

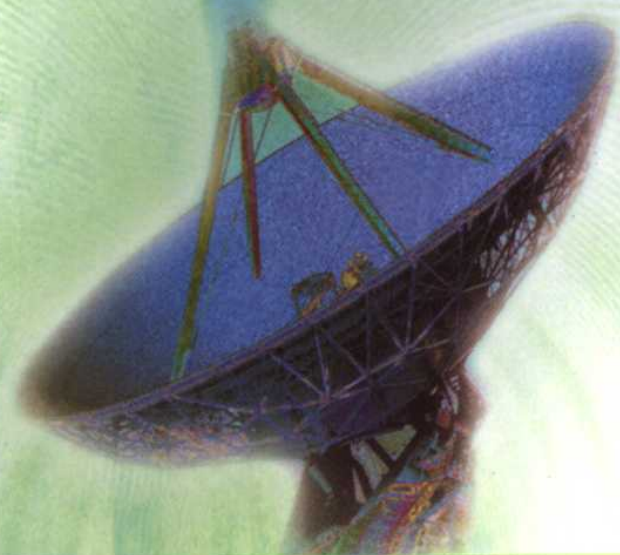


普通高等教育“十一五”国家级规划教材

jishu yu weibo dianlu

微波技术与微波电路

李绪益 编著



华南理工大学出版社



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

微波技术与微波电路

李绪益 编著

ISBN 978-7-2923-2297-0

ISBN 978-7-2923-2297-0

华南理工大学出版社

·广州·

内容简介

本书以场、路结合的方法系统地论述微波技术、微波电路、天线与电波传播的基本理论、基本技术和基本分析方法。内容包括微波的特点与应用,微波的产生、变换、放大、控制、传输、测量、辐射与接收、传播等。内容丰富、全面、翔实,表述去繁就简、深入浅出,对非电磁场专业学生学习微波技术与天线、微波电路等知识是一本好教材。

本书可作为高等院校电子类专业、电子信息工程、通信工程等专业、成人高等教育相关专业的教材或参考书,也可供从事射频工程、微波工程相关的科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

微波技术与微波电路/李绪益编著. —广州:华南理工大学出版社,2007.3
ISBN 978-7-5623-2597-0

I. 微… II. 李… III. ①微波技术-高等学校-教材②微波电路-高等学校-教材 IV. TN015 TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 029941 号

总发行:华南理工大学出版社(广州五山华南理工大学17号楼,邮编510640)

营销部电话:020-87113487 87110964 87111048(传真)

E-mail:scutc13@scut.edu.cn <http://www.scutpress.com.cn>

责任编辑:张颖

印刷者:广东省阳江市教育印务公司

开本:787mm×1092mm 1/16 印张:27.25 插页:1 字数:700千

版次:2007年3月第1版 2007年3月第1次印刷

定价:39.00元

版权所有 盗版必究

前 言

自 20 世纪八九十年代以来,科学技术的迅猛发展已大大超出人们的预料,微波技术的新成就举世瞩目。像微波炉、家庭电话、手提式电话等已经成为现代社会生活中不可缺少的一部分;还有与国家经济建设和国家安全密切相关的微波通信、卫星通信、军事上的雷达定位、精确制导以及微波新概念武器的热门话题和应用前景,无不体现微波技术新的生命力及其广阔的发展空间,这也意味着对微波技术工作者提出了新的更高要求和新的挑战。基于这种认识,作者强烈意识到有必要对原编写的《电磁场与微波技术》下册(第二版)重新进行审视。尽管原教材已经沿用多年,多次重印,发行数万册,为全国数十所兄弟院校所采用,但作者仍认为原教材与当今社会的要求存在不少的差距,很有必要对其内容进行充实与提高。

微波技术的应用空间非常广阔,但目前最大量和最活跃的应用领域当属于无线移动通信、卫星通信、导弹的精确制导、航空及航天等领域。这些领域大部分要求设备小型化、密集化、高性能、轻重量和价廉。因此平面电路、微波集成电路成为优先选用的电路型式。今后,将有越来越多的毕业生投身于这些领域的技术开发与科学研究工作。因此,本书把传统的、以立体电路(金属波导)为主调整为立体电路与平面电路两者兼顾,适当突出平面电路。具体体现在:

1. 除了用一章详细介绍平面传输线外,在微波元件的有关章节中适当突出平面微波元件。

2. 在微波电路中广泛应用的定向耦合器、阻抗匹配技术及滤波器等单独成章,以加强这方面的内容,并使其系统性更好。

3. 增加微波放大器、微波固态振荡器与混频器及微波电子控制电路三章的内容。这部分内容对通信和电子等专业的学生是很有现实意义的。尽管由于各院校情况不同,有的对微波电路单独设课,有的将其合并为一门课程,名称上或为“微波技术与微波电路”,或称“射频技术与天线”,名称不一,这里由于增加上述内容,所以将书名改为《微波技术与微波电路》,也许较为名副其实。

本书编写过程中大量参考了国内外的优秀教材,在取材上吸取了他们与时俱进、反映最新科技成果的优点,也结合我校这门课程长期教学实践的经验,希望能为广大读者提供一本内容较为丰富又较为通俗易懂的教材。

由于编者学识有限,错漏之外在所难免,殷切欢迎读者批评指正。

作 者

2005 年 12 月

目 录

0 绪论	(1)	2.2 矩形波导	(41)
0.1 什么是微波	(1)	2.2.1 分离变量法	(41)
0.2 微波技术学科的特点	(1)	2.2.2 矩形波导的传输特性	(43)
0.3 微波发展简史及大事记	(2)	2.3 矩形波导的 TE_{10} 波	(46)
0.4 微波技术的主要应用	(3)	2.3.1 场结构	(46)
0.5 本书的内容及研究方法	(10)	2.3.2 壁面电流	(48)
思考题与习题	(10)	2.3.3 传输功率与功率容量	(49)
1 传输线理论	(11)	2.3.4 波导的损耗与衰减	(50)
1.1 引言	(11)	2.3.5 矩形波导尺寸的选择	(52)
1.2 传输线方程及其解	(12)	2.4 圆波导	(52)
1.2.1 双导体传输线	(12)	2.4.1 场方程	(53)
1.2.2 电报方程的解	(13)	2.4.2 圆波导的传输特性	(56)
1.3 无损耗线上的行波与驻波		2.4.3 圆波导的三个主要模式	(57)
驻波比与反射系数	(15)	2.5 同轴线	(58)
1.3.1 行波	(15)	2.5.1 TEM 波	(59)
1.3.2 驻波	(16)	2.5.2 传输功率和损耗	(60)
1.3.3 驻波比与反射系数	(17)	2.5.3 TM 波和 TE 波	(60)
1.3.4 无损耗线上任一点的输入 阻抗	(18)	2.5.4 同轴线尺寸的选择	(62)
1.4 不同负载时传输线的工作状态	(18)	2.6 脊形波导与介质波导	(62)
1.4.1 匹配工作状态	(19)	2.6.1 脊形波导	(62)
1.4.2 短路线	(19)	2.6.2 介质波导	(63)
1.4.3 开路线	(20)	2.7 波的激励与耦合	(64)
1.4.4 纯阻性负载传输线	(21)	2.7.1 电激励	(64)
1.4.5 阻抗负载传输线	(22)	2.7.2 磁激励	(65)
1.5 圆图及其应用	(23)	2.7.3 孔、缝激励	(65)
1.5.1 圆图的构成	(24)	思考题与习题	(66)
1.5.2 阻抗圆图的特点	(25)	3 微波平面传输线	(68)
1.5.3 导纳圆图	(27)	3.1 平面传输线的参量	(68)
1.5.4 圆图应用举例	(28)	3.1.1 静态法	(69)
1.5.5 圆图的另类应用:决定 $ \Gamma > 1$ 时的输入阻抗	(33)	3.1.2 动态分析	(69)
1.6 有耗传输线	(34)	3.2 微带线	(71)
1.6.1 有耗线的特性参数	(34)	3.2.1 分析的公式	(71)
1.6.2 传输线效率的计算	(35)	3.2.2 综合的公式	(71)
思考题与习题	(36)	3.2.3 图解法	(72)
2 波导传输线	(38)	3.2.4 厚度的影响	(74)
2.1 导行波系统的场方程	(38)	3.2.5 色散效应	(74)
		3.2.6 屏蔽盒的影响	(74)
		3.2.7 微带线的损耗	(74)

3.2.8 微带线的最大工作频率	(75)	5.2.2 矩形波导 TE_{10} 波的等效 阻抗 Z_e	(109)
3.3 带状线	(75)	5.2.3 电压、电流和阻抗的归一化	(110)
3.4 耦合线	(77)	5.3 微波网络的主要特点	(112)
3.4.1 耦合带状线	(78)	5.4 微波网络参量	(113)
3.4.2 耦合微带线	(79)	5.4.1 阻抗参量 Z	(113)
3.5 共面波导与共面带状线	(80)	5.4.2 导纳参量 Y	(114)
3.6 槽线	(81)	5.4.3 转移参量 A	(115)
3.7 悬置和倒置微带线	(82)	5.4.4 散射参量 S	(116)
3.8 鳍线	(82)	5.4.5 传输参量 T	(118)
思考题与习题	(83)	5.4.6 双端口网络各种矩阵间的 关系	(119)
4 微波谐振器	(85)	5.5 基本电路单元网络参量	(120)
4.1 谐振回路的基本性质	(85)	5.6 双端口网络的工作特性参量	(122)
4.1.1 谐振回路中的储能	(85)	5.7 参考面移动对散射参量矩阵的 影响	(125)
4.1.2 品质因数与谐振频率	(86)	思考题与习题	(126)
4.1.3 有载品质因数 Q_L	(87)	6 定向耦合器与功率分配器	(129)
4.2 微波谐振器的基本参数	(87)	6.1 定向耦合器的技术指标	(129)
4.2.1 谐振波长 λ_0 (谐振频率 f_0)	(88)	6.2 定向耦合器的网络分析	(130)
4.2.2 微波谐振腔的品质因数	(88)	6.3 平行耦合线定向耦合器	(132)
4.3 矩形金属谐振腔	(90)	6.3.1 奇偶模分析法	(132)
4.3.1 矩形谐振腔中的振荡模	(90)	6.3.2 TEM 波耦合线定向耦合器的 设计	(133)
4.3.2 矩形谐振腔的谐振波长 λ_0	(91)	6.3.3 准 TEM 波线耦合定向 耦合器	(135)
4.3.3 矩形谐振腔的主模 TE_{101}	(92)	6.4 分支线定向耦合器	(135)
4.4 圆柱形谐振腔	(94)	6.5 匹配桥 T (环形器)	(136)
4.4.1 圆柱形谐振腔的电磁场方程	(94)	6.6 口径耦合定向耦合器	(137)
4.4.2 圆柱形谐振腔的谐振波长及 空载品质因数	(95)	6.6.1 波导型定向耦合器	(137)
4.4.3 圆柱形谐振腔常用的几种 振荡模	(95)	6.6.2 两种传输媒质的口径耦合 定向耦合器	(138)
4.4.4 圆柱形谐振腔的模式图	(97)	6.7 功率分配器与合成器	(138)
4.5 同轴谐振腔	(98)	6.7.1 微带线的 T 形分支	(138)
4.6 介质谐振器	(100)	6.7.2 不等功率输出的微带功率 分配器	(139)
4.6.1 振荡模及谐振频率的计算	(100)	6.7.3 波导 E-T 和 H-T 分支	(142)
4.6.2 介质谐振器的材料	(102)	6.7.4 双 T 分支及魔 T	(143)
4.7 平面微带线谐振结构	(103)	6.8 衰减器与波型变换	(146)
4.7.1 矩形微带线谐振器	(103)	6.8.1 衰减器	(146)
4.7.2 圆盘形微带线谐振器	(103)	6.8.2 波型与极化的变换	(148)
4.7.3 圆环形微带线谐振器	(104)	思考题与习题	(150)
4.7.4 三角形微带线谐振器	(105)	7 阻抗变换元件与匹配技术	(152)
4.8 谐振腔的微扰	(105)		
思考题与习题	(106)		
5 微波网络基础	(108)		
5.1 引言	(108)		
5.2 波导等效为双线	(108)		
5.2.1 等效的基础	(109)		

7.1 集总参数元件的设计.....	(152)	8.6.2 串联与并联谐振电路的 微波实现.....	(190)
7.2 波导匹配中的电抗元件.....	(155)	8.6.3 微波滤波器计算与设计举例	(190)
7.2.1 膜片.....	(156)	8.7 微波带通滤波器的设计.....	(194)
7.2.2 调谐螺钉.....	(156)	8.7.1 设计步骤.....	(194)
7.2.3 短路活塞.....	(157)	8.7.2 从变形低通到带通滤波器.....	(194)
7.3 传输线间的连接与转换.....	(158)	8.7.3 平行耦合线带通滤波器.....	(197)
7.3.1 波导间的连接.....	(158)	8.7.4 用耦合系数设计带通滤波器	(200)
7.3.2 同轴—波导转接器.....	(159)	8.8 介质滤波器.....	(200)
7.3.3 波导—微带转接器.....	(159)	思考题与习题	(202)
7.3.4 同轴—微带转接器.....	(159)	9 微波铁氧体元件	(204)
7.4 微带线中的不连续性与电抗元件	(159)	9.1 铁氧体的张量导磁率.....	(204)
7.4.1 微带线的不连续性.....	(159)	9.2 圆极化波作用下铁氧体的重要 特性.....	(205)
7.4.2 短路与开路短截线.....	(161)	9.3 微波铁氧体隔离器.....	(207)
7.4.3 高低阻抗传输线.....	(162)	9.3.1 场移式隔离器.....	(207)
7.5 阻抗变换与匹配网络.....	(162)	9.3.2 谐振式隔离器.....	(208)
7.5.1 单跨线匹配法.....	(163)	9.4 铁氧体环行器.....	(208)
7.5.2 串联短截线匹配法.....	(165)	思考题与习题	(210)
7.5.3 双短截线(双跨线)匹配法.....	(165)	10 微波测量	(211)
7.5.4 $\lambda/4$ 线阻抗变换器及其带宽	(167)	10.1 微波功率测量	(211)
7.6 多节 $\lambda/4$ 线变换器.....	(169)	10.1.1 大功率测量——热量计	(211)
7.7 渐变线阻抗变换器.....	(171)	10.1.2 小功率测量——热敏电阻式 功率计	(212)
7.7.1 指数律渐变线的设计.....	(172)	10.1.3 热电偶式小功率计	(213)
7.7.2 切比雪夫渐变线.....	(173)	10.1.4 微波功率的检测与指示	(214)
思考题与习题	(174)	10.2 驻波比的测量	(215)
8 微波滤波器	(177)	10.2.1 驻波测量线	(216)
8.1 基本概念与技术指标.....	(177)	10.2.2 直接法	(217)
8.2 低通原型滤波器.....	(178)	10.2.3 等指示度法	(217)
8.2.1 低通原型滤波器的衰减特性	(178)	10.2.4 反射计法	(219)
8.2.2 低通原型滤波器的衰减特性与 归一化频率的关系.....	(179)	10.2.5 晶体检波器的校准	(219)
8.3 低通原型滤波器的结构及元件 参数.....	(179)	10.3 波长和频率的测量	(220)
8.4 频率变换与元件的真实值.....	(183)	10.3.1 波长的测量	(220)
8.5 对偶原理与倒置变换器.....	(185)	10.3.2 用谐振式频率计测量频率	(221)
8.5.1 对偶原理.....	(185)	10.4 阻抗测量	(222)
8.5.2 倒置变换器.....	(186)	10.4.1 阻抗测量线法	(222)
8.5.3 变形低通原型.....	(188)	10.4.2 电桥法	(223)
8.6 微波滤波电路的实现.....	(189)	10.5 S 参数的测量	(224)
8.6.1 串联电感和并联电容的微波 实现.....	(189)	10.5.1 测量原理	(224)
		10.5.2 网络分析仪的测量原理	(225)

10.5.3 用驻波测量器测量 S 参数	(226)	12.5 YIG 调谐宽频带振荡器	(275)
10.6 谐振器参数的测量	(226)	12.6 混频器的基本原理	(277)
思考题与习题	(228)	12.6.1 混频器的工作原理	(277)
11 微波固态放大器	(229)	12.6.2 设计混频器应考虑的 若干问题	(279)
11.1 微波固态有源器件	(229)	12.6.3 混频器的类型及其特性	(282)
11.1.1 微波固态有源器件简介	(229)	思考题与习题	(286)
11.1.2 微波单元电路及其制造	(229)	13 微波电子控制电路	(288)
11.1.3 有源器件的工作特性	(230)	13.1 微波开关器件及其等效电路	(288)
11.2 微波晶体管放大器的主要技术 指标	(235)	13.1.1 PIN 管	(288)
11.2.1 功率增益	(236)	13.1.2 MESFET	(289)
11.2.2 噪声特性	(239)	13.2 开关的型式及设计	(290)
11.2.3 放大器的稳定性	(241)	13.2.1 单刀单掷开关(SPST)	(290)
11.3 小信号晶体管放大器的设计	(248)	13.2.2 插损与隔离度	(291)
11.3.1 小信号晶体管放大器的 设计程序	(248)	13.2.3 器件的电抗补偿	(292)
11.3.2 最大功率增益放大器的 设计与举例	(248)	13.2.4 单刀双掷开关(SPDT)	(294)
11.3.3 低噪声放大器的设计	(250)	13.2.5 串—并联型开关	(294)
11.3.4 指定功率增益放大器的 设计	(252)	13.2.6 开关管的偏压	(295)
11.4 功率放大器的设计	(255)	13.3 移相器的设计	(297)
11.4.1 功率放大器的主要技术 指标	(255)	13.3.1 开关线型移相器	(297)
11.4.2 大信号甲类功率放大器的 设计	(258)	13.3.2 加载线型移相器	(298)
思考题与习题	(261)	13.3.3 分支定向耦合器型移相器	(300)
12 微波固态振荡器与混频器	(263)	思考题与习题	(301)
12.1 微波固态振荡器概况	(263)	14 天线	(302)
12.2 负阻振荡器	(264)	14.1 概述	(302)
12.2.1 负阻振荡器的工作原理	(264)	14.2 电流元的辐射	(303)
12.2.2 体效应管和雪崩二极管 振荡器	(264)	14.3 对偶原理与磁流元的辐射	(305)
12.3 晶体管振荡器的设计	(267)	14.3.1 对偶原理	(305)
12.3.1 小信号晶体管振荡器的 分析	(267)	14.3.2 磁流元的辐射	(306)
12.3.2 小信号晶体管振荡器的 设计步骤	(269)	14.3.3 小电流环的辐射	(306)
12.3.3 加入正反馈元件振荡器的 设计	(270)	14.4 面元的辐射	(307)
12.3.4 最大输出功率振荡器	(272)	14.5 对称振子的辐射	(308)
12.4 介质谐振器振荡器	(272)	14.5.1 对称振子辐射场的计算	(308)
		14.5.2 对称振子的方向性图	(310)
		14.5.3 对称振子的辐射功率与 辐射电阻	(311)
		14.6 发射天线的基本电参数	(312)
		14.6.1 天线的方向性图	(312)
		14.6.2 天线的方向性系数 D	(313)
		14.6.3 天线的增益及效率	(315)
		14.6.4 天线的输入阻抗	(316)
		14.6.5 天线的极化特性	(319)
		14.6.6 天线的工作带宽	(320)

14.7 接收天线	(320)	15 无线电波传播	(388)
14.7.1 接收天线的有效长度	(321)	15.1 引言	(388)
14.7.2 接收天线的等效电路及其输出的最大功率	(321)	15.2 长波、中波的地面波传播	(388)
14.7.3 有效面积 S_e	(322)	15.2.1 传播机理	(389)
14.7.4 天线的噪声温度	(322)	15.2.2 地面的电参数	(389)
14.8 线天线阵	(324)	15.2.3 电波在自由空间的衰减	(389)
14.8.1 均匀直线式天线阵	(324)	15.2.4 地面波场强的计算	(391)
14.8.2 反射面的影响	(328)	15.3 短波的电离层传播	(394)
14.9 单极天线与偶极天线	(335)	15.3.1 电离层简介	(395)
14.9.1 长、中波单极天线	(335)	15.3.2 电离层的电参量	(396)
14.9.2 短波水平偶极天线	(335)	15.3.3 电波从电离层反射的条件	(397)
14.9.3 鞭状天线	(336)	15.3.4 电离层探测与频高图	(398)
14.10 螺旋天线	(336)	15.3.5 电离层对电波的吸收与最低可用频率	(399)
14.11 引向天线(八木—宇田天线)	(338)	15.3.6 短波的衰落特性	(400)
14.11.1 八木—宇田天线	(338)	15.4 超短波的空间波传播	(400)
14.11.2 折合天线	(341)	15.4.1 视距	(401)
14.11.3 超短波天线的馈电	(342)	15.4.2 光滑平地地面场强的计算	(401)
14.12 极宽频带天线	(344)	15.4.3 球形地面场强的计算	(403)
14.12.1 平面等角螺旋天线	(345)	15.4.4 夫涅尔区与夫涅尔半径	(404)
14.12.2 圆锥等角螺旋天线	(346)	15.4.5 雷利准则与传播余隙	(406)
14.12.3 对数周期天线	(348)	15.4.6 山峰绕射	(408)
14.13 电视发射天线	(350)	15.5 地面移动通信中的电波传播	(409)
14.13.1 十字形旋转场天线	(350)	15.5.1 陆上移动无线电通信网简介	(410)
14.13.2 蝙蝠翼天线	(351)	15.5.2 移动通信中电波传播的特点	(410)
14.13.3 反射板偶极天线阵	(352)	15.6 微波通信中的电波传播	(411)
14.14 面状天线与喇叭天线	(353)	15.6.1 地形对微波传播的影响	(411)
14.14.1 等效原理	(353)	15.6.2 大气对微波传播的影响	(413)
14.14.2 不同口面场分布的辐射场	(354)	15.6.3 传播余隙的选取	(414)
14.14.3 喇叭天线	(359)	15.6.4 微波通信中的衰落与抗衰落	(414)
14.15 旋转抛物面天线	(360)	思考题与习题	(415)
14.15.1 旋转抛物面天线	(360)	附录 1 同轴线参数表	(417)
14.15.2 卡塞格伦天线	(364)	附录 2 波导参数表	(419)
14.16 缝隙天线与微带天线	(367)	附录 3 常用导体材料的特性	(421)
14.16.1 缝隙天线	(367)	附录 4 常用介质基片材料的高频特性	(422)
14.16.2 微带天线	(371)	附录 5 微带线常用导体材料的特性	(422)
14.17 移动通信天线	(378)	附录 6 工业、科学和医疗(ISM)专用微波频率分配	(423)
14.17.1 全向天线	(378)	史密斯(SMITH)阻抗与导纳圆图	(424)
14.17.2 近代基站天线	(379)	参考资料	(425)
14.17.3 宽带/多频天线	(381)		
14.17.4 手机天线	(381)		
思考题与习题	(382)		

0 绪论

0.1 什么是微波

微波是无线电波中波长最短的电磁波,它包括从 1 m~0.1 mm 的波长范围,其相应的频率范围从 300 MHz~3000 GHz。通常又将它划分为 4 个分波段,如表 0-1 所示。

表 0-1 微波波段的划分

波段名称	波长范围	频率范围/GHz	频段名称
分米波	1 m~10 cm	0.3~3	超高频 UHF
厘米波	10 cm~1 cm	3~30	特高频 SHF
毫米波	10 mm~1 mm	30~300	极高频 EHF
亚毫米波	1 mm~0.1 mm	300~3000	超极高频

国际上又将微波波段划分为更细的分波段,如表 0-2 所示。

表 0-2 微波波段的划分及其代号

波段代号	频率范围/GHz	波段代号	频率范围/GHz
UHF	0.3~1.12	Ka	26.5~40
L	1.12~1.7	Q	33~50
LS	1.7~2.6	U	40~60
S	2.6~3.95	M	50~75
C	3.95~5.85	E	60~90
XC	5.85~8.2	F	90~140
X	8.2~12.4	G	140~220
Ku	12.4~18	R	220~325
K	18~26.5		

0.2 微波技术学科的特点

微波与其它波段的无线电波相比具有如下的特点:

(1)微波的波长极短,它与所使用的元件、设备的尺寸可相比拟。在低频无线电技术中,因为线路尺寸总是甚小于波长,所以,在同一时刻流过某一元件的电流是处处相同的,元件

的参数是“集中”在一起的,称之为集中参数。而到了微波波段,即使在几厘米的导线上各点的电流也可有显著的不同。此时,元件的参数是沿空间分布的,称之为分布参数。研究这样的系统必须用“分布参数”的观点和场的分析方法。而且,普通的集中参数元件(如电阻、电容、电感)已不能应用,代之的是波导管、谐振腔、微带线等分布参数的元部件。

(2)微波的振荡周期(为 $10^{-9} \sim 10^{-12}$ s)极短,它与电子在电子管内的渡越时间(电子从阴极发射到达板极的时间,一般为 10^{-9} s量级)可以比拟。因此,普通的静电控制的电子器件在微波波段已不能有效地工作,代之的是在原理和构造上完全不同的微波电子器件——速调管、磁控管、行波管以及微波固体器件和量子器件。

(3)似光性。微波介于一般无线电波与光波之间,它不仅具有无线电波的性质,还具有光波的某些性质:以光速直线传播;有反射、折射、绕射、干涉等现象;某些几何光学原理(如惠更斯原理、镜像原理、透镜聚焦可获定向窄波束辐射、多普勒效应等)仍然适用。雷达能发现与跟踪目标就是基于这些特性。

(4)微波的频率很高,因此在不大的相对带宽下,其可用带宽很宽,可达数百兆赫至数十千兆赫,故信息容量大,有巨大的信息潜力,且微波波段的电磁波能穿透电离层,因而卫星通信与卫星电视广播、宇宙通信及射电天文学的研究等均需利用微波来实现。

由于微波具有上述特点,使微波技术在通信、雷达、导航、遥感、天文、气象、工业、农业、医疗以及科学研究等方面得到越来越广泛的应用,成为无线电电子学的一个重要的分支。

0.3 微波发展简史及大事记

1862年,英国伟大的物理学家麦克斯韦(J. C. Maxwell, 1831—1879)在总结了前人有关电磁运动规律研究成果的基础上,加以推广而提出了一组描述电磁运动的数学方程。这组方程后人以他的名字命名,它就是著名的麦克斯韦方程。麦克斯韦方程不仅预言了电磁波的存在,把光波解释为电磁波的传播,光速也被发现。而且,直到今天,这组方程仍是人们研究一切宏观电磁问题的基础。著名的物理学家费曼说过,如果公元一万年时,人们还会记得19世纪,一定只知道那时曾经有个麦克斯韦。

1886年,德国物理学家赫兹(Heinrich Hertz, 1857—1894)在其导师亥姆霍兹的支持下,用莱顿瓶放电的实验证实了麦克斯韦预言的电磁波的存在。这实质上开创了微波技术的起点。然而直到20世纪30年代发明了微波连续波发生器,并制成了金属波导管和空腔谐振器后,微波技术才开始迅速发展起来。

1931年,在英国多佛与法国加莱之间建立了世界上第一条微波通信线路,这开创了微波技术在通信中应用的历史。第二次世界大战后,微波接力通信得到了迅速发展。

1935年,英国的沃森·瓦特(R. Watson Watt)向政府提交开展“无线电侦测”的研究方案,并在同年进行的第一次试验中测到飞机的回波,从此开创了对雷达研究的历史。1938年,维利安兄弟制造了第一只速调管。1940年,英国伯明翰大学的布特和兰特尔研制出谐振腔磁控管($\lambda = 9.8$ cm)。

1940年,第一台10 cm波长雷达问世,它能探出11 km远处露出水面的潜望镜。微波雷达的迅速发展,给希特勒的潜水艇以沉重的打击。

1940年9月,英国科技使团携带空腔谐振磁控管(Resonant Cavity Magnetron)及有关雷达的绝密资料赴美国,以说服美国帮助英国继续对雷达的研究。此次携带的磁控管是10cm频段,功率达10kW(约为美国同频段产品的1000倍)。磁控管的问世意味着雷达进入一个新的发展阶段,它既有频率高又有功率大的特点。因而雷达的分辨率更高,作用距离更远。同年,美国罗斯福总统亲自批准在麻省理工学院成立“辐射实验室”,调集大量科技精英(其中后来有约十人获诺贝尔奖)以战时状态对雷达进行大规模、全方位的研究与产品开发,这是雷达史上具有里程碑意义的事件。它不仅为战时同盟国提供了各种急需的雷达系统,还极大地促进了雷达系统和微波技术的迅速发展。曾在辐射实验室工作了两年后调去研制原子弹的物理学家贝特曾说:“雷达当然是致胜的关键,……可惜的是战争结束后,它的风采却被原子弹给遮蔽了。原子弹只不过为战争划上句号,真正赢得战争的却是雷达。”

1942年,辐射实验室传播组注意到雷达可以锁定风暴,于是有了气象雷达。

1945年,雷神公司的珀西·斯潘塞在测试中心磁控管前面感到手渐渐变暖,口袋中的棒棒糖逐渐融化。受此启发,公司制造出以磁控管为核心的炉子以供商业厨房使用,并为此注册了商标,“微波炉”开始逐渐走入千家万户(不过也经历了数十年的发展时间)。现在,磁控管依旧是微波炉的核心。

1964年,德国人彭齐亚斯(Arno Allan Penzias, 1933—)和威尔逊(Robert W. Wilson, 1936—)在维修一架射电望远镜的喇叭形低噪声天线时,发现了一种奇怪的噪声。经过他们认真的计算确认,在宇宙背景中有比预期温度高约3.5K的微波背景辐射(现今测定的最精确温度是2.736K)。他们于1965年5月13日公布的这一结果使宇宙起源大爆炸的理论得到了证实。这是探索宇宙起源的关键性突破,被认为是20世纪重大的科学发现之一,因此,他们共同获得1978年的诺贝尔物理学奖。

20世纪50年代,火箭技术的进步为卫星通信打下了基础。1963年,国际通信卫星组织发射了第一颗实验性的同步通信卫星,因此,卫星通信及卫星电视广播成为微波应用的又一热点。

20世纪70年代,雷达、卫星通信、微波中继通信成为微波应用的三大领域。因此,微波技术以更快的速度扩展到其它领域,例如微波加热、微波遥感。到了80年代,尤其是90年代以后,移动通信成为微波应用的最热门的课题。目前,微波技术的应用大致包括通信、雷达、导航、电子对抗、导弹制导、电视广播、微波加热、微波遥感、气象、天文以及工农业和科学研究等方面,下面作简要的介绍。

0.4 微波技术的主要应用

0.4.1 微波通信

现代的通信系统主要有微波中继通信、卫星通信、移动通信和光纤通信。可见除了光纤通信,其它三种均属于微波的范畴。

1. 微波中继通信

由于微波在地面上沿直线传播,而地球是一个球体,地球的曲率半径使微波在地面上只

能传播数十公里的距离(即视距),因此,为了增大通信距离而采用在中间设立若干中继站的办法,如图 0-1 所示。其中,接收天线接收前一站发射来的信号并作放大、均衡等处理,再由其发射天线定向发射到下一个中继站,这样一站一站地把信号传下去,如此实现远距离通信。微波中继通信具有传输容量大、长途传输质量稳定、投资少、建设周期短、维护方便和抗重大自然灾害能力强等特点。因此,即使在光纤通信非常发达的今天,微波中继通信仍有着不可替代的存在价值。它主要用于电话、电视和数据等远距离的传递。微波中继通信大多工作于 1~20GHz 频段之间。

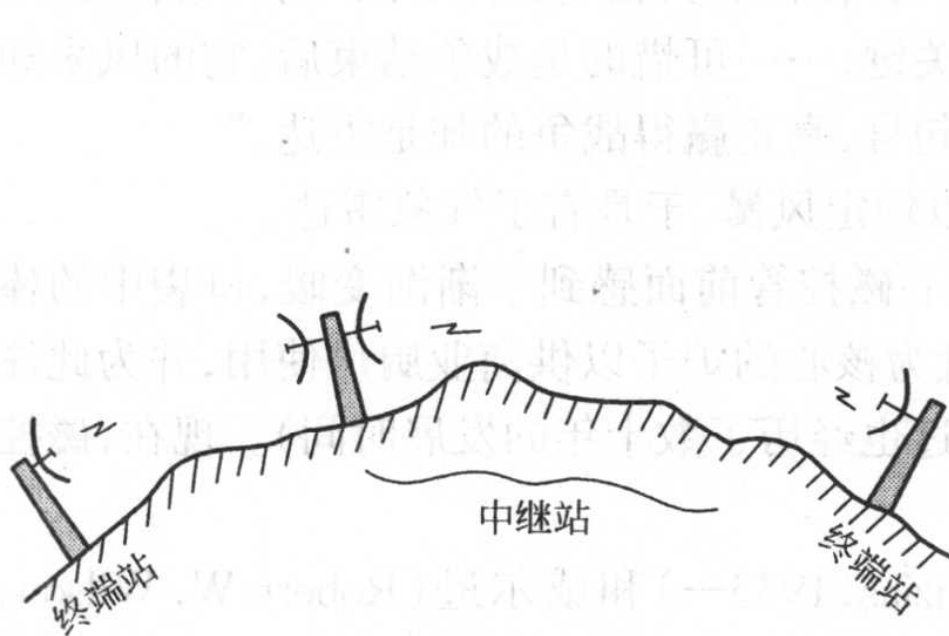


图 0-1 微波中继通信示意图

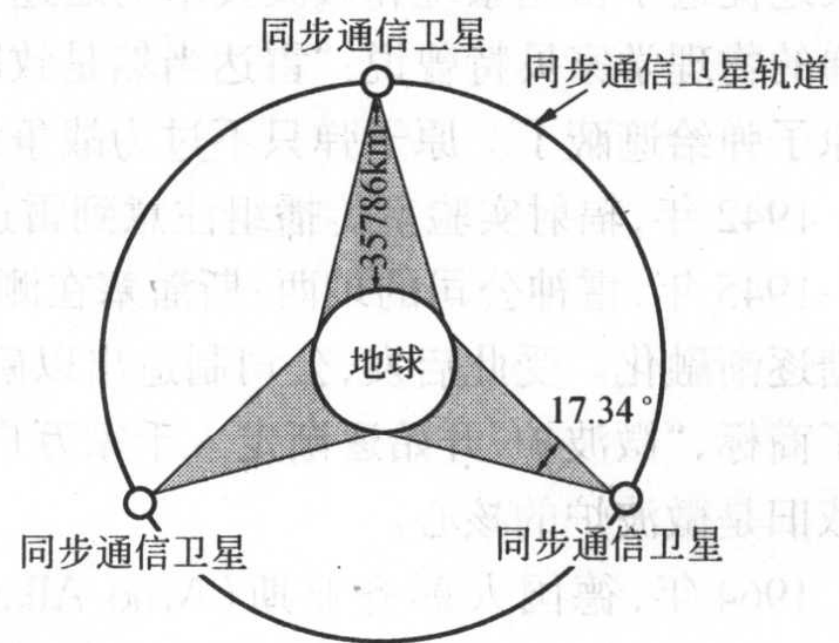


图 0-2 同步卫星实现全球通信与广播

2. 卫星通信

微波通信除了具有信息容量大的特点外,还由于其波长短,相应的天线可以构造得具有很大的电尺寸。而天线的增益与天线的 S/λ^2 值成正比(S 为天线口面积, λ 为工作波长),天线主瓣宽度与 S/λ^2 成反比,因而能实现天线的高增益与锐方向性。若与低噪声放大器相配合,可以实现超远距离的微弱信号的接收;兼之低频率无线电波穿越大气层中的电离层时受到极大的衰减,而微波穿越电离层时受到的衰减不大,这就使应用微波实现卫星通信及深空通信成为可能,也非它莫属。其实,卫星通信就是把微波中继站放到外层空间的卫星上的微波中继通信。如果把互成 120° 的三颗卫星放置于地球的同步轨道上(赤道上空 35786 km 处),如图 0-2 所示,就可以实现全球的通信或卫星电视广播了。

卫星通信自 20 世纪 60 年代投入使用以后,其工作频率已从 L, C 波段发展到现在普遍使用 Ku 频段以及更高的频段,通信容量、通信质量和使用寿命等技术指标都有极大的提高,其应用的范围也越加广泛。如在 2003 年美国对伊战争中,美国就投入了 90 多颗军用卫星用于对敌的侦察、通信和指挥等。如今,一颗卫星,采用了数字压缩技术以后就可以传输百余套电视节目。卫星通信具有通信距离远、服务区大、传输的信息容量大、可靠性高、图像质量好、灵活性强以及可实现多址通信等优点。可见卫星通信不管在民用还是军用上都有着极其重要的位置。

3. 移动通信

早期的运动中的通信利用从短波到超短波的频段,一般是点对点的通信。而近 20 多年来,随着通信技术和计算机技术的迅猛发展,地面移动通信网遍地开花地建立起来,其工作频率大部分已进入微波的低频段,如个人数字蜂窝系统(PDC)、个人通信系统(PCS)、数字蜂窝系统(DCS)、数字增强无绳电话(DECT)、无线局域网(WLAN)、蓝牙技术和全球定位系

统(GPS)等。可见其应用日益普及,与个人及家庭有着密切关系。

0.4.2 雷达(Radar)

“雷达”一词是“无线电侦测与测距”的英文字首(Radio detection and range)的译音。雷达利用无线电波遇物体会发生反射回波,并根据所接收的回波来获取被测物体的有关信息,从而实现对被测物体的测距、测向、测速以及目标识别与重建等。

传统的雷达设备的工作原理如图 0-3 所示,当雷达发射机发射的无线电波遇到目标物所反射的回波被雷达接收机接收,并在雷达显示荧屏上显示发射脉冲和回波脉冲时,通过测量脉冲间的间隙便可由下式计算出被测物体的距离:

$$s = \frac{1}{2} c_0 t$$

式中, s 为被测目标的距离; c_0 为空气中电波传播的速度,即光速; t 为电波从发射机传至被测目标再返回雷达接收机所经过的时间。理论上,若把天线的主瓣波束对准目标时,回波信号最强。由天线电轴的方位角及仰角即可确定目标的方向,再利用三角关系,可由距离 s 、仰角 β 求出目标的水平距离 D 及高度 h 。但现代雷达已有不少更为精确确定方向的方法,例如脉冲多普勒雷达。

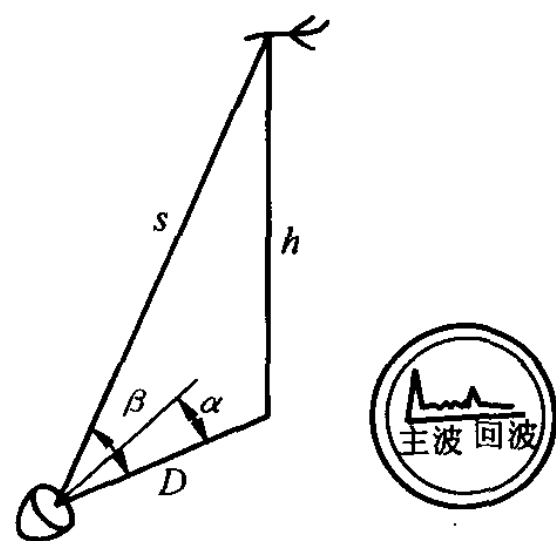


图 0-3 雷达定位原理

1. 多普勒效应

如果发射源与接收者(目标)之间有相对的径向运动时,雷达接收到的信号频率将发生变化,这种现象称为多普勒效应。发射频率与接收频率之差称为多普勒频率 f_D ,有

$$f_D = \frac{2v}{c} f_0 \cos \alpha$$

式中, f_0 为发射频率; v 为目标的运动速度; c 为光速; α 为雷达天线电轴与运动目标之间的夹角。

利用多普勒效应制成的雷达称为多普勒雷达,它不仅能测定目标的方位、距离,还能测出其运动速度。在 X 波段或 K 波段制成的小型连续波多普勒雷达,广泛应用于交通监管部门的车辆测速。如将一部小型的收发天线分开的连续波多普勒雷达安装于自动门上,对于正常人的步行速度,它可产生几十赫兹以上的多普勒频率,由此产生开门控制信号。当人离开或静止不动时,几秒钟后就能自动恢复原状(关门)。这种微波自动门已广泛地用于宾馆、空调房门及手术室大门等的控制。利用多普勒效应还可以做成微波防盗报警装置。

2. 雷达截面(RCS)

物体对雷达波的散射特性往往用物体的雷达截面积 RCS 来表示。它定义为单位面积的入射功率所能产生的散射功率。一个半径为 R 的理想反射大金属球,其 $RCS = \pi R^2$,如果不是理想导体,则其 RCS 将减小。如果改变物体的几何形状,使物体反射的雷达波尽量小,或者用吸收雷达波的材料将目标物罩住,则其雷达截面积将很小,这就是隐形的原理。

对于频率为 10GHz(3cm)的无线电波,成人的雷达截面积为 1m^2 ,汽车为 10^2m^2 ,喷气式客机为 10^3m^2 ,大型货车为 10^4m^2 ,邮轮为 10^6m^2 ,蚊子为 10^{-4}m^2 。对隐形飞机,雷达截面积小于 10^{-4}m^2 ,可见在这个频段,雷达是很难发现隐形飞机的。

虽然隐形飞机对单站雷达(收、发在同一地)的 RCS 很小,但对双站雷达则不然。所谓双站雷达,是指雷达波的发射与雷达波的接收处于两个不同的位置,如图 0-4 所示,它们之间相距数百公里甚至更大的距离。图中的尖劈物体在发射天线方向的雷达截面很小,该尖劈物体对发射点的雷达是隐身的;但对接收天线的方向而言,因其反射波很强,其雷达截面可能很大,因而它对该方向的雷达是原形毕露的。所以,有学者认为在今后的军事对抗中,双站雷达将大行其道。

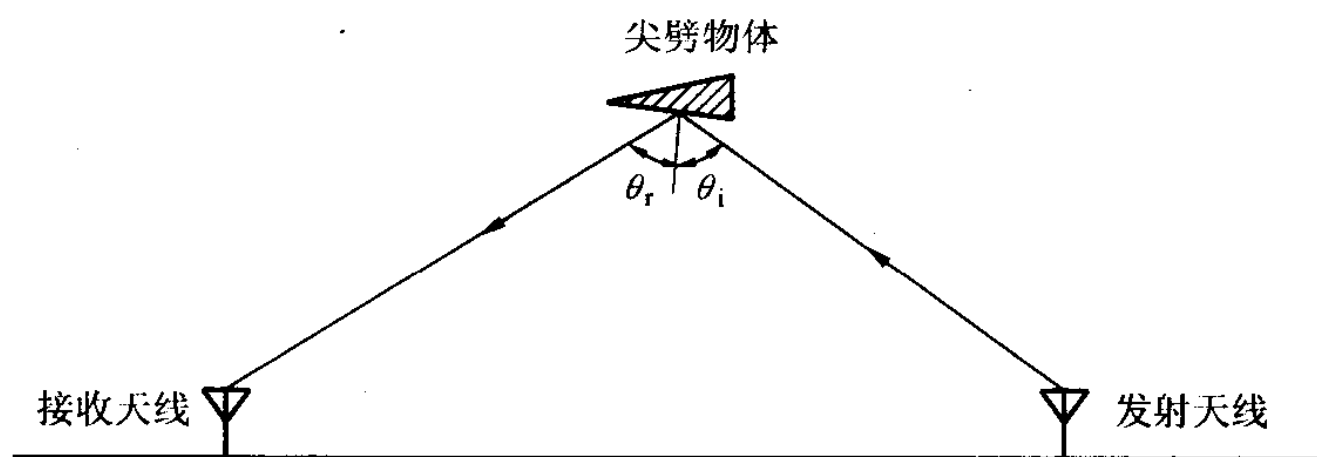


图 0-4 尖劈物体对单站和双站雷达的反射波

雷达作为一种测量设备,最早和最大量的应用是在军事上。目前用于军事上的有警戒雷达、跟踪雷达、炮瞄雷达、制导雷达以及测控雷达等。如按其工作体制或信号加工方式分类有:连续波雷达、脉冲雷达、脉冲多普勒雷达、目标显示雷达、相控阵雷达和合成孔径雷达等。如按工作频段分有:短波雷达、米波雷达、分米波雷达、厘米波雷达、毫米波雷达、亚毫米波雷达和激光雷达。大多数雷达工作于微波频段和超短波频段。下面对几种雷达略作介绍。

3. 相控阵雷达

相控阵雷达是用电子计算机来控制天线诸单元(美国的巨型反导雷达系统 SBX 的雷达天线共有 69632 个多频收发模块,工作于 X 频段)的馈电相位,以电控的方式实现波束的快速扫描,并能根据需要形成多波束,实现对多目标的同时探测和自动跟踪。超远程警戒雷达的作用距离可达 10000 km 以上,能为反导系统提供 15~30 min 的预警时间。现在很多飞机、舰艇、防空部队都配备有不同作用距离的相控阵雷达。典型的预警机上就是靠其相控阵雷达系统来指挥战斗的。传统的机械扫描雷达,每扫描一次需 5~10 s 的时间,而相控阵雷达,波束可在 $1\mu\text{s}$ 之内从一种状态过渡到另一种状态。雷达波束可在监视目标上停留,信息能以 0.5~1 s 的速度迅速更新,从而保证雷达在探测远距离时能自动截获目标,提前发现极超高速目标。因为其信息更新速率高,可大量积累截获到的目标信号,提高抗干扰条件的能见度、视距,保证自动搜索跟踪,截获迅速机动的空中目标、低空目标、悬停的直升机、空气球和水面舰艇等。可同时监视 250~500 个目标,因此预警机被称为战斗力的倍增器。

4. 民用雷达

在雷达的回波信号中,存在许多有用的信息(例如频率、相位、振幅、时延及极化等),它们包含着被测物体更精细的结构及物理特性。雷达测量具有许多独特的特点,如测量距离远、全天候、实时性、穿透性以及物体对微波频段特有的反射特性等,这是光学方法和其它测量方法所不及的。因此,雷达技术越来越广泛地应用于民用上,如民用航空(航空管制及飞机导航)、航海、气象、天文、遥感、城市交通及其它方面。

5. 微波遥感

利用机载或星载的合成孔径雷达对地面进行测量和侦察。工作时,载体飞过非常直的路径,譬如 1 km 长,沿途连续发射出固定频率的微波脉冲,当所有回波经合成处理之后,其鉴别率就像一孔径为 1 km 的巨型天线所能达到的效果。美国第 6 代侦察卫星上的长曲棍球雷达成像卫星上装有两个 X 波段和一个 L 波段的合成孔径雷达,可全天候侦察,其地面分辨率为 1 m,这种雷达在海湾战争中曾发现沙漠地表以下 2 m 处的目标(飞毛腿发射架和坦克等车辆)。我国在航空遥感方面,已实现了从单一频段的微波遥感到 L、S、X 和 Ku 波段的系列发展,从单极化到多极化,分辨率也已达到国际先进水平,并已完成几代实时成像处理器的研究和实际应用,实现了我国雷达图像从二维到三维的跨越,现正在积极开展星载合成孔径雷达方面的研究和应用。

0.4.3 全球卫星导航定位系统

无线电导航系统用以帮助舰船和空中飞行器确定它们的位置,目前已扩展到包括陆地上及外层空间中一切需要定位的物体(如车辆、导弹和个体单兵等)。目前世界上有几个卫星导航系统。

1. GPS(Global Position System)全球卫星导航系统(美国)

该系统是由美国国防部开发并于 1994 年 3 月完成的星基全球无线电导航系统。它是由绕地球的 6 个圆形轨道上的 24 颗卫星所组成(包括备用星)。其主要任务是为全球范围内的飞机、舰船、地面部队、车辆、近地空间飞行的导弹和低轨道航天器等提供全天候、连续和实时的高精度的七维信息(三维位置、三维速度和时间),还可用于大地测量和高精度卫星授时等。该系统工作时,每颗卫星发射两种伪随机扩频信号(P 码为军码,C/A 码为民码),使用载体搜索并有选择地跟踪四颗卫星的信号,以码分形式区分四颗卫星的信号,从中提取星历,测量信号到达时间,经迭代定位计算就可获得使用者自身所在位置及精确的时间,从中提取多普勒频移量,就能得到使用者载体的三维速度。该系统供民用用户使用的标准定位服务精度为 100 m,军用定位精度为 10 m。为了加强其在导航市场的竞争力,美国政府于 2000 年 5 月 1 日撤销对 GPS 的 SA 干扰技术,使军民的定位精度一样都是 10 m。但是,GPS 系统本质上是美国的军用系统,在作战时,美国随时可以恢复 SA 干扰,甚至可随时切断向某些国家、地区发送的信号,使这些国家、地区的飞机、舰船等陷于“瘫痪”。

2. Glonass 全球导航卫星系统(前苏联)

这是前苏联于 20 世纪 80 年代开始建造的与美国 GPS 系统相似的卫星定位系统。这一系统目前在轨卫星不能独立组网,只能与 GPS 联合使用。

3. 伽里略卫星定位系统(Galileo, 欧盟和中国)

该系统由 30 颗分布在 6 个轨道面上的卫星所组成(其中 3 颗为在轨备用星),轨道高度约 20000 km。该系统从运营开始就将同时开拓军民两用领域,可为用户提供三种信号,即免费使用的信号,加密需交费的信号,加密且满足更高要求的信号,其精度依次提高。但即使免费的信号其精度也比美国的 GPS 高(达 6 m),伽里略的定位精度最高可达厘米级。2003 年 9 月 18 日中国与欧盟达成一致,中国将加入伽里略计划联合执行体,因此,中国将成为伽里略系统的拥有者之一。该系统使用的频率为 1.237 800 ~ 1.258 085 GHz 和 1.587 901 ~ 1.610 000 GHz,天线发射右旋圆极化波。

4. 北斗系统及 COMPASS 系统(中国)

北斗一代卫星导航系统总共只有 3 颗卫星在轨(其中一颗为备用星)。因此要求用户安装有一台高精度的原子钟,这大大限制了其应用范围。

北斗二代计划是四颗静止星加 12 颗中轨星(约 2×10^4 km),再加上 9 颗高轨星(3.6×10^4 km)所组成,申请的频率与 GPS 一样也在 L 频段。计划 2006 年底开始组网,2010 年完成。

COMPASS 系统是继北斗一代系统后中国新一代的卫星导航系统,它由 4 颗静止星和两颗移动卫星网络组成,目前正处于研制阶段。

北斗卫星与美国 GPS 相比较,其优势在于具有短信息双向通信功能,中心站可以马上联系到所有的终端,这对车辆监管、调度以及船舶救助至关重要,更加适合物流企业、铁路、船舶及长途车辆等使用。自驾游也可借助此系统。

0.4.4 微波加热与应用

传统的加热方式(为烧、烤、烘等),物料的受热一般是通过热传导或热辐射的方式由表及里进行的,被加热的物体可以是介质也可以是导体。但微波加热的对象是介质或半导体。

介质存在极化现象,介质中的极性分子在外电场作用下,将受到一电力矩作用,分子将旋转到与外电场方向一致的位置。当外电场交替变化时,极化方向也将交替变化。在微波场作用下,因为频率很高,极化方向的改变来不及跟上频率的改变,而是在原位上不停地摆动。由于分子热运动和相邻分子间的相互作用,摆动受到干扰和制约,这就产生了类似摩擦的效应,其结果使分子储存的一部分能量变成分子碰撞而产生的热能释放出来,这就产生了介质损耗,即微波能量使物料温度升高的机理。

把物料放在微波场中,物料所吸收的微波功率为

$$P = \frac{1}{2} \sigma_d \int_V |E|^2 dV = \frac{1}{2} \omega \epsilon'' \int_V |E|^2 dV$$

式中, σ_d 为物料的电导率; ϵ'' 为物料的复介电常数 ϵ_c 的虚部(即 $\epsilon_c = \epsilon' - j\epsilon''$); E 为物料中的电场强度; V 为物料的体积。

微波加热具有以下特点:加热速度快,不需传热的过程,可以内外同时受热,加热均匀,热效率高,没有热惯性,便于工业上应用及提高质量,特别适用于自动控制系统、清洁卫生和无工业污染等。

目前微波加热主要集中在食品、橡胶、造纸、纺织、农产品加工和化学工业等方面。在生产大规模集成电路中,可用微波产生等离子体,还可用于化学气相沉积和用以制造高纯度光纤。用微波来烘干谷物、处理种子和消灭害虫是微波在农业方面的重要应用。对各种种子进行适当剂量照射可以提高发芽率。微波处理的蚕卵能提高产茧量和茧层率。

应用微波对人体进行适当剂量照射,可以改善人体的新陈代谢。微波已广泛用于神经病、慢性风湿症、神经炎、蜂窝组织炎、下肢溃疡、便秘、前列腺肥大、高血压、挫伤、腰痛、疔痛、皮炎、脓肿及冻伤等疾病的治疗。外科中出现了微波手术刀,用微波波束可粉碎肾结石。

另外,目前已研制出许多较为先进的微波诊断仪器。例如,人体病变部位与其周围会产生温差,利用微波辐射计可以测量出这种温差来,由此进行诊断。目前已有工作频率为 0.6~45GHz 等波段的各种规格,其分辨率可达 0.1°C 的通常称为微波 CT 断层扫描仪。还