

文章编号:1005-4642(2023)07-0031-05

第 3 届欧洲物理奥林匹克竞赛实验试题介绍与解答

刘子睿^{1,2}, 王 槿^{3a,3b}, 宋 峰^{3a}

(1. 清华大学交叉信息研究院, 北京 100084; 2. 中国人民大学附属中学, 北京 100080;
3. 南开大学 a. 物理科学学院; b. 基础物理国家级实验教学示范中心(南开大学), 天津 300071)

摘 要:第 3 届欧洲物理奥林匹克竞赛的实验试题为无线电波的传输, 试题利用 1 组无线电波发射器与接收器, 探讨了等厚干涉、介质对波的吸收、波导中波的衰减、介质的折射率和倏逝波等物理现象. 本文介绍了该实验试题内容和详细的解答. 实验试题设计新颖, 可开设为电磁波的综合性实验.

关键词:欧洲物理奥林匹克竞赛; 微波; 波导; 折射率

中图分类号: O441.4

文献标识码: A

DOI: 10.19655/j.cnki.1005-4642.2023.07.006

第 3 届欧洲物理奥林匹克竞赛(European Physics Olympiad, EuPhO)于 2019 年 5 月 31 日至 6 月 4 日在拉脱维亚里加(Riga)举办. 竞赛试题包括 3 道理论题与 1 道实验题, 其中实验题为无线电波的传输(Propagation of radio waves), 基于无线电波在自由空间与圆形截面波导中的传播. 围绕该命题, 本文探讨了等厚干涉、介质对波的吸收、波导中波的衰减、介质的折射率和倏逝波等物理现象, 这些内容可以作为基础物理实验中的波的传播的相关实验的拓展, 也可与一些专业实验结合.

1 试 题

1.1 实验介绍

电磁波在生产与生活中应用广泛, 许多技术进步都基于其传播的性质. 本实验将探讨无线电波在水中、空气中与波导中的传播性质^[1].

实验器材如图 1 所示. 装在防水外壳中的单色无线电波发射器(频率为 200 MHz~5 GHz), 在图 1 中以 A 标识; 其波源位置在图中用虚线标出. 与之匹配的为接收器 B, 测量接收到的电磁波功率 P (单位为 dB), 功率读数为 $10 \lg \left(\frac{P}{1 \text{ mW}} \right)$. 接收器每 15 s 产生 1 个读数, 其探头位置在设备

上用红色三角形标出. 注意: 接收器不防水, 发射器的外壳防水且密封, 不可以打开发射器!



图 1 实验器材图^[1]

其他器材: 金属管 C (内径分别为 41, 46, 59, 100 mm), 塑料管 D (其一端密封), 平底塑料箱 E (无线电波穿过箱壁的相位移可以假设小到可忽略), 铝箔 F, 4 块泡沫塑料 G (可用做建立电磁屏蔽发射器的容器), 尺子 H, 装有水的塑料桶 I, 水罐 J, 塑料杯 K, 一些纸巾 L, 细绳 M, 夹子 N, 胶带 O, 橡皮筋 P, 木棍 Q.

收稿日期: 2023-02-20; 修改日期: 2023-05-05

基金项目: 2020 高等学校教学研究项目 (No. DJZW202010hb)

作者简介: 刘子睿 (2004—), 男, 黑龙江尚志人, 清华大学交叉信息研究院 2022 级本科生, 毕业于中国人民大学附属中学. E-mail: hal23jh@163.com

通信作者: 王 槿 (1982—), 女, 湖北十堰人, 南开大学物理科学学院高级实验师, 博士, 研究方向为基础物理实验、仪器仪表及生物医学光子学. E-mail: wangjin8208@nankai.edu.cn

发射器已和接收器配对,接收器将所有其他发射器发出的信号屏蔽. 应该注意无线电波会在房间中的各种物体(包括人体)上反射,并产生波的干涉. 因此将手靠近接收器或移动身体可能会影响接收器的读数. 接收器的功率示数也受到接收器和发射器之间空间取向的影响. 在使用铝箔产生屏蔽时要注意,即使是很小的孔洞或空隙(比如,在图 2 中的铝箔和箱子之间)也可能产生无线电波的泄露.

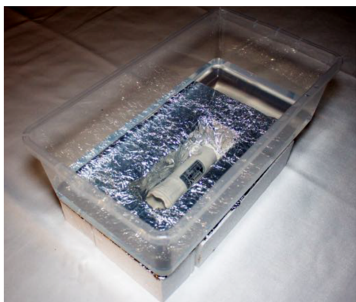


图 2 实验仪器图^[1]

1.2 实验任务

实验任务 1~4 是互相独立的,可以以任意的顺序完成. 请画出使用的所有实验仪器的草图,要求强调重要的设计细节,写出使用的所有公式,列表写出所有测量数据,合适时也应作图. 不需要估计不确定度,但需要尽可能精确地测量.

1.2.1 任务 1:接收器的灵敏度(1分)

接收器可测的最低功率(mW 为单位)?

1.2.2 任务 2:水中的波长(6分)

测量无线电波在水中的波长. 可以采用图 2 中实验方案.

在以下问题中,考虑无线电波在充有介质(水或空气)的金属管中的传播,有

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_0(r, \varphi) e^{-\alpha z} e^{i(kz - \omega t)}, \quad (1)$$

其中, \mathbf{E} 为电场矢量, α 为因为介质中耗散而引起的衰减(对于水 $\alpha > 0$, 对于空气 $\alpha = 0$), k 为波矢, ω 为波的角频率,采用柱坐标系 r, φ, z . 函数 $\mathbf{E}_0(r, \varphi)$ 为在波导横截面上的驻波.

横截面上不同的驻波对应的是波在波导中的不同传播模式. 波导中波的色散关系为

$$\omega^2 = (k_*^2 + k^2)c^2, \quad (2)$$

其中, c 为波导中填充介质中的光速, k_* 是只与圆柱的直径和传播模式有关的正常量. 在实验中,除了 k_* 最小的模式以外,所有其他模式都可以忽

略. 注意仅当其频率足够高,即 $\omega \geq ck_*$ 时,波可以在波导中以有实数的波矢 k 做无衰减传播. 对于更低频率的波动,式(1)和式(2)仍然成立,对应于衰减的(倏逝的)模式,从而产生虚的波矢,即 $k = i\mu$, μ 为衰减系数.

1.2.3 任务 3:水中的衰减(3分)

确定水中的衰减系数 α .

提示:塑料管被水充满且被铝箔紧紧包裹,无线电波可在其中传播. 用胶带来防止管子倾倒.

1.2.4 任务 4a:空气波导中的衰减模式(2分)

将发射器放在直径 $d_1 = 46$ mm 的铝管中,探究位于管口的接收器接收到的无线电波功率 P 随着发射器距离管口的距离 z 的变化规律. 展开测量 P 相对于 z 的函数,确定衰减系数 μ .

1.2.5 任务 4b:(5分)

完成系列测量,确定衰减系数 μ 对于管径 d 的依赖关系. 提出函数关系,并利用实验来验证.

1.2.6 任务 5:空气中的波长和水的折射率(3分)

确定这些无线电波在空气中的波长,并计算水对于无线电波的折射率.

2 试题解答

结合主办方的参考解答和优秀考生解答^[2-5],可行的实验方案及相关推导的分析如下.

2.1 任务 1 的解答

实验中环境的背景辐射引起接收器显示“—”(即未检出),所以在整个题目设计中,都没有扣除背景辐射. 这也导致了实操下很难获得很小的非零读数. 具体实验中,由于电磁波在空气中的衰减较小,在短距离时,最小读数的测量可能需要使用屏蔽,即将发射器放到铝管中,或者尝试使用多层铝箔封住.

实验中测量的最小示数在 -128 dB 左右,利用功率读数为 $10 \lg\left(\frac{P}{1 \text{ mW}}\right)$,得到灵敏度约为 1.58×10^{-13} mW.

2.2 任务 2 的解答

仔细观察图 2,可以发现发射器被放置在水下的屏蔽盒中,使得其发出的电磁波只能向上传播. 如图 3 所示,接收器不防水,只能放置在水面上,如果向盒中逐渐加水,有限深度的水层会产生等厚干涉的效果,接收器示数随着水的深度有可见的峰谷排布,其中各峰出现的距离应为 $\lambda/2$. 因

此可用作图法来求出 λ ,测得 λ 在45 mm左右.在水深接近零时的读数可能会有较大的误差,所以实际测量时可以从零深度开始.

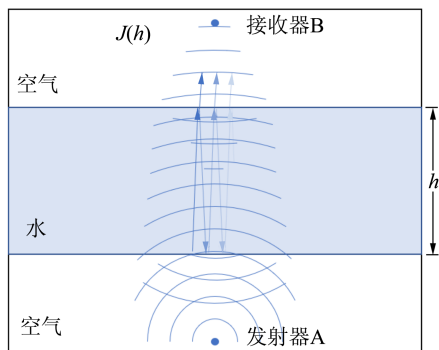


图3 任务2实验示意图

题干中提示考生注意屏蔽.实际操作时,如果水箱和其下铝箔屏蔽箱间留有空隙,则会造成电磁波泄露,影响数据的信噪比.可通过平整铝箔表面并将水箱压上去的方式来减少空隙.

同时可以注意到,本题中近似为平面波,水箱的尺寸并不远远小于波长.所以考生普遍采用的方法可能引起不可忽略的误差.若有条件,可以在水箱中间使用铝箔制作足够小的矩形波导,并利用矩形波导基波模式的色散公式 $\omega^2 = c^2 \left[k_z^2 + \left(\frac{\pi}{a} \right)^2 + \left(\frac{\pi}{b} \right)^2 \right]$ 来修正得到更加精确的答案(其中 a 与 b 为矩形波导的边长).

2.3 任务3的解答

从题目中可以得到,水中的功率衰减为: $P = P_0 e^{-2\alpha z}$.通过简单推导,可知

$$J = \frac{10}{\ln 10}(-2\alpha z) + C_1, \quad (3)$$

其中, J 为以dB为单位的示数, C_1 为常量.这一关系是线性,于是可以根据线性作图或最小二乘法来得出 α .本题中,因为水对于无线电有很大的折射率,导致其在水中的波长显著缩短.这样,其在装有水的管子中的传播并不是倏逝的,然而,在相同孔径的空气管中的传播却是倏逝的.这导致注水需至铝箔包裹到的高度(以防止产生任何空气波导段),否则将会由于空气段的倏逝波传播导致很大的误差.

实际操作时,将外壁与底全部包上铝箔的塑料管正立在桌面上,并将水注满到顶端,并将发射器放在水中,接收器放在管口,如图4所示.

在测量水深的过程中,可以合理地使用题中

提供的绳子等器材.其实,在本题中,只有距离差是重点,所以不修正距离零点的测量方法也可以得到正确的结果.总之,在测量水深的部分,本实验提供了一定的自由度,但需要注意实验方法不能产生理论上的错误.在水深确定以后,就可以通过对数线性拟合来确定衰减系数 α ,衰减系数 α 测量的结果在 0.05 cm^{-1} 左右.

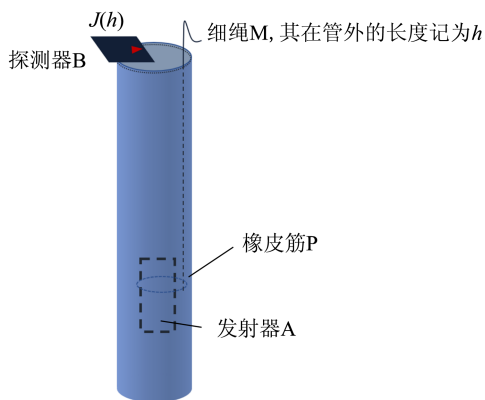


图4 任务3的实验设计方案

2.4 任务4a的解答

类似任务3,本题的数据处理也是对功率的线性拟合,拟合公式为

$$J = \frac{10}{\ln 10}(-2\mu z) + C_2, \quad (4)$$

空气中的位置测量比任务3中水中测量的操作简单.可以水平放置管子,从管的一侧用木棍或尺子将发射器推入管内并记录距离,如图5所示.改变发射器位置大于5次,记录数据.拟合得到的衰减系数 μ 在 94.5 m^{-1} 附近.

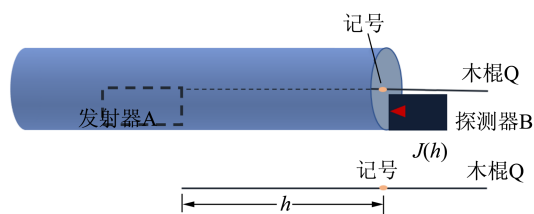


图5 任务4的实验方案

2.5 任务4b的解答

通过使用题目关于 k_* 对其他参量的依赖关系的提示,可以确定在固定振动模式(本题中为最低阶衰减模式)下, k_* 应只和直径 d 有关.因此,通过量纲分析得到

$$k_* = \frac{C_*}{d}, \quad (5)$$

其中 C_* 仅和振动模式相关. 结合式(2)可得

$$\mu^2 = \frac{C_*^2}{d^2} - k_0^2, \quad (6)$$

其中 $k_0 = \frac{\omega}{c}$ 为充满空气的自由空间中的波矢量.

对不同的管径重复任务 4a 中的操作, 得到一系列 $\mu(d)$, 对式(6)进行线性拟合, 如果拟合系数较高, 则可以说明此公式成立.

在网站给出的优秀考生答案当中, 可以发现考生对于利用量纲分析发现式(5)和(6)普遍有较大的困难, 而多数考生转而猜想 μ 与 d 为简单的线性关系 $\mu = a + bd$ 或幂函数关系 $\mu = ad^b$. 由于本题中数据点较少(仅 4 个), 并且部分考生数据误差较大, 这样的拟合也可以得到较大的拟合系数. 然而, 由于这样的关系缺乏物理意义, 采用后会导致任务 5 计算困难.

2.6 任务 5 的解答

若在任务 4b 中采取式(5)和(6)的推导, 那么在拟合过程中即可在截距上发现 $-k_0^2$, 进而可以推导出空气中的波长, 实际考试中采用的发射器发射的电磁波在空气中的波长为 34 cm. 水对于无线电波的折射率为 7.3. 如果考生在发现任务 4b 中隐含的物理关系时存在困难, 将难以通过上一问的推导得出空气中的波长.

3 讨论与分析

3.1 答题情况分析

本题命题相对新颖, 同时也有一定难度. 本题满分 20 分, 实验部分总平均得分为 3.8 分, 最高分 11.3 分^[6-7]. 评分时按照问题 1~3 与问题 4~5 分为 2 部分统计分数. 第一部分平均得分为 2.4 分, 最高分 8.9 分; 第二部分平均得分为 1.5 分, 最高分 4.1 分. 两问的得分均集中在低于 3 分, 这表明考生入手本题普遍存在困难. 本题对实验设计和装置搭建要求高, 数据处理上的线性化较复杂. 任务 4b 需要考生根据提示推导合理的物理函数, 整体难度较大. 特别地, 第二部分最高分 4.1 分的答案^[4] 同样在任务 4b 没有得出正确的物理关系. 另外, 在任务 3 中, 为避免空气波导引起的衰减, 需要始终保持水面与铝箔上沿同高. 这在考场中不是所有考生都可以做到^[2].

本题涉及较多可能带有误差的测量, 部分考生选择了做平均的方式. 本题中对于对数量做平

均有 2 种方式: 直接平均以 dB 为单位的对数量, 或者将其转化为线性量再平均. 事实上这 2 种“平均”方式都有其道理, 不同实验者在不同环境中会倾向于不同的平均方式. 在本题中, 2 种平均方式得出的结果无本质区别: 因为在大部分拟合公式中出现的是对数量而不是线性量, 所以 2 种平均方式所差的 1~2 个数量级易被忽略.

3.2 命题背景与分析

1862 年, 麦克斯韦预言电磁波在真空中传播速度为 $c = 1/\sqrt{\epsilon_0\mu_0}$, 此速度和当时测量的光速极为接近, 于是麦克斯韦推断光就是一种电磁波^[8]. 随着物理学的发展, 电磁波理论拓展到可见光以外波段的各个领域, 产生了广阔的应用空间.

本题研究无线电波的传输, 不同于国内基础实验中通常采用的针对超声波的衰减研究实验, 无线电波传输的物理现象丰富, 实验设计新颖. 除了发射器和接收器外, 其他都是生活中常用物品, 本题充分体现了实验设计的思路, 例如本题中提供的绳子与木棍, 如果适当使用, 可以大幅降低发射器位置测量的难度, 并且在解题方法上为考生提供了充分的自由度. 从结果来看, 本题第 2 部分总体难度相对较大. 在研究内容上, 通过等厚干涉测量了无线电波在水中的波长, 测量了在水介质波导中无线电波的衰减, 并通过波导色散方程测量了无线电波在空气中的波长, 进而计算得出水对于无线电波的折射率.

在波导中电磁波的衰减共有 2 项: 与倏逝波相关的 μ 项和与介质损耗相关的 α 项. 水对于 GHz~THz 波段的电磁波的吸收复杂, 其中部分吸收峰的产生机理仍在研究中. 此波段中水吸收峰的复杂性与其极性分子的特性与较强的分子间相互作用(主要为氢键)密切相关. 以往的研究实验数据表明: 水在 20 GHz 附近有很高的吸收峰^[9]. 该吸收峰形状可以被德拜函数很好地拟合, 且其行为与一些玻璃形成液中的 α -弛豫过程峰极度相似, 表明其可能对应于群体转动效应相关的吸收^[10]. 除了以上说明的 20 GHz 峰外, 还存在 1 个略高于 1 THz、室温下埋没在 20 GHz 峰内、机理并不十分明确的小峰. 此外, 在 5 THz 附近, 存在 1 个由氢键拉伸振动产生的峰; 在 20 THz 附近, 还有 1 个由分子取向小角振动产生的峰^[10].

本题中利用生活常见物品自主搭建实验架构

的设计尤其值得借鉴. 该方式可以避免因实验架构过于完善而出现的解答单一化、套路化的问题,有助于提升学生的实验设计能力. 实验设计中需要综合考虑波的发射波长附近水的吸收情况以及接收器的灵敏度等,能在有限空间(此处为水槽)采集到足够多的信号. 在选择合适的发射器和接收器的基础上,可以尝试进行实验项目的转化.

4 结束语

本题作为竞赛实验题,具有一定的难度. 在实验过程中,考生需要对实验的物理模型始终有清晰的认识,并在实验设计与拟合公式当中熟练应用. 本题对于不确定度分析没有明确要求,但实验结果的精确程度会影响到拟合. 作为自组的综合性实验,本题的实验设计思路值得参考. 欧洲物理奥林匹克竞赛注重物理背景知识,线下实验设计开放,在教学中有一定的借鉴意义.

致谢:感谢爱沙尼亚塔林理工大学 Jaan Kalda 教授对于题目设计、参量选取与解答部分的讨论与帮助!

参考文献:

[1] Eupho 2019 experimental problems text for student [EB/OL]. (2019-06-02)[2023-02-16].

https://www.ioc.ee/~kalda/iphO/3EuPhO/EuPhO_2019_exp_problems.pdf

[2] ROU-S2 answer A [EB/OL]. (2019-06-08)[2023-02-16]. <https://www.ioc.ee/~kalda/iphO/3EuPhO/ROU2E.pdf>

[3] HRV-S5 answer A [EB/OL]. (2019-06-08)[2023-02-16]. <https://www.ioc.ee/~kalda/iphO/3EuPhO/HRV5E1.pdf>

[4] ROU-S5 answer B [EB/OL]. (2019-06-08)[2023-02-16]. <https://www.ioc.ee/~kalda/iphO/3EuPhO/ROU5E2.pdf>

[5] RUS-S3 answer A [EB/OL]. (2019-06-08)[2023-02-16]. <https://www.ioc.ee/~kalda/iphO/3EuPhO/RUS3E.pdf>

[6] EuPhO3 results [EB/OL]. (2019-06-04)[2023-02-16]. <https://www.ioc.ee/~kalda/iphO/3EuPhO/EuPhO-3-results.pdf>

[7] Graphics output [EB/OL]. (2019-06-04)[2023-02-16]. https://www.ioc.ee/~kalda/iphO/3EuPhO/histplot_grid.pdf

[8] 赵凯华,罗蔚茵. 新概念物理教程·电磁学[M]. 2版. 北京:高等教育出版社,2006.

[9] Segelstein D J. The complex refractive index of water [D]. Kansas: University of Missouri, 1981.

[10] Lunkenheimer P, Emmert S, Gulich R, et al. Electromagnetic-radiation absorption by water [J]. Physical Review E, 2017,96(6):062607.

Introduction and solutions to the experimental question of the 3rd European Physics Olympiad experimental exam

LIU Zirui^{1,2}, WANG Jin^{3a,3b}, SONG Feng^{3a}

(1. Institute for Interdisciplinary Information Sciences, Tsinghua University, Beijing 100084, China;
2. The High School Affiliated to Renmin University of China, Beijing 100080, China;
3a. School of Physics; 3b. National Demonstration Center for Experimental Physics Education, Nankai University, Tianjin 300071, China)

Abstract: The experimental question of the 3rd European Physics Olympiad experimental exam was the propagation of radio waves. Using a pair of radio waves emitter and receiver, some meaningful phenomenon related to interference of equal thickness, the attenuation of wave in medium, the decaying modes in a waveguide, the refractive index of medium and evanescent wave was studied. This paper introduced the experimental question content and detailed solution. The experimental question was designed and could be used as a comprehensive experiment of electromagnetic wave.

Key words: European Physics Olympiad experimental exam; radio wave; waveguide; refractive index

[责任编辑:郭伟]