

高 等 学 校 教 材

# 简明 微波

梁昌洪  
谢拥军 官伯然



高等教育出版社



高等学校教材

# 简 明 微 波

梁昌洪

谢拥军 官伯然

高等教育出版社

## 内容简介

本书是西安电子科技大学国家精品课程“微波技术基础”的选用教材。本书简明扼要而又系统全面地介绍了微波技术的基础知识。内容包括微波传输线理论及分析方法、各种类型的导波结构、微波网络与微波元件的基础知识、微波谐振腔以及微波问题分析中涉及到的常用的解析方法和数值方法。

本书可作为高等学校工科电子信息、通信类专业本科生和研究生的教材,也可供无线电技术人员参考使用。

## 图书在版编目(CIP)数据

简明微波/梁昌洪,谢拥军,官伯然. —北京:高等教育出版社,2006.7

ISBN 7-04-019642-5

I. 简... II. ①梁...②谢...③官... III. 微波技术-高等学校-教材 IV. TN015

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 060244 号

|      |     |      |     |      |     |      |     |
|------|-----|------|-----|------|-----|------|-----|
| 策划编辑 | 吴陈滨 | 责任编辑 | 许海平 | 封面设计 | 张申申 | 责任绘图 | 朱 静 |
| 版式设计 | 陆瑞红 | 责任校对 | 金 辉 | 责任印制 | 朱学忠 |      |     |

出版发行 高等教育出版社  
社 址 北京市西城区德外大街 4 号  
邮政编码 100011  
总 机 010-58581000

经 销 蓝色畅想图书发行有限公司  
印 刷 北京新丰印刷厂

开 本 787×1092 1/16  
印 张 42  
字 数 1 030 000

购书热线 010-58581118  
免费咨询 800-810-0598  
网 址 <http://www.hep.edu.cn>  
<http://www.hep.com.cn>  
网上订购 <http://www.landraco.com>  
<http://www.landraco.com.cn>  
畅想教育 <http://www.widedu.com>

版 次 2006 年 7 月第 1 版  
印 次 2006 年 7 月第 1 次印刷  
定 价 52.00 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究  
物料号 19642-00

# 前言

本书是西安电子科技大学国家精品课程“微波技术基础”的选用教材,《简明微波》讲义在西安电子科技大学原电磁场与微波技术专业、电子信息工程专业等本科教学中使用多年。

本教材由梁昌洪教授领衔,谢拥军教授、官伯然教授参与编写,并由西安交通大学傅君眉教授担任主审。

电磁场微波技术学科的起源可以追溯至19世纪,特别是20世纪30、40年代后得到了飞跃性的发展。近些年来,随着信息科学技术突飞猛进的发展,特别是无线通信、新型雷达、电子对抗、空间探测等领域的巨大需求,微波技术课程在电子信息等学科的教学内容中的地位越来越重要。但是,微波技术这一课程由于对工程数学和电磁理论基础要求较高,涉及到的数学公式较多也较为晦涩,具体工程问题的分析与传统教材中讲授的基础知识结合不够紧密等特点,再加上课时有限,一直成为学生学习的难点。本书力图系统全面、简明扼要地介绍微波技术的基础知识、工程应用及其工程问题的基本分析方法。

从国内来看,微波技术课程在西安电子科技大学发展较早。20世纪60年代初在毕德显教授的有力指导和系统策划下,出现了蒋同泽编写的《长线》和吕海寰编写的《超高频技术》两本书,这是全国最早的同类教材,对多所高等学校微波技术课程的教学均有大的影响,只是由于当时西安电子科技大学是军校的原因,没有正式出版。文革结束后,廖承恩编写的《微波计算基础》是国内多所高等学校引用和执教的教材。1985年梁昌洪编写的《计算微波》获全国优秀教材奖。同时由于工程实践的需求也希望把微波集成电路的进展、网络的统一、计算机的应用以及CAD等先进手段融入教学。20世纪90年代后期根据上述思想,编写了《简明微波》讲义作为教学改革和课程发展的一次有益尝试。2003年,本课程成为首届国家级精品课程。

本课程的前修课程为“场论与数理方程”、“复变函数”、“线性代数”、“电路、信号与系统”和“电磁场理论”等。本教材的每一章节基本按照90分钟课时设计,方便教师使用和学生做好预习。在编写上,着重突出了现代性和简明性。在内容、方法的讲述和实施等环节都力争跟上时代的潮流。在内容选择上紧密结合通信等学科的发展,引入微波集成电路、光纤、开腔等实践需求的领域和内容。在方法上复频率法、统一传输线理论、特性阻抗的微扰理论等,都是编写者在教学、科研结合上的创新体会。特别是在简明扼要、通俗易懂上狠下工夫,使内容尽量集中于发展主线、脉络清晰,力求做到:(1)统一性:传输线和波导的统一;圆波导和矩形波导的统一;网络理论对于微波技术基础的主线统一;(2)主题性:大胆实施分讲制,每一讲都有一个主题,有一个“戏

## II 前 言

---

核”,每5~6讲为一个单元,每个单元都是一个系统,整个教材有一条主线,即把网络方法和场论方法有机结合起来,这样在教学中便于小结归纳和提纲挈领;(3)少而精:在教材和课程设置中强调少而精,“少则深,多则惑”,把主要内容和方法反映出来,其余的让学生去发掘、创造。

本教材分为两篇5章。第一章为微波传输线理论,在建立微波传输线分布参数模型的基础上,利用微分方程方法和矩阵解方法介绍传输线的工作状态、传输特性等,重点在于行波、驻波和行驻波这三种微波传输线的工作状态的特点,反射系数、驻波比和输入阻抗这三种工作参数的定义及相互关系,并突出阻抗匹配的工程概念。第二章在广义传输线理论的基础上,以简正波理论为线索系统介绍了金属空心波导、TEM波传输线、介质传输线等多种导波结构的工作原理和 design 方法。第三章是关于微波元件和微波网络的分析,对常用的微波元件按照其对应微波网络的端口数目分类,利用微波网络的 $A$ 参数和 $S$ 参数对其进行分析和研究,使得原本对于学生来说头绪繁多、不易理解的各种微波元件纲举目张、条理清晰、便于理解,也使学生看到表达抽象的数学工具在分析具体物理问题时的巨大作用。第四章介绍了微波谐振腔,包括传输线谐振腔和非传输线谐振腔,并介绍了耦合和微扰对于谐振腔的影响。第五章是在前4章微波基础知识介绍的基础上,提炼和总结了微波问题分析中涉及到的多种解析方法和数值计算方法。这一章内容适合于在开设课时较多的电子信息工程专业微波方向的教学中选讲,也可供电子信息、通信类专业和其他专业方向的研究生和工程技术人员选读。

本课程的网址是:<http://see.xidian.edu.cn/microwave>,欢迎读者上网浏览本课程的发展动态。感谢曹祥玉、王林年等年轻学者协助编写“几何绕射理论”和“FDTD方法”章节。

非常感谢高等教育出版社提供这样一个与广大读者交流学习的机会。由于作者水平有限,书中难免存在一些缺点和错误,殷切希望广大读者批评指正。

作 者

2006年1月

# 目 录

|                                |   |
|--------------------------------|---|
| 绪 微波概念 Microwave Concept ..... | 1 |
|--------------------------------|---|

## 第一篇 简明微波技术

|                                                                                 |     |
|---------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 第一章 传输线理论 Transmission Line Theory .....                                        | 11  |
| 1-1 传输线方程 Transmission Line Equation .....                                      | 11  |
| 1-2 传输状态分析( I ) Transmission Analysis( I ) .....                                | 20  |
| 1-3 传输状态分析( II ) Transmission Analysis( II ) .....                              | 28  |
| 1-4 传输矩阵解 Transmission Matrix Solution .....                                    | 36  |
| 1-5 例题讲解 Problems .....                                                         | 48  |
| 1-6 Smith 圆图 Smith Chart .....                                                  | 54  |
| 1-7 阻抗匹配 Impedance Matching .....                                               | 61  |
| 1-8 传输线计算机解 Computation Solutions for Transmission Line .....                   | 70  |
| 1-9 例题讲解 Problems .....                                                         | 76  |
| 第二章 导波系统 Guide Wave Systems .....                                               | 85  |
| 2-1 广义传输线理论 Generalized Transmission Line Theory .....                          | 87  |
| 2-2 矩形波导 $TE_{10}$ 模( I ) $TE_{10}$ Mode in Rectangular Waveguide ( I ) .....   | 94  |
| 2-3 矩形波导 $TE_{10}$ 模( II ) $TE_{10}$ Mode in Rectangular Waveguide ( II ) ..... | 103 |
| 2-4 矩形波导中的本征模 Eigen Modes in Rectangular Waveguide .....                        | 112 |
| 2-5 例题讲解 Problems .....                                                         | 119 |
| 2-6 圆波导 Circular Waveguide .....                                                | 128 |
| 2-7 同轴线和平板波导 Coaxial Transmission Line and Parallel-Plate Waveguide .....       | 145 |
| 2-8 带线 Stripline .....                                                          | 154 |
| 2-9 微带 Microstrip .....                                                         | 169 |
| 2-10 介质波导 Dielectric Waveguide .....                                            | 174 |
| 2-11 光纤 Optical Fiber .....                                                     | 183 |
| 2-12 耦合传输线 Coupled Transmission-Line .....                                      | 189 |
| 2-13 复习 Review .....                                                            | 204 |

### 第三章 微波元件与网络分析 Microwave Elements and

|                          |     |
|--------------------------|-----|
| Microwave Networks ..... | 213 |
|--------------------------|-----|

|                                    |     |
|------------------------------------|-----|
| 3-1 S 参数 S-parameter .....         | 214 |
| 3-2 单端口元件 One-Port Element .....   | 218 |
| 3-3 双端口元件 Two-Port Element .....   | 223 |
| 3-4 多端口元件 Multi-Port Element ..... | 232 |
| 3-5 不均匀性 Discontinuity .....       | 240 |

### 第四章 微波谐振腔理论 Microwave Resonators Theory .....

|                                         |     |
|-----------------------------------------|-----|
| 4-1 微波谐振腔 Microwave Resonator .....     | 248 |
| 4-2 矩形谐振腔 Rectangular Resonator .....   | 252 |
| 4-3 圆柱谐振腔 Cylindrical Resonator .....   | 256 |
| 4-4 传输线腔 Transmission Line Cavity ..... | 263 |
| 4-5 耦合腔 Coupled Cavity .....            | 272 |
| 4-6 介质谐振器 Dielectric resonator .....    | 278 |
| 4-7 开式谐振腔 Open Resonator .....          | 292 |
| 4-8 腔微扰 Perturbation of Cavity .....    | 302 |

## 第二篇 微波分析方法

### 第五章 微波分析方法 Method of Microwave Analysis .....

|                                                                                                            |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 5-1 特性阻抗微扰法 Perturbational Method of Characteristic Impedance .....                                        | 313 |
| 5-2 广义微扰法 Generalized Perturbational Method .....                                                          | 319 |
| 5-3 广义保角变换法 Generalized Conformal Mapping Method .....                                                     | 326 |
| 5-4 广义网络法 Generalized Network Method .....                                                                 | 333 |
| 5-5 微波传输线复相角理论 Complex Phase-angle Theory of Microwave<br>Transmission Line .....                          | 363 |
| 5-6 损耗计算法 Loss Computation Method .....                                                                    | 368 |
| 5-7 模型网络法 Method of Prototype Network .....                                                                | 375 |
| 5-8 信号流图法 Method of Signal Flow Chart .....                                                                | 389 |
| 5-9 本征函数法 Method of Eigenfunction .....                                                                    | 406 |
| 5-10 模式匹配法 Method of Mode Matching .....                                                                   | 432 |
| 5-11 共形同轴线变分理论 Variational Theory of Conformal Coaxial Line .....                                          | 447 |
| 5-12 任意截面同轴线电容 $C$ 的变分理论 Variational Theory of Capacitance $C$ Of<br>Arbitrarily Shaped Coaxial Line ..... | 458 |
| 5-13 导体薄片的电容闭式 Closed-Form Formulae For Capacitance Of<br>Conductor Sheet .....                            | 477 |
| 5-14 Green 函数法 Method of Green's Function .....                                                            | 485 |

---

|            |                                                          |     |
|------------|----------------------------------------------------------|-----|
| 5 - 15     | 介质 Green 函数法 Method of Dielectric Green's Function ..... | 503 |
| 5 - 16     | 差分法 Method of Difference .....                           | 513 |
| 5 - 17     | 矩量法 Method Of Moment .....                               | 534 |
| 5 - 18     | 有限元法 Finite-element Method .....                         | 561 |
| 5 - 19     | 时域有限差分法 Finite Difference Time Domain Method .....       | 587 |
| 5 - 20     | 几何绕射理论 Geometrical Theory of Diffraction .....           | 626 |
| 参考文献 ..... |                                                          | 661 |

# 绪

# 微波概念

## Microwave Concept

对电磁场与微波专业,“简明微波”是一门最重要的基础课程。

究竟什么是微波?这是我们关心的首要问题。

如果把电磁波按频率(或波长)来划分,则可以大致把 300 MHz~3 000 GHz(对应空气中波长  $\lambda$  是 1 m~0.1 mm)这一频段的电磁波称为微波,如图 0-1-1 所示。纵观“左邻右舍”,它处于超短波和红外光波之间。



图 0-1-1 电磁波频谱图

注意:对于任何波,波长和频率与波速相关

$$v = \lambda f \quad (0-1-1)$$

因此,只用一个波长  $\lambda$  还不能确定是何种波。例如,声波在有些情况下也有与微波相近的波长,这样就可构成声波与微波的相互作用。把微波波段单独列出来,必然有它的特殊原因,也必然构成它独特的研究方法。这正是本部分要解决的主要问题。

## 一、Maxwell 方程组的物理意义

从理论上讲,一切电磁波(包括光波)在宏观媒质中都服从 Maxwell(麦克斯韦)方程组。因此,深入研究和考察 Maxwell 方程组,将有助于了解电磁波动的深刻含义。

人类首次进行的 Herz(赫兹)电磁波试验,以现在的眼光来看,只是一个极近距离间的电火花收、发实验,完全不足为奇。然而,当时却轰动了学术界。人们不得不坐下来认真思索:电磁波没有“脚”是怎么走过去的。用学术性的语言则可以说是如何实现超距作用的。于是,历史选择了 Maxwell,一批年轻的学者总结出电磁运动规律,即 Maxwell 方程组。同时,提出了 Newton(牛顿)力学所没有涉及的崭新概念——场。Maxwell 方程组中独立方程主要表现为前面两个,即

$$\begin{cases} \nabla \times \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{J} & (0-1-2) \\ \nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} & (0-1-3) \end{cases}$$

这里,首先来探讨一下上述方程所含的哲学思想。

① 这两个方程左边的物理量为磁(或电),而右边的物理量则为电(或磁)。这中间的等号深刻揭示了电与磁相互转化、相互依赖、相互对立、共存于统一的电磁波中。正是由于电不断转换为磁,而磁又不断转换为电,才会发生能量的交换和储存。如图 0-1-2 所示。

在人类对于电磁相互转换的认识上,Faraday(法拉第)起到了关键的作用。Oersted(奥斯特)首先发现电可转换为磁(即线圈等效为磁铁),而 Faraday 坚信磁也可以转换为电,但是无数次实验均以失败告终。在 10 年的无效工作后,沮丧的 Faraday 鬼使神差地把磁铁一拔,奇迹出现了,连接线圈的电流计指针出现了晃动。

这一实验不仅证实了电磁转换,而且知道了只有动磁才能转换为电。

还需要提到:电磁转换为电磁波的出现提供了可能,但不一定就产生电磁波。例如,电磁振荡也是典型的电磁转换,但没有引起电磁波,如图 0-1-3 所示。

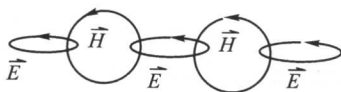


图 0-1-2 电磁能量的相互转换

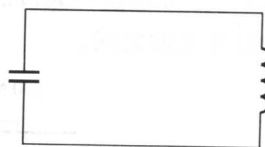


图 0-1-3 电磁振荡

作为力学类比,电磁转换犹如单摆问题中的动能与势能的转换,如图 0-1-4 所示。

② 进一步研究 Maxwell 方程两边的运算,从物理上看,运算反映一种作用。方程的左边是空间的运算——旋度;方程的右边是时间的运算——导数,中间用等号连接。它深刻揭示了电(或磁)场中任一空间的变化会转化成磁(或电)场时间的变化;反过来,电(或磁)场的时间变化也会转化成磁(或电)场的空间变化。正是这种空间和时间的相互变化构成了波动的外在形式,如图 0-1-5 所示。用通俗的话来说,即某一空间出现过的事物,过了一段时间又在另一空间出现了。

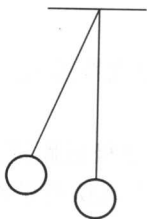


图 0-1-4 单摆

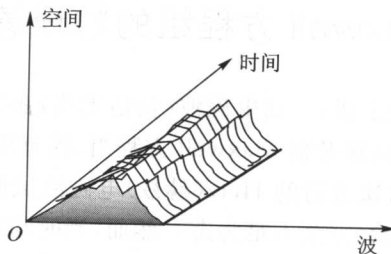


图 0-1-5 波在空间和时间上的变化

③ Maxwell 方程还指出:电磁转换有一个重要条件,即角频率  $\omega$ 。已知单色波频域的 Maxwell 方程为

$$\begin{cases} \nabla \times \vec{H} = j\omega\epsilon \vec{E} + \vec{J} & (0-1-4) \\ \nabla \times \vec{E} = -j\omega\mu \vec{H} & (0-1-5) \end{cases}$$

任何形式信号的高频分量包含角频率 $\omega$ ,才能确保电磁的有效转换,直流情况没有电磁的转换。可以这样说,在高频时因为分布参数的存在,所以电路有可能变成开放电路。不过很有意思的是频率愈高,越难输出功率。这也是一个有趣的矛盾。

④ 在 Maxwell 方程中还存在另一对矛盾,即方程(0-1-2)右边有两项,而方程(0-1-3)右边有一项,这就构成了 Maxwell 方程本质的不对称性。尽管为了找其对称性而一直在探索单磁极和磁流 $\vec{M}$ 的存在,但到目前为止始终未果。

$\partial \vec{D} / \partial t$  和  $\vec{J}$  构成一对矛盾,在频域中

$$\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{J} = (j\omega\epsilon + \sigma) \vec{E} \quad (0-1-6)$$

所以,也可以说是 $\sigma$ 和 $\omega\epsilon$ 之间的矛盾,这一对矛盾主要反映媒质情况。当 $\sigma \ll \omega\epsilon$ 时媒质称为良导体,这种情况下波动性降为次要矛盾,其情况是波长缩短、波速减慢且波迅速衰减。波一进入导体会“短命夭折”,如图0-1-6所示。这一问题将在波导理论中做详尽讨论。波动性不仅与 $\omega$ 有关,还与媒质有关。

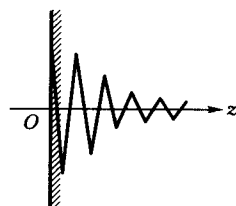


图 0-1-6 波在导体中的衰减

## 二、波动的客观性和主观性

现象是客观存在的,客观存在的现象一定能表现出来吗?未必。它的表现与观察者及环境有关。地球是一个圆球(严格地说是似椭圆球),但直至哥伦布发现新大陆后人们才认清这一点。因为人与地球相比太微小了。现在,宇航员通过航天飞机清晰地看到了地球。同样,波动性客观存在,但是,观察波动性却与主观和仪器有关、与尺寸有关、与时间有关。

[例 1] 50 Hz 市电,要用 1:1 示波器观看其相位 $90^\circ$ 变化的 $1/4$ 波长,则示波器幅面要从西安到北京(约 1 500 km)。因为 1 个波长为

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{50 \text{ Hz}} = 6 \times 10^6 \text{ m} = 6\,000 \text{ km}$$

绕地球一圈只有 3 个波长。不同波段的电磁波长的差距是巨大的,如图 0-1-7 和图 0-1-8 所示。

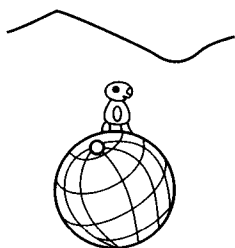


图 0-1-7 波长长的情况

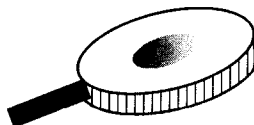


图 0-1-8 波长短的情况

[例 2] 光波的存在形式是 Newton 和 Huygens(惠更斯)的著名争论。Newton 一方强调光的粒子的直线性,事实上,日常生活中,光确实表现为粒子的直线性。但是,随着显微镜的发展,要观察极小物体时,即所观察的物体大小与波长可比拟时,则由于波动性的存在而无法观察成功,这是因为光学显微镜的基础是光以直线传播,于是人类发明了电子显微镜。

讨论到这里,对于微波波段有了进一步认识。任何电磁波的波动性是客观存在。但是,微波波段在人体尺寸的范围表现出强烈的波动性。 $1.5 \sim 2.0 \text{ m}$  是人体的特征尺寸; $0.1 \text{ mm}$ ,约一根半头发的粗细,是人体特征尺寸的下限。所以,在微波波段要用 Maxwell 方程——波动力学加以解决。

### 三、场的方法向路的方法转化

上面已经提及,微波问题必须用 Maxwell 方程加以解决。但是,作为偏微分方程组的 Maxwell 方程又很难求解。因此,在微波中又探讨第二种研究方法,即路的方法。

微波可以用路的方法研究有它的客观原因。因为不论是低频还是微波,在工程应用中都十分关心能量的传输情况。既然有着共同的方法本质,就有可能做进一步的研究。

[例 3] 研究无限大无源( $J=0$ )空间的均匀平面波传播问题。设  $\vec{E}$  只有  $x$  分量, $\vec{H}$  只有  $y$  分量并不失一般性。波只有可能在  $\pm z$  方向,且均匀平面波的  $\vec{E}$ 、 $\vec{H}$  不随  $x, y$  变化,如图 0-1-9 所示。写出 Maxwell 方程组

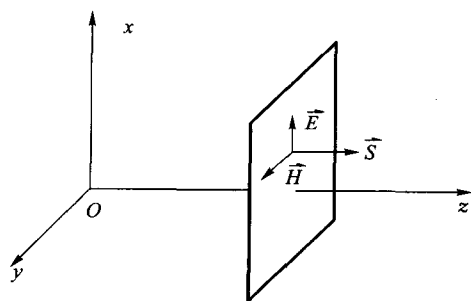


图 0-1-9 均匀平面波传播

$$\begin{array}{ccc}
 \left\{ \begin{array}{l} \nabla \times \vec{H} = \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \\ \nabla \times \vec{E} = -\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \end{array} \right. & \longrightarrow & \left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial H_y}{\partial z} = -\epsilon \frac{\partial E_x}{\partial t} \\ \frac{\partial E_x}{\partial z} = -\mu \frac{\partial H_y}{\partial t} \end{array} \right. \\
 \text{均匀无源媒质} & & \text{均匀平面波}
 \end{array} \quad (0-1-7)$$

上面这两个方程也称为均匀平面波的传播方程。再次求导

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial^2 H_y}{\partial z^2} = \epsilon \mu \frac{\partial^2 H_y}{\partial t^2} \\ \frac{\partial^2 E_x}{\partial z^2} = \epsilon \mu \frac{\partial^2 E_x}{\partial t^2} \end{array} \right. \longrightarrow \left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial^2 H_y}{\partial z^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 H_y}{\partial t^2} \\ \frac{\partial^2 E_x}{\partial z^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 E_x}{\partial t^2} \end{array} \right. \quad (0-1-8)$$

其中,  $c = 1/\sqrt{\epsilon\mu}$ ,正好是光速,这也是光的电磁学说的重要依据。

采用时谐形式,即设  $e^{j\omega t}$  为时谐因子,可得

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d^2 E_x}{dz^2} + k^2 E_x = 0 \\ \frac{d^2 H_y}{dz^2} + k^2 H_y = 0 \end{array} \right. \quad (0-1-9)$$

$$E_x = A_1 e^{-jkz} + A_2 e^{jkz} \quad (0-1-10)$$

思考问题:在上式中哪一项表示向  $z$  方向的入射波? 哪一项表示向  $-z$  方向的反射波? 联系上  $e^{j\omega t}$  因子, 电场的完整表达式为

$$E_x = A_1 e^{j(\omega t - kz)} + A_2 e^{j(\omega t + kz)} \quad (0-1-11)$$

$$E_x(z, t) = \operatorname{Re} E_x = A_1 \cos(\omega t - kz) + A_2 \cos(\omega t + kz)$$

对于第一项的相位因子, 考虑等相位面

$$\omega t - kz = \text{constant (常数)} \quad (0-1-12)$$

对上式全微分

$$\omega dt - k dz = 0 \quad (0-1-13)$$

或者

$$v_1 = \frac{dz}{dt} = \frac{\omega}{k} = c \quad (0-1-14)$$

因此第一项表示向  $z$  方向的入射波, 而第二项等相面表示向  $-z$  方向的反射波。

$$\omega t - kz = \text{constant}$$

$$\omega dt + k dz = 0$$

$$v_2 = \frac{dz}{dt} = -\frac{\omega}{k} = -c$$

[讨论] 上面求解过程说明:

① 波传输方程通解由入射波和反射波构成。

② 波传输速度是光速。

③ 波传输的每一种具体情况表现在入射波与反射波比例不同, 而比例的大小由边界媒质情况而定, 即所谓边界条件。

[例 4] 两种半无限大媒质的反射情况, 如图 0-1-10 所示。

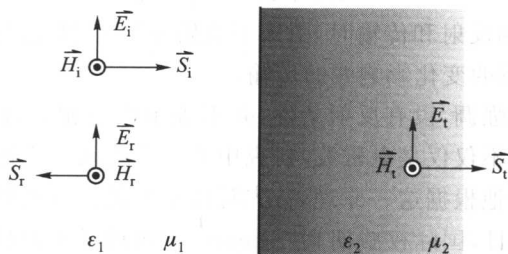


图 0-1-10 无限大分界面上的电磁波

采用  $e^{j\omega t}$  时谐因子

$$\begin{cases} E_i = E_{i0} e^{-jk_1 z} \\ H_i = H_{i0} e^{-jk_1 z} \end{cases} \quad \begin{cases} E_r = E_{r0} e^{+jk_1 z} \\ H_r = -H_{r0} e^{+jk_1 z} \end{cases} \quad \begin{cases} E_t = E_{t0} e^{-jk_2 z} \\ H_t = H_{t0} e^{-jk_2 z} \end{cases}$$

利用  $z=0$  的边界条件, 电场切向分量和磁场切向分量必须连续, 有

$$\begin{cases} E_{i0} + E_{r0} = E_{t0} \\ H_{i0} - H_{r0} = H_{t0} \end{cases} \quad (0-1-15)$$

也即

$$\frac{E_{i0} + E_{r0}}{H_{i0} - H_{r0}} = \frac{E_{t0}}{H_{t0}} \quad (0-1-16)$$

已经知道电场通解的表达形式

$$E = A_1 e^{-jk_1 z} + A_2 e^{jk_1 z} \quad (0-1-17)$$

代入下式

$$\frac{\partial \vec{E}}{\partial z} = -\mu_1 \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} = -j\omega\mu_1 \vec{H} \quad (0-1-18)$$

得到

$$\vec{H} = \frac{k_1}{\omega\mu_1} (A_1 e^{-jk_1 z} - A_2 e^{jk_1 z}) \quad (0-1-19)$$

令  $\frac{1}{\eta_1} = \frac{k_1}{\omega\mu_1} = \sqrt{\frac{\epsilon_1}{\mu_1}}$ , 或  $\eta_1 = \sqrt{\frac{\mu_1}{\epsilon_1}}$ , 称为波阻抗, 即

$$\begin{cases} \frac{E_{i0}}{H_{i0}} = \frac{E_{r0}}{H_{r0}} = \eta_1 = \sqrt{\frac{\mu_1}{\epsilon_1}} \\ \frac{E_{t0}}{H_{t0}} = \eta_2 = \sqrt{\frac{\mu_2}{\epsilon_2}} \end{cases} \quad (0-1-20)$$

注意: 在波中出现了阻抗概念, 它与  $R, L, C$  的低频阻抗有所不同。

$$\begin{aligned} E_{r0} &= \frac{\eta_2 - \eta_1}{\eta_2 + \eta_1} E_{i0} \\ H_{r0} &= \frac{\eta_2 - \eta_1}{\eta_2 + \eta_1} H_{i0} \end{aligned} \quad (0-1-21)$$

令  $\Gamma$  为反射系数

$$\Gamma = \frac{E_{r0}}{E_{i0}} = \frac{H_{r0}}{H_{i0}} = \frac{\eta_2 - \eta_1}{\eta_2 + \eta_1} \quad (0-1-22)$$

[讨论] 研究电磁波的反射和传输时, 引入了反射系数  $\Gamma$  和波阻抗  $\eta$ , 波阻抗  $\eta$  与媒质特性 ( $\mu, \epsilon$ ) 相关。换句话说, 媒质的变化影响波的传输。

注意: 在这里应该特别强调, 没有反射条件, 并不表示媒质相同, 而只表示  $\eta_1 = \eta_2$ , 即两者波阻抗相等。这一思想是波(不仅仅是电磁波)研究中的一个飞跃。吃透这一思想的竟是一个著名的科幻小说家——凡尔纳, 他根据这一原理, 首先写出了脍炙人口的科幻小说《隐身人》。值得指出的是, 在 2006 年 5 月 26 日, 国际权威期刊《Science》上报导了美国杜克大学和英国伦敦帝国学院的科学家最近所完成的视觉隐身技术原理性研究。科学家预言, 只要制造出性能合适的材料, 实用的“隐身衣”完全可能在近期问世。因此, 波阻抗是波研究中的重要特征量。

## 四、微波特点

### 1. 微波的两重性

微波的两重性指的是对于尺寸大的物体, 如建筑物、火箭、导弹, 显示出粒子的特点——即似光性或直线性; 而对于相对尺寸小的物体, 又显示出波动性。

### 2. 微波与“左邻右舍”的比较

微波的“左邻”是超短波和短波, 而它的“右舍”则是红外波、光波。

## 微波与超短波、短波比较

微波大大扩展了通信通道,开辟了微波通信和卫星通信。

## 微波与光波比较

光通过雨雾衰减很大,特别是雾天,蓝光、紫光几乎看不见,这正是采用红光作警戒的原因。而微波波段穿透力强。

## 3. “宇宙窗口”

在地球的外层空间,由于日光等复杂的原因形成独特的电离层,它对于短波几乎全部反射,这就是短波的天波通信方式。而在微波波段,则有若干个可以通过电离层的“宇宙窗口”,如图 0-1-11 所示,因而微波是独特的宇宙通信手段。

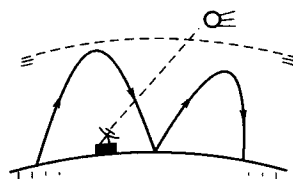


图 0-1-11 微波传播的“宇宙窗口”

## 五、不断拓展的应用领域

① 不少物质的能级跃迁频率恰好落在微波波段,因此,近年来微波生物医疗和微波催化等已是前沿课题。

② 计算机的运算次数进入十亿次,其频率也是微波频率。超高速集成电路中的互耦问题也可以归结为微波互耦问题进行研究。因此,微波的研究已进入集成电路和计算机领域。

③ 微波研究方法主要有两种:场论的研究方法和网络的研究方法。这也是本门课程要学习的重要方法。其中,场论方法的基础是本征模理论;网络方法的基础是广义传输线理论。

