值计算。

$$\text{Insertion Loss} = 20 \log \frac{V_1}{V_2}$$

如果用电阻分压网络，只需要计算前后电阻的分压值即可获得插入损耗。（其实就是前后功率的损耗）

电阻匹配网络的电阻计算



电阻匹配网络

针对这种类型的电阻匹配网络，只需要保证

$$\begin{cases} Z_{in} = R_2 || (R_1 + Z_0) \\ Z_0 = R_1 + Z_{in} || R_2 \end{cases}$$

解这个二元方程组就能够得到 R_1 、 R_2 的值。

如果引入一个辅助值

$$Z' = 1 - \frac{Z_{in}}{Z_0}$$

那么可以计算得到

$$\begin{cases} R_1 = Z_0 \sqrt{Z'} \\ R_2 = \frac{Z_{in}}{\sqrt{Z'}} \end{cases}$$

平行板传输线的优势与劣势

优势

架设容易

成本低

没有频率限制

劣势

自身的电场容易被周围的物体或者电磁传输干扰

如果产生高电场可能会对周围的设备产生干扰

Example 1

这个传输线底层宽 $3.75m$

按照那个3倍的经验公式，可以算出来顶层宽 $1.25m$

题干中 $h = 0.5m$ ，可以计算得到

$$Z_0 \approx \frac{\eta_0}{\frac{w}{h} + 2} = \frac{120\pi}{\frac{1.25}{0.5} + 2} = 83.776\Omega$$

Example 2

设计匹配网络用前面提到的公式：

$$\begin{cases} R_1 = Z_0 \sqrt{Z'} \\ R_2 = \frac{Z_{in}}{\sqrt{Z'}} \\ Z' = 1 - \frac{Z_{in}}{Z_0} \end{cases}$$

直接带进去得到： $Z' = 0.40317$ 、 $R_1 = 53.19\Omega$ 、 $R_2 = 78.746$

(从这里可以看出老印的计算精度确实让人比较恼火，难怪open ending)

Example 3

欧姆定律 $P = \frac{U^2}{R}$ 直接出 $V_{in} = 35.36V$. 这边功放输出是 25W 而不是 50W，不能搞错。

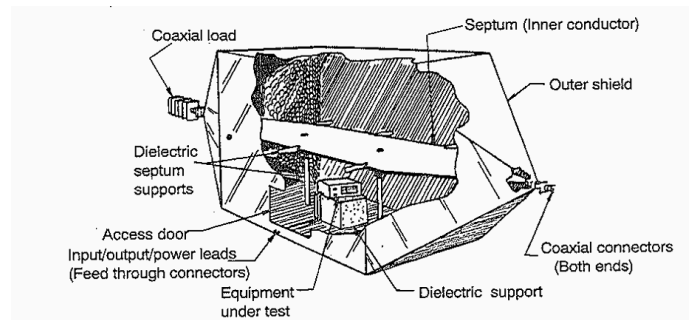
然后用分压就能算出来后续的电圧为 $V_s = 21.6V$

(需要注意的是从功率算出来的电压值为交流电的均方根值，并不是正弦波的峰值)

然后就是场强计算 $E = \frac{V_s}{h} = 43.2V/m$

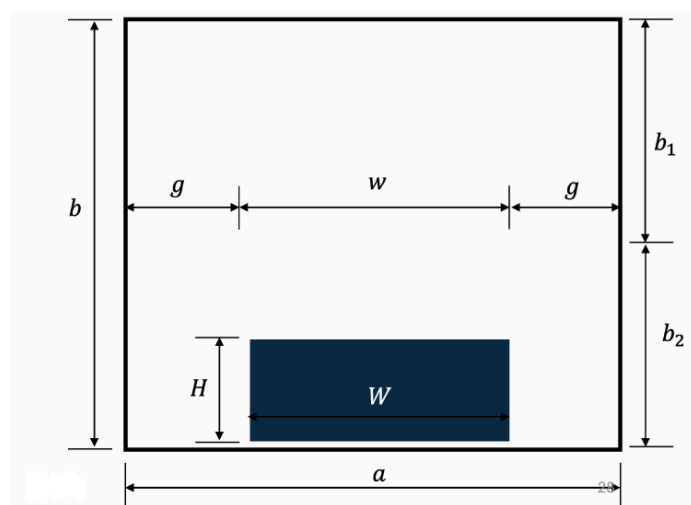
TEM CELL (TEM小室)

这玩意长得像个放大版的同轴线，然后把待测物体放到这个同轴线里面。内部是个平行板，外部被屏蔽壳包裹，平行板与外壳用介电系数尽可能接近于1的电介质隔开。电磁波传播模式也是TEM模。



TEM CELL

TEM CELL相关公式



TEM CELL的横截面

特征阻抗

$$Z_0 \approx \frac{30\pi}{\frac{a}{b} - \frac{2}{\pi} \ln \left[\sinh \left(\frac{\pi g}{b} \right) \right]}$$

其中 $\sinh(x) = \frac{1}{2}(e^x - e^{-x})$

(推过了，这个式子是对的)

最大工作频率

当TEM CELL中电磁波的模式变为 TE_{10} 模时，此时的频率是其最高工作频率。它在上设计是用来传输 TEM 模的，如果变成 TE_{10} 模就不符合设计要求了，所以是最高工作频率。

$$f_c = \frac{150}{a} \sqrt{1 + \frac{ab}{\pi b_1 b_2 \ln \left(\frac{4a}{\pi g} \right)}}$$

如果用当中隔板的相对位置表示，可以代入

$$\begin{cases} b_1 = xb \\ b_2 = (1-x)b \end{cases}$$

得到

$$f_c = \frac{150}{a} \sqrt{1 + \frac{a/b}{\pi x(1-x) \ln \left(\frac{4a}{\pi g} \right)}} \text{ (MHz)}$$

TEM CELL的设计方法

感觉很拍脑袋的做法。

需要满足的基础条件：

$$b_2 \geq \frac{3H}{2}$$

$$w > W$$

根据这个确定 b 的取值后查表获得 a/b 和 w/b 的取值。

(我有点想根据 $Z_0 \approx \frac{\eta_0}{4(\frac{a}{b} - \frac{2}{\pi} \ln[\sinh(\frac{\pi g}{b})])}$ 暴力求解，只需要确定 a/b 就能暴力反推出 g 和 w 的值)

然后计算 f_c

TEM CELL的优缺点

优点

内部的测试不会受到周围物体和辐射的干扰

内部的强电场不会干扰周围的电子设备

限制

工作频率 $DC - f_c$

Example 1

PPT上的过程实在是太混沌了，我尝试尽量计算出结果而不是查表

根据 $H = 0.25m$ 确定 $b_2 = 0.375m$ ，所以 $b = 0.75m$

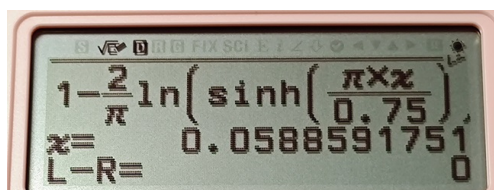
根据 $w > W$ 判断出 a 至少要大于 $0.5m$

拍脑袋取 $\frac{a}{b} = 1$

根据

$$Z_0 \approx \frac{\eta_0}{4(\frac{a}{b} - \frac{2}{\pi} \ln[\sinh(\frac{\pi g}{b})])} = 50\Omega$$

解得 $g = 0.058m$ ，得到 $w = 0.634m$ 大于 $W = 0.5m$ 所以这个方案可行。



The image shows a scientific calculator screen with the following text: $1 - \frac{2}{\pi} \ln\left(\sinh\left(\frac{\pi \times x}{0.75}\right)\right)$, $x = 0.0588591751$, and $L-R = 0$. The calculator is a standard scientific model with a monochrome display and various function keys.

使用SOLVER求解

计算 f_c :

$$f_c = \frac{150}{a} \sqrt{1 + \frac{a/b}{\pi x (1-x) \ln\left(\frac{4a}{\pi g}\right)}} = 241.67 \text{MHz}$$

Example 2

数值计算，991能做，别怕

根据DUT高度 $0.1m$ 确定 $b = 0.3m$

根据 f_c 公式，把截止频率提高点免得翻车。

$$f_c = \frac{150}{a} \sqrt{1 + \frac{a/b}{\pi x (1-x) \ln\left(\frac{4a}{\pi g}\right)}} = 450 \text{MHz}$$

解得

$$g = \frac{4a}{\pi} e^{-\frac{6a}{5\pi(9a^2-1)}}$$

将 g 带回特征阻抗方程，解得

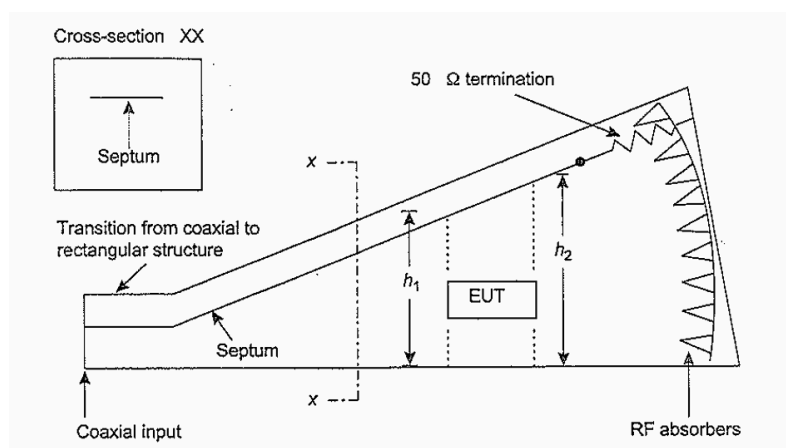
$$a = 0.34127m$$

从而获得

$$g = 0.029069m$$

GTEM CELL

这玩意是G赫兹TEM小室的简称，图长这样。隔板末端也是有50欧的负载，并且还需要贴有吸波材料防止反射。能够支持 1GHz 以上的频率。



GTEM CELL

GTEM CELL的优缺点

优点

工作频率可以从 DC 到数 GHz

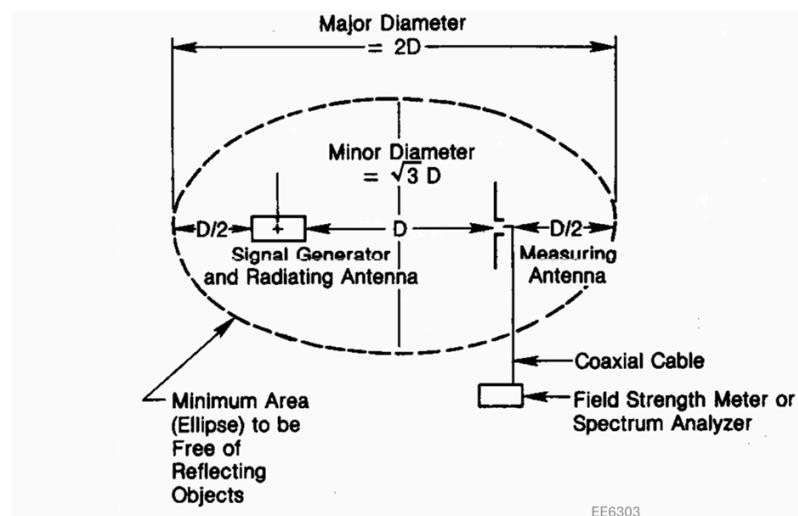
有屏蔽

缺点

对于大东西测试来说小了点

贵

OATS (Open Area Test Site)



OATS

测试的注意事项

周围不会有引发反射的物体（一般在郊区）

需要一个导电的地平面

一般用3m法和10m法进行测试

优缺点

优点

建造和维护容易

成本非常低

缺点

会受到天气影响

环境电磁环境会影响发射的测量

高功率辐射测量可能会影响到周围的环境

由于环境噪声不同，测试结果不可复现

Shielded Enclosure

相关公式

Shielding Effectiveness

这玩意指的是入射波的强度和透射波的关系。这个值越高表示透射波衰减越厉害。

$$SE \text{ (dB)} = R \text{ (dB)} + A \text{ (dB)} + B \text{ (dB)}$$

其中 SE 指的是Shielding Effectiveness、 R 是入射波与吸波材料的反射损耗、 A 是吸波材料的吸收、 B 表示吸波材料与透射波交界面处的反射损耗。都是越大越好。

吸收系数A

复传播系数

$$\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{j\omega\mu(\sigma + j\omega\epsilon)}$$

在复传播系数中，实部表示损耗，虚部表示相移。在这里我们主要考虑 α ，它表示波传播单位长度后振幅衰减 $e^{-\alpha}$ 。

所以我们可以得到

$$A \text{ (dB)} = 20\log_{10}(e^{-\alpha r})$$

为了从振幅转换成功率， \log 前面的数字为20

对于理想导体和良导体有 $\sigma \ll \omega\epsilon$ ，可以取近似为 $\alpha \approx \sqrt{\frac{\omega\mu\sigma}{2}}$ ，可以推出良导体中的吸收系数为：

$$A \text{ (dB)} = 20\log_{10}(e^{-\alpha r}) = -20\log_{10}e \times r\sqrt{\frac{\omega\mu\sigma}{2}}$$

一些其他的变形：

用相对电导率替换电导率、频率替换角频率、材料厚度 t 替换传播距离 r :

$$A(\text{dB}) = -20\log_{10} e \times t \sqrt{\pi f \mu \sigma_c \sigma_r}$$

用趋肤深度 $\delta = \sqrt{\frac{1}{\pi f \mu \sigma}}$ 替换:

$$A(\text{dB}) = -20\log_{10} e \times \frac{t}{\delta}$$

用相对磁导率和电导率替换 (此处 t 的单位是 cm) :

$$A(\text{dB}) = 1.314t \sqrt{f \mu_r \sigma_r}$$

(你是孔乙己吗整这么多没啥卵用的变形, 草)

反射损耗

(总觉得这里有点问题, 老印多了个平方)

在垂直入射的情况下 (非垂直入射的情况我推了一晚上推爆炸了, 还不知道对不对, 不写了), 不同介质之间的关系可以用传输线进行建模, 可得透射系数相对于阻抗的关系为:

$$T = \frac{2\sqrt{\eta_1 \eta_2}}{\eta_1 + \eta_2}$$

其中 η_1 为入射波的特征阻抗, η_2 为透射波的特征阻抗。

其中透射波的阻抗可以用下式计算

$$\eta_2 = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{(\sigma + j\omega\epsilon)}}$$

假设入射波功率为 P_0 , 则透射波功率为 $P_0 \times T^2$

可以知道反射损耗为

$$\text{Reflection Loss} = 10\log_{10} (P_0 - P_0 \times T^2) = -10\log_{10} T^2 = -10\log_{10} \left(\frac{4\eta_1 \eta_2}{(\eta_1 + \eta_2)^2} \right)$$

老印的式子是: $\text{Reflection Loss} = -20\log_{10} \left(\frac{4\eta_1 \eta_2}{(\eta_1 + \eta_2)^2} \right)$ 他写的有问题, 正确的系数都是10。

对于金属屏蔽罩, $\omega\epsilon \ll \sigma$

可以得到

$$|\eta_2| = \left| \sqrt{\frac{j\omega\mu}{(\sigma + j\omega\epsilon)}} \right| \approx \sqrt{\frac{\omega\mu}{\sigma}}$$

又由于 $\eta_1 \gg \eta_2$ 从而对反射损耗进行近似:

$$R \approx -20(10?) \log_{10} \left| \frac{4\eta_2}{\eta_1} \right|$$

材料对平面波的反射损耗:

入射波的特征阻抗为 120π 所以可以得到

$$R = -20(10?) \log_{10} \left(\frac{4 \sqrt{\frac{2\pi f \mu_0 \mu_r}{\sigma_c \sigma_r}}}{120\pi} \right)$$

其中 μ_0 为真空磁导率, σ_c 为铜的电导率。两个下标是 r 的是相对值。

材料对电场的反射损耗:

入射电场的特征阻抗

$$\eta_1 = \frac{\eta_0}{\beta_0 r}$$

代入真空光速

$$c_0 = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}$$

代入相位系数

$$\beta_0 = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\omega}{c_0}$$

可以得到

$$\eta_1 = \frac{1}{\omega \epsilon_0 r} = \frac{1}{2\pi f \epsilon_0 r}$$
$$R \approx -20(10?) \log_{10} \left(8\pi f \epsilon_0 r \sqrt{\frac{2\pi f \mu}{\sigma}} \right)$$

材料对磁场的反射损耗

类似地, 可以计算出入射磁场的特征阻抗:

$$\eta_1 = \eta_0 \beta_0 r = 2\pi f \mu_0 r$$

代入可以得到反射损耗约为:

$$R \approx -20(10?) \log_{10} \left(\frac{4 \sqrt{\frac{2\pi f \mu}{\sigma}}}{2\pi f \mu_0 r} \right)$$

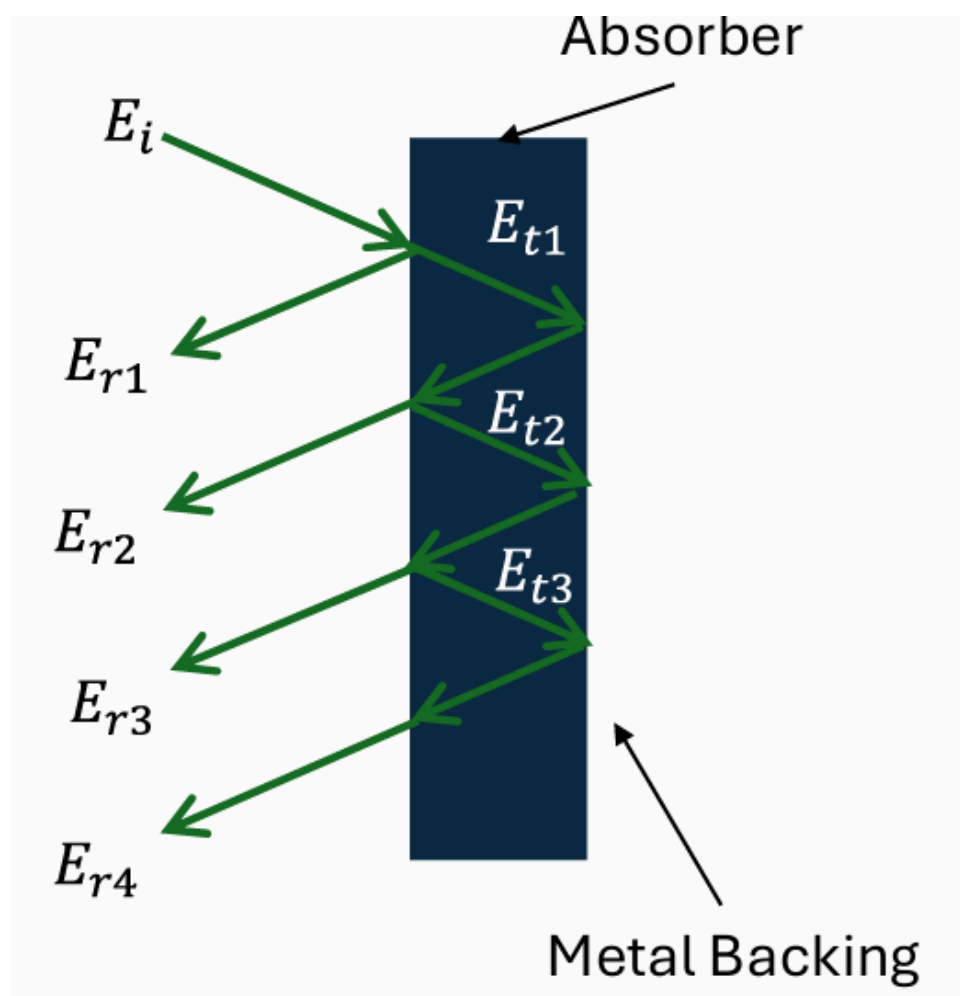
电波暗室的土木工程

略

电波暗室的吸波材料

反射率是描述反射电场强度的指标

吸波材料的反射率是入射角、反射角的函数（我前面在计算反射损耗的时候着重强调了垂直入射，就是因为这个）



吸波材料的反射特性

$$E_{ra} = E_{r1} + E_{r2} + E_{r3} + \dots \quad (1)$$

$$E_{r1} = E_i - E_{t1} \quad (2)$$

$$E_{r2} = E_{t1} \times A - E_{t2} \quad (3)$$

（这边老印想表达的是功率的关系吧，如果 E 表示的是电场的话还需要分别计算垂直和平行分量然后计算）

测量吸波材料的反射率

1、测量入射波到理想导电平面（PEC）的反射

2、计算反射电场强度和入射电场强度的比

$$\frac{E_{r_{PEC}}}{E_i}$$

3、把吸波材料放到PEC上，测量反射场强并计算

$$\frac{E_{r_{Absorb}}}{E_i}$$

4、反射率计算（你看这个公式就是功率的公式，说明确实是需要从功率方面考虑的，而不是前面的场强加减）

$$R = 20 \log_{10} \left(\frac{E_{r_{Absorb}}}{E_i} \frac{E_i}{E_{r_{PEC}}} \right)$$

5、重复不同的入射角计算

吸波材料的种类

Dielectric Absorber

轻

高介电损失（考虑复介电系数 $\epsilon = \epsilon' + j\epsilon''$ 对于复介电系数，实部的定义与一般的介电系数相同，虚部表示电流在介质中的损耗）

无磁性 $\mu_r = 1$

超宽带

厚

相关公式

波在高介电损失材料中的传播：

使用复传播系数解亥姆霍兹方程：

$$E(t) = E_0(t) e^{-\gamma z}$$

（我理解了很久，总算明白了PPT上这个公式里的t不是时间，而是厚度thickness.....这里直接用正常的亥姆霍兹方程解了）

根据复传播系数定义 单位长度的衰减为 $e^{-\alpha}$

根据高介电损失材料的特性 $\mu = \mu_0$ 、 $\sigma = 0$

可以得到：

$$\alpha \approx \frac{\omega}{2} \sqrt{\mu_0 \epsilon'} \frac{\epsilon''}{\epsilon'}$$

定义介电损耗角正切为：

$$D = \frac{\epsilon''}{\epsilon'}$$

Example

(我超这也有啊)

题干条件：

相对介电系数： $\epsilon_r = 2.55$

工作频率： 3GHz

损耗角正切： $D = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} = 0.00033$

计算复传播系数的实部：

$$\begin{aligned}\alpha &\approx \frac{\omega}{2} \sqrt{\mu_0 \epsilon'} \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \\ &= \pi f \sqrt{\mu_0 \epsilon_0 \epsilon_r} \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \\ &= 0.01657\end{aligned}$$

如果厚度为 10cm

$$A = 20 \log_{10} e^{-\alpha z} = -0.0144 \text{dB}$$

真空磁导率： $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$

真空介电常数： $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$

电波暗室使用的Dielectric Absorber的一些特性

被造成金字塔型

金字塔的高度决定了对不同频率的吸收率

反射率在30-50dB之间

工作频率：数百MHz到数GHz

Magnetic Absorber

使用含有磁性的材料（铁氧体、碳、镍）

薄

重

有损耗（不太理解，没损耗还能叫吸波材料么）

窄带

在低频下工作良好

相关公式

仍然使用亥姆霍兹方程的解（真好用）：

$$E(t) = E_0(t) e^{-\gamma z}$$

与复介电系数类似，复磁导率的虚部表示介质的损耗。

对于复磁导率

$$\mu = \mu' - j\mu''$$

可以计算得到复传播系数的实部:

$$\alpha \approx \frac{\omega}{2} \sqrt{\epsilon_0 \mu'} \frac{\mu''}{\mu'}$$

同样地这里也存在磁场的损耗角正切

电波暗室使用的Magnetic Absorber一些特性

薄铁氧体陶瓷瓦片

频率范围30MHz-1GHz

能承受高温和高功率

非常重（每平方米数十kg）

电波暗室的优缺点

优点

测试物的体积没有限制

可以测量数十Hz到40GHz甚至更高

支持电场、磁场和平面波测量

屏蔽效率大于100dB，能支持高功率辐射测量，低辐射泄漏

缺点

为了覆盖频率、照射角和极化方向需要的时间很长

如果要测量更大的物体和更长的测试距离，需要更大的暗室

非常贵

Mode stirred chambers/reverberation chamber（模式搅拌室/电波混响室）

基本信息

腔室墙壁和搅拌器由高导电材料制成

搅拌器的旋转会改变腔体的边界条件

在不同的搅拌器位置，会出现不同的共振模式

腔室内生成的电磁场有如下特性：

振幅均匀

各个方向上各向同性

随机极化

测试的特点

抗干扰测试

测试对象将从所有方向和所有极化方式被均匀照射

不需要旋转测试对象

与在电波暗室中进行远场测试相比，产生共振所需的功率要少得多

没有方向性信息

发射测试

从所有方向接收测试对象的发射

不需要旋转测试对象

产生的共振使发射测试更加敏感

没有方向性信息

最低可用频率LUF

LUF是最低谐振频率的大约4倍

最低谐振频率的定义：

$$f_{mnp} = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2 + \left(\frac{p}{h}\right)^2}$$

其中 c 为真空光速， a 、 b 、 h 是这个房间的长宽高.

m 、 n 、 p 是正整数，表示电磁波在房间中的模式分布，最多有一个可以是 0

品质因数Q值

定义：

$$Q = \omega \frac{\text{最大储存的能量}}{\text{平均能量损失}}$$
$$\frac{1}{Q_{total}} = \frac{1}{Q_1} + \frac{1}{Q_2}$$

其中 Q_1 是墙壁导致的损失， Q_2 是天线的损失

$$Q_1 = \frac{3V}{2\mu_r S \delta(\omega)}$$

其中 V 是内部体积， S 是内部墙壁表面积， $\delta(\omega)$ 是电磁波在导体的趋肤深度

$$Q_2 = \frac{16\pi^2 V}{mN\lambda^3}$$

其中 m 是天线阻抗失配导致的损失， N 是总天线数量

对于测量到的 Q 值，定义如下：

$$Q = \frac{16\pi^2 V \langle P_R \rangle}{\lambda^3 \langle P_T \rangle}$$

$\langle P_R \rangle$ 和 $\langle P_T \rangle$ 分别是接收和发射功率的系统平均值

房间增益

定义为：

$$\langle G \rangle = \frac{\langle P_R \rangle}{\langle P_T \rangle}$$

测量到的电场

定义为：

$$\langle |E_T|^2 \rangle = \frac{8\pi}{\epsilon_0 c \lambda^2} \langle P_R \rangle = \langle |E_x|^2 \rangle + \langle |E_y|^2 \rangle + \langle |E_z|^2 \rangle$$

Example

根据题意可以得到：

$$a = 1.136m$$

$$b = 0.77m$$

$$h = 0.535m$$

在 f_{011} 、 f_{101} 、 f_{110} 中找到最低的频率为 f_{110}

$$f_{110} = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2 + \left(\frac{p}{h}\right)^2} = 235.339\text{MHz}$$

$$LUF = 4f_{110} = 941.351\text{MHz}$$