

大连理工大学

本科实验报告四

课程名称： 电磁场与微波技术实验

学院（系）： 信息与通信工程学院

专 业： 电子信息工程

班 级： 电信 1806 班

学 号： 201871080

学生姓名： 刘祎铭

2021 年 4 月 20 日

大连理工大学实验预习报告

学院（系）：信息与通信工程学院 专业：电子信息工程 班级：电信 1806

姓名：刘祎铭 学号：201871080 组：

实验时间：2021.4.16 实验室： 实验台：

指导教师：李小兵

实验四 电磁波参量及均匀无耗介质参量的测量

Section I 电磁波参量的测量

一、实验目的和要求

1. 在学习均匀平面电磁波特性的基础上，观察电磁波的传播特性。
2. 熟悉并利用相干波原理，测量自由空间内电磁波的波长 λ ，确定相移常数 β 和波速 ν 。

二、主要实验仪器

1. DH926B 型微波分光仪
2. DH1121B 型 3cm 固态信号源
3. BD-1/035A 型 3cm 空腔式波长表
4. 金属反射板 2 块
5. 玻璃（有机）半透射板 1 块

三、实验内容与原理

1. 实验内容

- 1) 了解利用相干波测量自由空间内电磁波波长的原理及方法。
- 2) 熟悉电磁波测试平台（微波分光仪）的特点与使用。
- 3) 手动方式，采用“交叉读数法”测量连续的 3 个波节点 d_{01} 、 d_{02} 、 d_{03} ，并分别计算得到的两个半波长 $\lambda/2$ 及 β 、 ν 。
- 4) 设定 3cm 固态信号发生器的行波频率 f_0 。

2. 实验原理

当两列等幅、同频率的均匀平面电磁波，在自由空间中以相同或相反方向传播时，由于这两列电磁波初始相位的不同，在传播路径上二者将发生相互干涉，形成驻波场的分布。本实验正是利用相干波原理，通过测量空间驻波场内驻波节点的分布位置，求得

自由空间内电磁波波长 λ ，两相邻驻波节点之间距离为二分之波长（ $\lambda/2$ ），确定波长后，再由式（1-1）、（1-2）分别得到电磁波的主要参数： β 、 ν 等。

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (1-1)$$

$$\nu = \lambda \cdot f = \frac{\omega}{\beta} = \frac{2\pi f}{\beta} \quad (1-2)$$

电磁波参量测试原理如图 1-1 所示，利用 DH926B 型微波分光仪形成驻波场，通过测量驻波场内波特征点（波节点），来求得自由空间内电磁波波长 λ 的原理及方法。

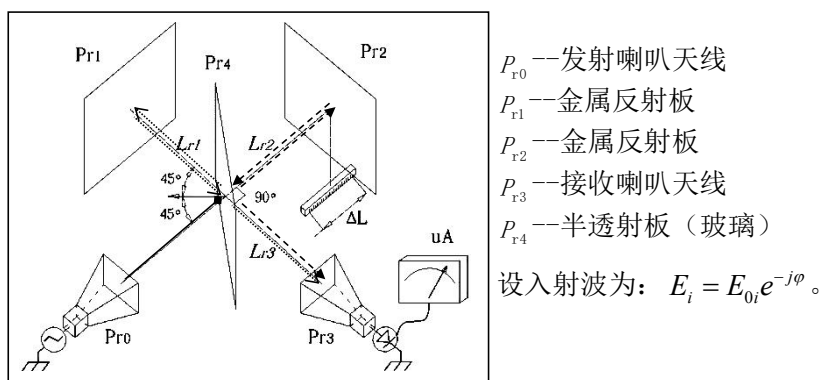


图 1-1 电磁波参量测试装置原理图

发射喇叭天线 P_{r0} 发射出的一系列平面波，首先到达与波轴成 45° 角的半透射板 P_{r4} ， P_{r4} 板将入射波分成两列波，一列被反射向反射板 P_{r1} 方向传播 E_r ，另一列被折射向可移动反射板 P_{r2} 方向传播 E_t 。由于 P_{r1} 、 P_{r2} 均为良导体金属板，且两块板法线分别与两列波的波轴重合（垂直入射），这两列波将被 P_{r1} 、 P_{r2} 板沿来路全部反射回来，再次到达半透射板 P_{r4} ，一列波被透射、一列波被反射向接收喇叭天线 P_{r3} 方向传播，在接收喇叭天线 P_{r3} 上收到了两列频率相同、传播方向一致的两列电磁波，形成波的干涉，如果两列波的相位差是 2π 的整数倍则干涉增强，如果两列波的相位差是 π 的奇数倍则干涉减弱。接收喇叭天线 P_{r3} 后设置一个由微波二极管构成的检波器，检波器检波后的电流信号（ μA 级）送至 μA 电流表上显示出来，示数表征检波探针所处位置下的干涉波的场强检波电流。

将反射板 P_{r1} 固定，让反射板 P_{r2} 通过移动云台在波轴方向上平行移动，则相干波形成“光程差”或称“波程差”。 P_{r3} 后的电流表指针会从一次极小又一次变到极小，表明了

反射板 P_{r2} 被平行移动了 $\lambda/2$ 的距离，由这个距离就可求得平面波的波长。

设金属反射板的反射系数为 R_{\perp} ， $T_{\perp 0}$ 、 $T_{\perp \varepsilon}$ 分别为由空气进入介质和由介质板进入空气时的传输系数，在一次近似条件下， P_{r3} 喇叭天线接收的电磁波分别为：

$$E_{r1} = -R_{\perp} T_{\perp 0} T_{\perp \varepsilon} E_i e^{-j\varphi_1} \quad (1-3)$$

$$E_{r2} = -R_{\perp} T_{\perp 0} T_{\perp \varepsilon} E_i e^{-j\varphi_2} \quad (1-4)$$

两列等幅、同频的均匀平面波，满足了相干波原理，式中

$$\varphi_1 = \beta (2L_{r1} + L_{r3}) = \beta L_1 \quad (1-5)$$

$$\varphi_2 = \beta (2L_{r2} + L_{r3}) = \beta (2L_{r1} + L_{r3} + 2\Delta L) = \beta L_2 \quad (1-6)$$

其中 $\Delta L = |L_2 - L_1|$ ， L_1 为固定值， L_2 为变化值，接收喇叭天线 P_{r3} 处的合成波为

$$\begin{aligned} E_r &= E_{r1} + E_{r2} = -R_{\perp} T_{\perp 0} T_{\perp \varepsilon} E_i (e^{-j\varphi_1} + e^{-j\varphi_2}) \\ &= -2 R_{\perp} T_{\perp 0} T_{\perp \varepsilon} E_i \cos \left(\frac{\varphi_1 - \varphi_2}{2} \right) e^{-j \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2}} \\ &= -2 R_{\perp} T_{\perp 0} T_{\perp \varepsilon} E_i \cos (\beta \Delta L) e^{-j \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2}} \end{aligned} \quad (1-7)$$

由 (1-7) 式可见， ΔL 变化使得

当 $\cos(\beta \Delta L) = 0$ 时，接收喇叭天线 P_{r3} 输出为零，或

$$\beta \Delta L = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta L = (2n + 1) \frac{\pi}{2} \quad (n = 0, 1, 2 \dots \dots)$$

$$2\Delta L = (2n + 1) \frac{\lambda}{2}$$

n 表示相干波合成驻波的驻波节点数，把 $n = 0$ 时 $E = 0$ 的驻波节点作为参考位置点 L_0 ，则其余波节点与参考点之间的距离为，

$$n=1 \text{ 时 } 2\Delta L_1 = 2|L_1 - L_0| = \lambda \quad \text{对应第二个波节点或第一个半波长。}$$

$$n=2 \text{ 时 } 2\Delta L_2 = 2|L_2 - L_0| = 2\lambda \quad \text{对应第三个波节点或第二个半波长。}$$

... ..

$$n=n \text{ 时 } 2\Delta L_n = 2|L_n - L_0| = n\lambda \quad \text{对应第 } n + 1 \text{ 个波节点或第 } n \text{ 个半波长。}$$

观察可见，两相邻点之间的 ΔL 为 $\lambda/2$ ，于是

$$\lambda = \frac{2\Delta L_n}{n} = 2(L_n - L_0) / n$$

理论上， n 越大测量越精确，测出 λ 值的精度越高，测量条件所限，实际测量中一般取 $n=4$ ，相当于 5 个驻波节点，此时电磁波波长平均值为：

$$\lambda = \frac{2\Delta L_4}{4} \quad (1-8)$$

需要说明的是，由于测试仪工作于近场范围内，所以 P_{r2} 板在平移时会影响接收喇叭驻波场的位置及振幅分布。其中“近场”的提法要注意和教材中“近区”的区别，从“近区”的定义，这里是在“远区”，但是从喇叭天线测量场地来说，可以看作是在“近场区”。由于接收喇叭所测得的合成驻波场，处于近区场内。实验中除辐射场外还存在感应场，又为非平面波磁场。因此， P_{r2} 板的移动不仅影响驻波节点位置均匀分布（各驻波节点距离并不完全相等），而且驻波幅度也有起伏，因而所测得的 λ 值为近似值，相干波 E_{r1} 和 E_{r2} 的驻波分布如图 1-2 所示。

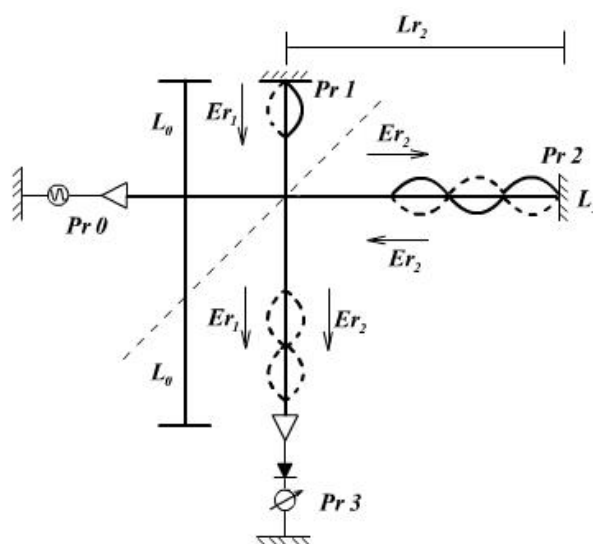


图 1-2 相干波 E_{r1} 和 E_{r2} 的驻波分布图

四、 实验步骤及操作方法

1. 按电磁波参量测试原理如图（图 1-1），将 DH926B 型微波分光仪组合成测波长、相移常数的状态。

1) 拆下所有介质板，使辐射天线 P_{r0} 和接收天线 P_{r3} 相对，轴线在同一平面上，调整信号衰减器使检波电流指示表示数在满度的 70% 左右。

2) 根据固态信号发生器的频率表，设定 3cm 固态信号发生器的行波频率 f 。

3) 按迈克尔逊干涉原理图（图 1-3）调整装置，安装反射板 P_{r1} 、 P_{r2} 及半透射板 P_{r4} 。

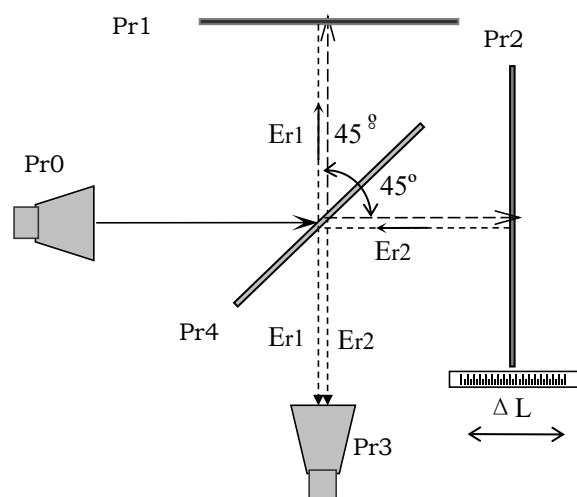


图 1-3 迈克尔逊干涉原理图

【要点】几何关系一定要保证：使 DH926B 型微波分光仪的两个喇叭天线（ P_{r0} 、 P_{r3} ）的轴线（天线口面）互为 90 度；半透射玻璃板 P_{r4} 与两喇叭天线的轴线互为 45 度成垂直投切。移动云台通过它本身上带有的两个底脚螺钉旋入底座上相应的旋孔中，使其固定在底座上。然后，在移动云台和平台的的天线支架上分别插入金属反射板 P_{r1} 、 P_{r2} 并固定，确保反射板 P_{r1} 的法线与接收喇叭天线 P_{r3} 的轴线重合，可移动云台上的反射板 P_{r2} 的法线与发射喇叭天线 P_{r0} 轴线重合。

上述几何条件直接影响到测量的准确度，是保障实验数据准确的重要条件。

2. 数据测量，先旋转移动云台手柄将 P_{r2} 板移动至最右侧，然后向左侧移动 P_{r2} 板，同时观察电流表的变化，测出三个连续的电流最小点（驻波节点）并记录。

1) 移动云台带有一“读数机构”，由直尺及手摇柄上的分度盘构成百分尺，可精确的读取云台所携带的金属反射板的相对位置。

2) 测量过程中要匀速移动云台，转动时应小心，防止由于云台上的全反射板的抖动造成的测量误差，另外，为了消除机械回程误差，一定要做单向匀速移动。

3) 为了保障测量精度，驻波特征点的获取必须采用“交叉读数取中值”方法。

4) 认真做好实验原始数据记录，计算出所测的两个半波长（ $\lambda/2$ ），要求测得的两个半波长之间的误差不得大于 0.5 mm。

5) 根据测得的波节点的坐标，计算求得电磁波波长 λ ，并且确定电磁波相移常数 β

和波速 v 。

实验四 电磁波参量及均匀无耗介质参量的测量

Section II 均匀无耗介质参量的测量

一、实验目的和要求

1. 深入理解与体会利用迈克尔逊干涉法测试不同材料的介电常数的基本原理。
2. 用相干波节点位移法，研究均匀无耗介质介电参数 的测量。
3. 了解均匀无耗介质中电磁波参量 、和 与自由空间中电磁波参量 、和 c 区别。
4. 熟悉均匀无耗介质分界面对电磁波的反射和折射的特性。

二、主要实验仪器

1. DH926B 型微波分光仪
2. DH1121B 型 3cm 固态信号源
3. BD-1/035A 型 3cm 空腔式波长表
4. 金属反射板 2 块
5. 玻璃（有机）半透射板 1 块
6. 待测介质板 1 块

三、实验内容与原理

1. 实验内容

- 1) 用相干波测量自由空间内电磁波波长的原理及方法。
- 2) 手动方式，采用“交叉读数法”测量无介质板时连续的 3 个波节点 d_1 、 d_2 、 d_3 。
- 3) 加上待测介质板，继续采用“交叉读数法”测量有介质板时连续的 3 个波节点 d'_1 、 d'_2 、 d'_3 。
- 4) 计算得到对应节点的位移量 ΔL 进而求得待测的介质介电参数 ϵ_r ，媒质中的电磁波参量 λ 、 β 和 v 。
- 5) （选作题）试着求得分界面上的反射系数 R 、折射系数 T 值。
- 6) 做好实验原始数据记录，计算出所测的两个半波长，两个半波长之间的误差不能大于 0.5 mm。整理好的实验原始数据记录交由老师检查确认。

2. 实验原理

描述介质特性的参数是介电参数 ϵ 和磁导率 μ ，对于损耗介质来说，这两个参数是复数，并且均是频率的函数。本实验中只研究均匀无耗的电介质（ $\mu = \mu_0$ 、 $\mu_r = 1$ 情况），这时的 ϵ 为一实数，以测定相对介电常数 $\epsilon_r = \epsilon / \epsilon_0$ 来了解介质的特性和参量。

在实验一中，已经掌握了运用相干波原理测定驻波节点，确定自由空间内电磁波参量 λ_0 、 β_0 和 c 的方法，用这种方法无法直接测得具有 ϵ_r ($\mu_r = 1$) 的介质中参量 λ 、 β 和 v 。但是，可以借助实验一中的装置和测量原理，测出均匀无耗介质存在前、后在接收喇叭天线处接收的驻波节点的相位变化量，再通过计算求出介质的介电参数 ϵ_r 。

利用相干波的原理调整好测量装置，固定反射板 P_{r1} ，移动反射板 P_{r2} （没加介质板）至一个驻波节点，然后把具有厚度为 δ 的待测介质板放在可移动反射板 P_{r2} 或固定反射板 P_{r1} 的前面（注：介质板需紧贴在反射板上），由于无耗介质板的加入 d_1 已不再是驻波节点。

介电参数 ϵ_r 测试原理如图 2-1 所示。

把由发射喇叭天线 P_{r0} 发射出的电磁波近似地看作平面波。

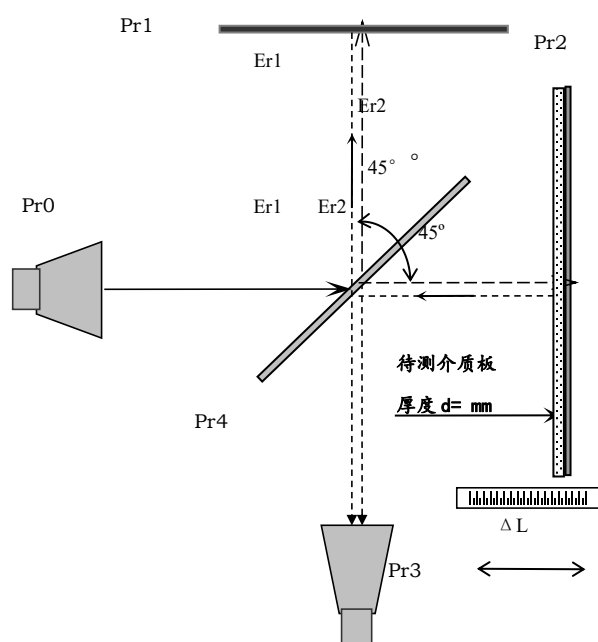


图 2-1 介电参数 ϵ_r 测试原理图

由于反射板 P_{r2} 前附着厚度为 δ 的 ϵ_r 介质板， ϵ_r 介质板的 $\mu_r = 1$ ，可认为由反射板 P_{r2} 反射回的电磁波场强 E_{r2} 与反射板 P_{r1} 反射回的电磁波场强 E_{r1} 幅值相等，引起的相位差为

$$\Delta\phi_\epsilon = \beta \cdot 2\delta = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot 2\delta$$

而

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{1}{f\sqrt{\mu_0\epsilon_0\epsilon_r}} = \frac{c}{f\sqrt{\epsilon_r}} = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_r}}$$

其中， λ_0 为空气中的电磁波波长，于是

$$\Delta\phi_\epsilon = \beta_0\sqrt{\epsilon_r} \cdot 2\delta = \frac{2\pi}{\lambda_0} \sqrt{\epsilon_r} \cdot 2\delta$$

厚度为 δ 的 ϵ_r 介质板不存在时，对应距离 2δ 所引起的相位移为

$$\Delta\varphi_0 = \beta_0 \cdot 2\delta = \frac{2\pi}{\lambda_0} \cdot 2\delta \quad (2-1)$$

加上 ε_r 介质板时引起的相位移为

$$\Delta\varphi' = \Delta\varphi_\varepsilon - \Delta\varphi_0 = \beta_0(\sqrt{\varepsilon_r} - 1) \cdot 2\delta \quad (2-2)$$

由于这一微小的相位改变，使得 P_{r3} 处不再是波节点。为了使 P_{r3} 处重新出现波节点，须将 P_{r2} 板移动一个小的距离 ΔL ，以改变 P_{r2} 板与 P_{r3} 喇叭间的距离，以补偿 ε_r 介质板引入所产生的滞后相位，即有 $\Delta\varphi' = \Delta\varphi$ ，由式 (2-1) 和式 (2-2) 整理可得

$$\varepsilon_r = \left(1 + \frac{\Delta L}{\delta}\right)^2 \quad (2-3)$$

完成了电介质参量 ε_r 的测试后，介质中其他电磁参数 λ 、 β 和 ν 分别可由下式求得：

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\varepsilon_r}} = \frac{\lambda_0}{1 + \frac{\Delta L}{\delta}} \quad (2-4)$$

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} = \beta_0\sqrt{\varepsilon_r} = \beta_0\left(1 + \frac{\Delta L}{\delta}\right) \quad (2-5)$$

$$\nu = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_r}} = \frac{c}{\left(1 + \frac{\Delta L}{\delta}\right)} \quad (2-6)$$

根据测出的 ε_r 值，还可确定该媒质与空间分界面上的反射系数和折射系数 R 、 T 。当平面波垂直投射到空气与媒质分界面时，利用边界条件得：

$$R_{0\varepsilon} = \frac{\eta_\varepsilon - \eta_0}{\eta_\varepsilon + \eta_0} = \frac{1 - \sqrt{\varepsilon_r}}{1 + \sqrt{\varepsilon_r}} \quad (2-7)$$

$$T_{0\varepsilon} = -\frac{2\eta_\varepsilon}{\eta_\varepsilon + \eta_0} = \frac{2}{1 + \sqrt{\varepsilon_r}} \quad (2-8)$$

对于平面电磁波由媒质向自由空间垂直投射时，则相应的反射系数和折射系数为

$$R_{\varepsilon 0} = \frac{\eta_0 - \eta_\varepsilon}{\eta_0 + \eta_\varepsilon} = \frac{\sqrt{\varepsilon_r} - 1}{\sqrt{\varepsilon_r} + 1} = -R_{0\varepsilon} \quad (2-9)$$

$$T_{\varepsilon 0} = -\frac{2\eta_0}{\eta_\varepsilon + \eta_0} = \frac{2\sqrt{\varepsilon_r}}{1 + \sqrt{\varepsilon_r}} = \sqrt{\varepsilon_r} T_{0\varepsilon} \quad (2-10)$$

由 R 、 T 的表达式不难看出，当测出 R 、 T 值时，也可确定相应材料的 ε_r 值。

四、 实验步骤及操作方法

1. 参照实验一“电磁波参量的研究”的要求；
2. 在放置 ε_r 介质板时，一定小心，不能改变测试系统的几何关系，否则将会引入误差，甚至导致数据不可靠，需从头再来。
3. 测量过程中，将移动云台的读数机构从刻度 10 一端，在此附近测出一个极小幅度（待测波节点）的位置，以便接下来向刻度 70 一端匀速移动，能测得更多的极小幅度（波节点）的位置，旋转读数机构上的手柄，使可移动全反射板随之匀速移动。同时，

转动时应小心，防止读数机构上的全反射板抖动造成的误差。

4. 为了消除机械回程误差，一定要做单向匀速移动。

大连理工大学实验数据记录

学院（系）：信息与通信工程学院 专业：电子信息工程 班级：电信 1806

姓名：刘祎铭 学号：201871080 组：

实验时间：2021.4.16 实验室： 实验台：

指导教师：李小兵

实验四 电磁波参量及均匀无耗介质参量的测量

Section I 电磁波参量的测量

- 根据固态信号发生器的频率表，设定 3cm 固态信号发生器的行波频率 f_0 。

表 1-1 设定 3cm 固态信号发生器的行波频率表

振荡器序号	测微刻度	行波频率 f_0 (MHz)	工作波长 $\lambda_0 = c / f_0$
0606124	3.615mm	9375	0.0320

- 驻波节点及波导波长的测量。

表 1-2 驻波节点测量表

节点序号	d_{n1}	d_{n2}	d_n	$\lambda_n = 2 d_n - d_{n-1} $
d_0	2.600	6.850	4.7250	
d_1	17.945	23.010	20.4775	
d_2	33.185	38.785	35.9850	31.015
d_3	49.535	54.665	52.1000	32.230
波长平均值 $\lambda = (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3) / 3$				31.583

要求测得的两个半波长之间的误差尽可能控制于 0.5 mm 内。

大连理工大学实验数据记录

学院（系）：信息与通信工程学院 专业：电子信息工程 班级：电信 1806

姓名：刘祎铭 学号：201871080 组：

实验时间：2021.4.16 实验室： 实验台：

指导教师：李小兵

实验四 电磁波参量及均匀无耗介质参量的测量

Section II 均匀无耗介质参量的测量

表 2-1 数据测量记录表

被测样品 测量计算值	ϵ_r 介质板厚度 δ : 8mm		
d_1 (无 ϵ_r 时)	17.945	23.010	20.4775
d_2 (无 ϵ_r 时)	33.185	38.785	35.9850
d_3 (无 ϵ_r 时)	49.535	54.665	52.1000
$\lambda_0 / 2$	15.792		
β_0	198.94		
d'_1 (有 ϵ_r 时)	11.915	16.488	14.2015
d'_2 (有 ϵ_r 时)	27.295	32.820	30.0575
d'_3 (有 ϵ_r 时)	42.690	48.801	45.7455
$\lambda'_0 / 2$	15.772		
ΔL	6.186		
$\epsilon_r = (1 + \frac{\Delta L}{\delta})^2$	3.144		
$\lambda = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_r}}$	17.813		
$\beta = \beta_0 \sqrt{\epsilon_r}$	352.751		
$\nu = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}}$	1.69×10^8		
$R = \frac{1 - \sqrt{\epsilon_r}}{1 + \sqrt{\epsilon_r}}$	-0.279		
$T = \frac{2}{1 + \sqrt{\epsilon_r}}$	0.721		

大连理工大学实验报告

学院（系）：信息与通信工程学院 专业：电子信息工程 班级：电信 1806

姓名：刘祎铭 学号：201871080 组：

实验时间：2021.4.16 实验室： 实验台：

指导教师：李小兵

实验四 电磁波参量及均匀无耗介质参量的测量

Section I 电磁波参量的测量

一、实验目的和要求

参见实验预习报告。

二、主要实验仪器

参见实验预习报告。

三、实验内容与原理

参见实验预习报告。

四、实验步骤及操作方法

参见实验预习报告。

五、实验数据记录与处理

1. 根据固态信号发生器的频率表，设定 3cm 固态信号发生器的行波频率 f_0 。

表 1-1 设定 3cm 固态信号发生器的行波频率表

振荡器序号	测微刻度	行波频率 f_0 (MHz)	工作波长 $\lambda_0 = c / f_0$
0606124	3.615mm	9375	0.0320

2. 驻波节点及波导波长的测量。

表 1-2 驻波节点测量表

节点序号	d_{n1}	d_{n2}	d_n	$\lambda_n = 2 d_n - d_{n-1} $
------	----------	----------	-------	--------------------------------

d_0	2.600	6.850	4.7250	
d_1	17.945	23.010	20.4775	31.505
d_2	33.185	38.785	35.9850	31.015
d_3	49.535	54.665	52.1000	32.230
波长平均值 $\lambda = (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3) / 3$				31.583

要求测得的两个半波长之间的误差尽可能控制于 0.5 mm 内。

3. 计算电磁波的主要参数： β 、 ν 。

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi}{31.583 \times 10^{-3}} = 198.94$$

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi}{31.583 \times 10^{-3}} = 198.94$$

$$\nu = \frac{2\pi f}{\beta} = 2.96 \times 10^8 \text{ (m/s)}$$

4. 将用微测刻度设定的的行波频率 f_0 与通过驻波场测得的波长 λ 换算的频率 f 比较说明。

$$f_0 = 9375 \text{ MHz}$$

$$f = \frac{\nu}{\lambda} = \frac{2.96 \times 10^8}{31.583 \times 10^{-3}} = 9372 \text{ MHz}$$

$$f = \frac{\nu}{\lambda} = \frac{2.96 \times 10^8}{31.583 \times 10^{-3}} = 9372 \text{ MHz}$$

$$\text{波长误差: } \Delta_1 = \frac{|f_0 - f|}{f} \times 100\% = 0.03\%$$

整体误差较小，处于误差允许范围。说明使用插值法拟合出来的 9.375GHz 对应的螺旋测微器的刻度是符合实际情况的，是能够满足实验目的和要求的。

计算的微波频率 $f < f_0$ 理论频率值, 误差原因分析如下:

实验中，在调节发射微波频率时，首先由于所采取的频率并非商家提供参考值，是实验中采取插值法拟合曲线所得，且曲线按线性拟合，与实际情况可能有些差距，导致其对应的刻度值计算有偏差。另外，在调节千分尺时，由于精度以及估读偏差产生了另一部分误差。

六、实验结果分析

1. 完成数据运算及整理，计算出电磁波波长。

根据公式：

$$\lambda_n = 2|d_n - d_{n-1}| \quad \text{式(1-3)}$$

与：

$$\lambda = (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3) / 3 \quad \text{式(1-4)}$$

电磁波波长 $\lambda = 31.583 \text{ mm}$ 。

2. 对实验中的现象分析讨论，并对实验误差产生的原因进行分析。

- 1) 实验中，半透半反镜以及两个反射板的角度关系均为目测，存在一定偏差。
- 2) 微波发生器频率设定时，其所对应的刻度值是通过插值法，利用线性拟合来获得频率对应刻度值。二者不是严格对应存在一定误差。
- 3) 各个千分尺等读数时有一定的数值偏差
- 4) 实验中发现 3cm 微波发生器其发射的微波幅值处于抖动状态，致使判断产生一定偏差。
- 5) 实验室中人员较多，实验设备也较多，各组之间存在一定的干扰。
- 6) 手机信号干扰
- 7) 理论计算中，是假设了介质板和反射板是无限大，忽略了电磁波在空间传播的泄露；而实际测量中，由于金属反射板是有限长的，会有未被反射的电磁波，对实验结果有一定影响。
- 8) 金属板与固定座之间存在长杆效应，金属板并非垂直，存在很大晃动，且不可忽略。

七、 问题与建议、体会

1. 思考题：用相干波测电磁波波长时，若将图 1-1 中的介质板 P_{r4} 旋转 90 度放置，将会出现什么现象？这时能否测准 λ 值？为什么？

若将图 1-1 中的介质板旋转 90 度，不难得知两路波传输路径长度不相等。其中一路微波由半透半反镜直接反射至接收仪，而另一路经过折射-反射-反射-折射再被接收器接收，导致二者在传播中衰减量相差太大，最终振幅不一，对于最后波节点的判断有一定困难，最后测得的 λ 不够精确。

2. 电流表指示值过大或过小应如何处理？

若出现电流表指示值过大过小，则通过旋转发射臂上的信号衰减旋钮，使得最后电流表上指针偏转在 70% 左右即可。

3. 举例指出本平台实验和对应的仿真实验的异同点，哪些点是相互印证的，哪些点是相互补充的。

相互印证：电磁波入射介质会发生透射与反射；

补充：迈克尔逊干涉仪的原理的验证是对电磁波干涉现象的补充；

4. 实验过程中，有时即使不进行任何操作，微安表也会轻微摆动，请说说可能的原因，有什么方法能够减少这种现象？

- 1) 实验室中人员较多，实验设备也较多，各组之间存在一定的干扰。可以使各组使用不同极化方式，避免各组之间干扰。

- 2) 微安表灵敏度极高，为了防止 0 点处测量误差较大，可以取 0 点出两侧幅度为 10% 的两点位置的平均值，因为幅度的 10% 的测量要精准很多。
- 3) 金属反射板 Pr1 和 Pr2 发生晃动，解决方法：①在移动 Pr2 板时尽量缓慢，移动完毕后稍等一会（等待晃动停止）再进行测量。

5. X 波段微波照射对人体是否安全？请查找相关信息，有相关法律或条例吗？

5.1 不绝对安全，X 波段通常的下行频率为 7.25-7.75 GHz，上行频率为 7.9-8.4 GHz，也常被称为 7/8 GHz 波段（英语：8/7 GHz X-band）。而 NASA 和欧洲空间局的深空站通用的 X 波段通信频率范围则为上行 7145-7235 MHz，下行 8400-8500 MHz。我国的国标是《环境电磁波卫生标准 GB9175-88》，该标准所称电磁波涵盖了长波、中波、短波、超短波和微波，100KHz-300GHz。其中最严格的是 1 级标准，含义是老弱病残、孕妇、婴幼儿长期暴露都处于安全的，其具体功率强度值是每平方厘米小于 10 微瓦。^[1]

5.2 【环球网报道 实习记者 关超】据日本《读卖新闻》6 月 6 日报道，为有效应对弹道导弹攻击，美日两国政府此前已决定在日本京都府京丹后市的航空自卫队经岬分屯基地部署“X 波段雷达”。对此，京都府于 4 日召开专家座谈会，具体讨论了“X 波段雷达”对当地居民健康的影响。据报道，参加会议的有京都大学电磁学教授佐藤亨、铁道综合技术研究所主任研究员池畑政辉等 4 名专家。^[2]

X 波段的电波特性决定了当其照射到人体时，约有 6-7 成会被反射，剩而余的部分射线基本会被皮肤吸收掉”、“一般不会引发癌症、脑瘤以及白血病等”

5.3 雷达微波防护工程早些年就已经开始进行了。各级领导对雷达兵的工作环境和身心健康比较关心，所以还是属于比较重视的工程项目。雷达微波防护工程早些年就已经开始进行了。各级领导对雷达兵的工作环境和身心健康比较关心，所以还是属于比较重视的工程项目。70 年代 513 警戒雷达的手册，只字未提微波的危险问题。在《解放军预防医学杂志》上面发表过相关调查结果。眼睛易疲劳、易疲倦、失眠、多梦、注意力不集中和记忆力衰退占雷达兵症状的前六位。^[3]

5.4 以 2KW 和 4Kw 航海雷达为例研究受辐射危害的安全距离见附录 1。^[4]

5.5 **相关国家标准规定：**GB 12638-1990 《微波和超短波通信设备辐射安全要求》

6. 请简单描述发射天线传播中轴线上的电场波形。

微波课程还未学习到天线部分，不过通过电磁场与电磁波课程和查阅天线有关书籍可知，天线辐射有近场与远场之分，天线的近区比较特殊，近区整体而言是不向外传播能量的，所以近区的电磁场波动比较复杂，故一般只考虑远区电磁场的极化特性，发射天线传播中远区轴线上的电场波形主要有如下 3 类：线极化波：

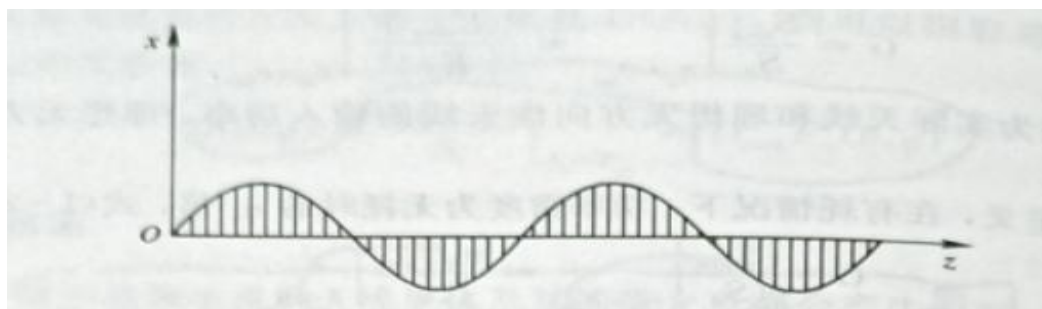


图 4-2-1 线极化波电场特性

右旋(椭)圆极化波：

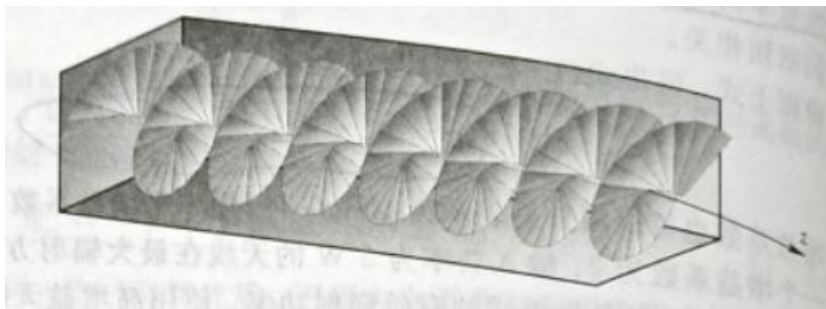


图 4-2-2 右旋(椭)圆极化波电场特性

左旋(椭)圆极化波：

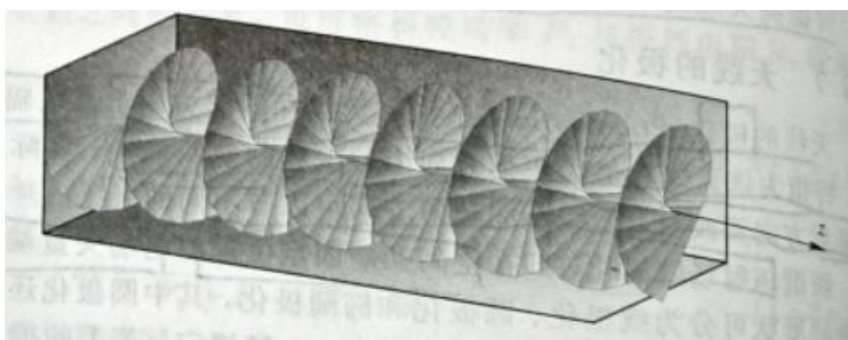


图 4-2-3 左旋(椭)圆极化波电场特性

7. 对实验的建议与体会。

反射板和固定座之间存在严重的长杆效应，会放大误差，也会造成晃动和位移。而这些位移大小不可忽略，是实验仪器存在的严重问题，建议更换实验仪器。

实验四 电磁波参量及均匀无耗介质参量的测量

Section II 均匀无耗介质参量的测量

一、实验目的和要求

参见实验预习报告。

二、主要实验仪器

参见实验预习报告。

三、实验内容与原理

参见实验预习报告。

四、实验步骤及操作方法

参见实验预习报告。

五、实验数据记录与处理

表 2-1 数据测量记录表

被测样品 测量计算值	ϵ_r 介质板厚度 δ : 8mm		
d_1 (无 ϵ_r 时)	17.945	23.010	20.4775
d_2 (无 ϵ_r 时)	33.185	38.785	35.9850
d_3 (无 ϵ_r 时)	49.535	54.665	52.1000
$\lambda_0 / 2$	15.792		
β_0	198.94		
d'_1 (有 ϵ_r 时)	11.915	16.488	14.2015
d'_2 (有 ϵ_r 时)	27.295	32.820	30.0575
d'_3 (有 ϵ_r 时)	42.690	48.801	45.7455
$\lambda'_0 / 2$	15.772		
ΔL	6.186		
$\epsilon_r = (1 + \frac{\Delta L}{\delta})^2$	3.144		
$\lambda = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_r}}$	17.813		
$\beta = \beta_0 \sqrt{\epsilon_r}$	352.751		
$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}}$	1.69×10^8		

$R = \frac{1 - \sqrt{\epsilon_r}}{1 + \sqrt{\epsilon_r}}$	-0.279
$T = \frac{2}{1 + \sqrt{\epsilon_r}}$	0.721

六、实验结果分析

1. 按照数据测量记录表，完成数据的整理与计算。

数据整理与计算看上表 2-1

2. 对实验中的现象分析讨论，并对实验误差产生的原因进行分析。

1) 实验中，半透半反镜以及两个反射板的角度关系均为目测，存在一定偏差。

2) 微波发生器频率设定时，其所对应的刻度值是通过插值法，利用线性拟合来获得频率对应刻度值。二者不是严格对应存在一定误差。

3) 各个千分尺等读数时有一定的数值偏差

4) 实验中发现 3cm 微波发生器其发射的微波幅值处于抖动状态，致使判断产生一定偏差。

5) 实验室中人员较多，实验设备也较多，各组之间存在一定的干扰。

6) 手机信号干扰

7) 理论计算中，是假设了介质板和反射板是无限大，忽略了电磁波在空间传播的泄露；而实际测量中，由于金属反射板是有限长的，会有未被反射的电磁波，对实验结果有一定影响。

8) 金属板与固定座之间存在长杆效应，金属板并非垂直，存在很大晃动，且不可忽略。

.....
以下反射板指的是 Pr2

本实验的设计存在严重问题，不符合物理实验基本要求与原则。本实验所提供的设备与仪器的精度根本不满足实验应有的精准度。测量的结果也是一个随机数据，与实验运气有很大关系，实验结果应符合正态分布。

线下实验二的核心在于测量 ΔL ，而 ΔL 是加上介质板后波节点的变化距离，这是一个很精密的量，为了保证它的精度，使用的测量工具是千分尺；但是，仪器在设计的时候很不完善，完全没有考虑到又大又重的介质板对反射板和反射板与底座的连接杆形变的影响，存在长杆效应，也没有考虑到反射板与反射杆连接处的稳定性，甚至没有考虑到长连接杆对板子的晃动的影响。反射板与反射杆连接处只有一个螺旋固定，反射板固定不住，又是很长的连接杆，即便底座的位移很精准，长连接杆会对小的误差有很大放大效应。在介质板安装时不可避免造成形变和反射板的位移，造成 0.5mm 左右的误差是不可避免的，这是仪器设计的本身的设计与制造缺陷。

.....

.....
 为了保证测量的准确性，应该加强反射板与千分尺连接的稳定性，减小千分尺与反射板之间的距离，避免二者直间长距离造成的误差放大效应。

ϵ_r 的精度主要只与 ΔL 的精度有关，而提供的仪器在安装介质板前后就会产生较大人为形变， ΔL 用提供的仪器是测不准的，是提供不了 0.1mm 的精度，而与摆放的角度和波的频率及微安表的晃动之间关系不大，希望注意并加以改进。

七、 问题与建议、体会

1. 思考题：除了上述的应用相干波节点位移法，测试均匀无损媒质参量的 ϵ_r ，你还能设计出其它的方案实现均匀无损参量 ϵ_r 的测试吗？如果可以，请说明测试原理。

由于在实验中采用的介质板，相对磁导率 $\mu_r \approx 1$ ，另外有公式： $n = \sqrt{\mu_r * \epsilon_r}$ ，当相对磁导率 $\mu_r \approx 1$ 时， $n = \sqrt{\epsilon_r}$ ，所以利用自准直法等测量玻璃板的折射率，平方即可得到相对介电常数 ϵ_r ，但由于折射率与波频率也有关系，所以存在一定误差。

2. 举例指出本平台实验和对应的仿真实验的异同点，哪些点是相互印证的，哪些点是相互补充的。

与仿真实验共同验证了电磁波入射 $\epsilon_r > 1$ 的介质后波长会变短。

3. 对实验的建议与体会。

建议赶紧更换仪器或者加以调试，否则做出来的结果真的就成正态分布了。从前一实验中前后测量的 λ_n 有误差，这是仪器长杆效应的一种体现，在基本可以排除换介质板的人为位移下，也有不可忽略的误差，说明板子有相对固定座的不可忽略的晃动和位移，也可以从侧面验证长连接杆对远距离固定座和反射板之间相对位移误差的放大作用。而实验二中核心在于测量 ΔL ，而在加装介质板时还会造成金属板的位移和旋转，而且这些位移对于实验要求的精度要求来说是极大的，是实验设计的错误。

参 考 文 献

- [1]. Bhag Singh Guru 等，《电磁场与电磁波》（第 2 版），机械工业出版社等，2005 年
- [2]. 王强, 曾兆进. 078 微波辐射对人体健康的影响[J]. 国外医学卫生学分册, 2003. 30(4): 234-238.
- [3]. 肖育红. 低强度微波辐射环境对男性生殖健康的影响[D]. 大连: 大连医科大学, 2006: 1-24.
- [4]. 朱文赫, 沈楠, 徐俊杰, 钟秀宏, 吕士杰. 微波辐射对人能量代谢及心肌细胞凋亡的影响[J]. 中国病理生理杂志, 2015. 31(4): 647-651.

附录 1

Marine Radar 2kW/4kW Non Ionizing Radiation Hazards

Author: Dr R.S. Mowbray C.Eng. MIEE MIEEE

Preface

The radiation hazard posed by marine radome scanners is a gray and sometimes controversial subject area and in this respect is similar to many long term environmental exposure health risks (mobile phones, dental amalgam etc) which are difficult to prove or disprove due to the logistics in collecting conclusive long term epidemiology data. The purpose of this report is to provide some background material for informed discussion.

Recognised Standards / Authorities

Probably the highest worldwide authority on this subject is the International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP) which produces guidelines for exposure limits for all non-ionizing electromagnetic frequencies and magnetic fields. These guidelines are published on the web here: www.icnirp.de and for X-band marine radar the radioisotropy limits can be summarised as:

- for occupational exposure: 100W/m^2 or 10mW/cm^2
- for general public exposure: 10W/m^2 or 1mW/cm^2

The occupational category is based on the presumption that a worker is informed of the risk by knowing the location of the risk, what that risk is, and the required procedures in place if exposure limits are likely to be exceeded. He is getting paid to work with the risk so there is some remuneration for the exposure so is close to "voluntary" exposure as part of employment.

The general public category is for unwitting "involuntary" exposure to ordinary folk going about their life.

A crew member could be expected to work around the radar to the occupational limit but passengers should not be expected to be able to get closer than the general public min safe distance – this should be taken into consideration during planning the radar installation. The leisure marine market demands the relevant guideline be general public exposure levels so that people enjoying their leisure time are not exposing themselves to workplace level radiation hazards. Most boaters will have guests and family aboard who need to be protected or properly informed.

The International Maritime Organization apply these below exposure limits through the IEC standards 60936 and 62252 which both state that the minimum safe distance to these radioisotropy levels should be published in the user handbook / installation manual. A selection of the published data is given in the following table.

	Power / Antenna Size	Min Safe Distance*	
		Occupational (100W/m ²)	General Public (10W/m ²)
Navico BR24 solid state radome	100mW / 18"	Nil	Nil
Navico 9174 series magnetron radomes	2kW / 18"	0.5m	1.4m
Raymarine RD218	2kW / 18"	Nil	1.0m
Furuno 1724C	2kW / 18"	Nil	1.5m
Navico 9174 series magnetron radomes	4kW / 24"	0.9m	2.8m
Raymarine RD424	4kW / 24"	Nil	1.0m
Furuno 1734C	4kW / 24"	0.4	4.0m
Simrad DX45	4kW / 18"	0.69m	2.18m
Simrad DX60	4kW / 24"	0.79m	2.50m

[*] measured from the centre axis of the radome not from the outside edge of the radome itself.

Calculations and Measurement

Due to near field propagation and practical antenna design limitations, measuring radioisotropy is the only effective way of determining these minimum safe distances; however a simplified theoretical calculation based on a point radiator can be used as a rule of thumb for establishing a lower bound for a given transmit average power level and antenna gain:

$$\text{Approximate distance to near field / far field intersection} \quad d_i = \frac{G\lambda}{8\pi} \quad m$$

Where G is the antenna gain, λ is the electromagnetic wavelength and d is distance in meters. This distance can be used as the absolute minimum safe distance if the far field radioisotropy calculation shows less than this value.

$$\text{Far field radioisotropy, } Q, \text{ can be calculated as} \quad Q = \frac{PG}{4\pi d^2} \quad \text{Wm}^{-2}$$

$$\text{Which can be rearranged:} \quad d = \sqrt{\frac{PG}{4\pi Q}} \quad m$$

$$\text{So for } 10\text{W/m}^2, \text{ minimum safe distance can be calculated as:} \quad d_{10\text{Wm}^{-2}} = \sqrt{\frac{PG}{40\pi}} \quad m$$

$$\text{And for } 100\text{W/m}^2, \text{ minimum safe distance can be calculated as:} \quad d_{100\text{Wm}^{-2}} = \sqrt{\frac{PG}{400\pi}} \quad m$$

Example: an X-band 2kW radome with long pulse duration of 1us, repetition frequency 600Hz and antenna gain 158.5 (22 dB) can be analysed as follows:

$$d_i = \frac{158.5 \times 0.0032}{8\pi} = 0.20 \quad m \quad (\text{near/far field intersection})$$

$$d_{10\text{Wm}^{-2}} = \sqrt{\frac{2000 \times 0.000001 \times 600 \times 158.5}{40\pi}} = 1.23 \quad m \quad (\text{general public exposure})$$

$$d_{100\text{Wm}^{-2}} = \sqrt{\frac{2000 \times 0.000001 \times 600 \times 158.5}{400\pi}} = 0.39 \quad m \quad (\text{occupational exposure})$$

Note that these calculations are not a replacement for radioisotropy measurement but serve as a general guide in the absence of accurate measurement data.

Summary

The lower power 2kW and 4kW marine radome scanners are not absolutely intrinsically safe by the non-ionizing radiation hazard definition given by ICNIRP so sensible precautions should always be applied to their installation and use in the field. This is the primary reasoning behind the IMO minimum safe distance requirements. Even considering the fact that the antenna is (normally) rotating which will significantly reduce the overall average exposure, it remains advisable to avoid prolonged eye exposure and close proximity of critical medical electronics, added to that it is probably sensible to restrict exposure to pregnant women and young children even if current opinion is that this would be safe at the ICNIRP limits. We live with environmental and man made hazards all the time and personal judgement is required within current limits, but if a "safer" option such as that offered by low power solid state radar is available for smaller vessels where