



俄罗斯最新装备理论与技术丛书



[俄] A.C.Карташкин 著

滕克难 主编译

贾慧 薛鲁强 韩建立 编译

曲长文 主审

Авиационные радиосистемы

航空无线电系统与机载 雷达信息处理技术 (上)

——航空无线电系统



国防工业出版社

National Defense Industry Press

俄罗斯最新装备理论与技术丛书

航空无线电系统与 机载雷达信息处理技术 (上)

航空无线电系统

[俄] A. C. Карташкин 著

滕克难 主编译

贾慧 薛鲁强 韩建立 编译

曲长文 主审

国防工业出版社

· 北京 ·

编译者序

航空无线电技术是军用飞机通信、导航、着陆、目标探测和识别,以及电子侦察、对抗和防御的关键支撑技术,它不仅直接关系到军用飞机的品质,还决定着军用飞机的遂行各种作战任务的能力。因此,世界航空大国都十分重视航空无线电技术在现代军用飞机上的应用研究。

俄罗斯作为航空大国,历来重视航空无线电技术的研究和应用。《航空无线电系统》一书俄文版 2011 年由俄罗斯无线电软件出版社(Издательское предприятие РадиоСофт)出版,原著俄文书名 *Авиационные радиосистемы*,汇集了俄罗斯航空无线电技术领域的最新研究成果。该书从基本理论和基本方法入手,深入阐述了无线电技术在航空工程领域的各项应用,特别是对军用飞机机载电子设备系统设计与信号分析处理的工程技术方法等方面讲解透彻、案例详实、深入浅出、言之有物;既介绍了基础理论和研究方法,又直观地反映出俄制航空电子设备的技术特点和工程设计理念,具有较高的学术和实用价值。

近些年来,通过航空工业技术领域对俄合作,我国科技人员对俄罗斯航空无线电系统跟踪研究多年,在工程技术领域也有深入地消化吸收,但对其内在原理理论和设计理念仍缺少系统完整地剖析掌握。本书面世,将有利于国内从事航空装备科研任务的人员掌握相关知识和技术,促进我国国防科技事业和武器装备建设的发展。

为方便读者阅读,编译过程中在保持原著章节结构不变的基础上,对章节内的部分内容编目进行了细化和明确。本书适用于无线电通信、导航、着陆、目标探测和识别,与电子侦察、对抗和防御专业的科研设计人员,以及航空装备发展论证研究人员、航空装备使用维护工程师,与高等院校教师、研究生和大学生参考使用。

全书的翻译编辑出版工作从 2013 年初启动。滕克难教授担任主编译,对全书进行统稿和审校,并对第 1 章、第 2 章内容进行了译校;韩建立对第 3 章内容进行了译校;薛鲁强对第 4 章内容进行了译校;贾慧承担了全书的文字翻译工作,对第 5 章、第 6 章进行了译校,并承担了所有图表和公式的翻译、编辑工作。曲长文教授对全书进行了审校。

历时 3 年多时间,本译著终于与读者见面了。特别感谢国防工业出版社为

本译著编辑出版工作给予的悉心指导。由于编译者水平有限,错误和疏漏之处在所难免,敬请同行专家和广大读者予以指正。

主编译: 秦克唯

2016年6月7日

前 言

现代航空领域正处于迅猛发展的时期,一方面是因为主张使用近地空间的战略、战术任务范围不断拓展,另一方面是因为航空技术和飞行器技术性能(例如飞行器的飞行高度、爬升速度、载重量、飞行距离等)得到不断提高。这两个原因导致了需要更加细微地观察日趋复杂的空中态势,同时要更加有效地缓解这种紧张情况。为了解决观察和缓解空中态势的问题,很多情况下我们将希望寄托于无线电系统。

无线电系统这个术语来源于拉丁语“radio”(辐射的意思)和希腊语“systēma”(意思是紧密结合在一起的整体),具体的词语解释就是:用于确定战术任务并在工作过程中使用电磁波的复杂技术综合体。可以根据战术任务的相似性,将无线电系统进行归类,例如,执行单独的航行阶段(飞机机动或着陆)任务的无线电系统,或者是在指示器屏幕上反映空中态势的自动化无线电设备等。

作为一种技术综合体,无线电系统的复杂性是由两个因素决定的。第一个因素是功能结构具有多样性,即无线电系统通常是多种不同的装置(用于完成某种技术功能的组件)组成的,而每种装置的结构都与其他装置有所不同,并且执行的任务与其他装置也不尽相同。一般来说,无线电系统的组成部分,通常包括的功能组件有发射装置、接收装置、天线和指示器等。

第二个因素是使用的材料具有多样性,即为了保证无线电系统正常工作,不仅要使用电子器件(放大器、振荡器等)或机械组件(天线、波导等),而且还要使用特殊的信息载体——电磁场。

无线电系统承担的战术任务是非常宽泛的,包括发射和接收各种语音与非语音信息、确定飞行器的国籍属性、确定自身的位置等。所以,无线电系统既可以在自主(独立的)状态下工作,也可以作为更大型系统的组成部分与其他几个无线电系统共同完成战术任务(导航驾驶综合系统就属于这种情况)。

无线电系统在航空领域中的应用开始于100多年前,即20世纪初。历史上第一次出现的无线电系统是电报机(当时的电报员在地面上向飞行员发送空中态势变化的情报,例如出现大规模的敌方飞机),此后,又出现了无线电定向导航系统(当飞机从海上飞入到云层后,机载无线电接收机可以根据安装在海岸上的无线电信标机发射的信号来确定航向)。在现代,无线电系统与其他系统(例如陀螺仪和电动液压装置)一同成为航空领域的必备装置。

无线电系统可以解决大部分的航空任务,其优点主要体现在以下几个方面:

(1) 作用距离。无线电系统的作用距离与电磁波辐射源的特性,以及电磁波在空间中的传播距离有关。多数情况下,无线电系统是实现远距离联系的方法,例如有雾情况下光学设备的作用距离会比较小,而在夜间飞行员利用肉眼观察也会比较困难。

(2) 多功能。这个优点体现在应用前景非常广阔,例如,使用无线电系统不仅可以确定飞行器位置,而且还可以计算出飞行器的速度、向它发送信息和确定它的国籍属性等。

(3) 灵活性。这个优点体现在无线电系统可以在不改变重量、尺寸和供电指标的情况下,在足够宽的范围内改变自身参数,特别是可以采用多种无线电信号调制样式,进而实现大容量的信息发送,而采用变频方法还可以提高无线电系统的抗干扰能力。

(4) 工作效率。由于电磁波在空间中的传播速度非常快,而且信号处理器中的信号处理速度也非常快,所以这个优点已经得到证实。

(5) 大信息量。这个优点体现在使用高频无线电信号复杂编码的情况下,因为这种无线电信号的每一个信号都可以携带大容量的多样化的信息。

(6) 自主性。这种优点的前提条件是,无线电系统可以不借助其他系统独立完成工作。

无线电系统的优点还因为下述的一些其他原因得到进一步凸显:

(1) 无线电系统的理论研究和应用实践,均得到了比较好的发展。

(2) 现代元器件制造工艺可以使无线电系统的重量、尺寸、供电需求和可靠性指标满足使用要求。

(3) 计算机可以提高大容量信息的处理速度。

此外,无线电系统也存在着一些不足,例如:

(1) 价格比较昂贵(根据各种资料统计,无线电系统的造价占整个飞行器造价的 60% ~ 80%)。

(2) 能量消耗比较大,而且飞行器上使用的大功率无线电系统效率比较低。例如,多普勒导航系统 AN/ASM - 128,在机载 400Hz 电网供电功率为 125W 的条件下,其瞬时辐射功率可达 50MW。

(3) 机载无线电系统的发射天线必须(许多情况下是这样)超出机身,这就导致了飞行器的空气动力特性变差。

(4) 不可能(多数情况下)只使用某一种地面无线电系统和机载无线电系统就可以完成整个飞行过程(从起飞到着陆)的无线电联络,通常需要使用几种无线电系统,这就导致了飞行成本的提高,甚至还会存在不能联络的飞行区域。

(5) 无线电系统向空间辐射电磁波必然会引起周围生态环境的破坏。

对于无线电系统来说,可以根据不同的标准进行分类。现代通常使用的分

类方法是,根据无线电系统的安装位置和使用用途进行分类:

(1) 地面无线电系统(例如,无线电信标机、空间扫描无线电系统等)。

(2) 机载无线电系统(例如,无线电罗盘、地面扫描无线电系统等)。

此外,需要注意的是,某些无线电系统既有地面设备,也有机载设备(例如,国籍属性识别无线电系统、无线电着陆系统)。

根据使用用途,无线电系统可以分为:

(1) 民用无线电系统(例如,防相撞无线电系统、空中管制无线电系统等)。

(2) 军用无线电系统(例如,无线电拦截和瞄准系统、无线电制导系统等)。

最后,需要注意的是,大多数无线电系统具有双重使用用途,既可以用于民用,也可以用于军用(例如,无线电高度表、多普勒测速系统)。

目 录

第 1 章 无线电信号	1
1.1 无线电信号的基本概念	1
1.2 无线电信号的传播	6
1.2.1 对流层对无线电信号传播的影响	7
1.2.2 电离层对无线电信号传播的影响	9
1.3 无线电信号的调制	14
第 2 章 无线电通信系统	21
2.1 无线电通信系统组成	21
2.1.1 近距无线电通信系统	22
2.1.2 远距无线电通信系统	23
2.2 无线电发射装置组成	25
2.2.1 送话器(咽喉送话器)	26
2.2.2 低频放大器	28
2.2.3 本机振荡器	30
2.2.4 调制器	31
2.2.5 高频放大器	33
2.2.6 发射天线	34
2.3 无线电接收装置的组成	34
2.3.1 接收天线	36
2.3.2 高频放大器	36
2.3.3 检波器(解调器)	36
2.3.4 低频放大器	38
2.3.5 扬声器(扩音器)	38
2.4 收发天线	39
2.4.1 机载远程无线电通信系统天线	41
2.4.2 机载近程无线电通信系统天线	45

第3章 无线电导航系统	50
3.1 引言	50
3.2 无线电技术的坐标测量方法	51
3.2.1 距离测量方法	61
3.2.2 角度坐标测量方法	72
3.2.3 速度测量方法	80
3.3 无线电测距仪	84
3.3.1 机载无线电测距仪	84
3.3.2 地面无线电测距仪	99
3.4 远程无线电导航系统	106
3.4.1 采用相位测距方法的远距无线电导航系统	107
3.4.2 采用等差测距方法的远距无线电导航系统	113
3.4.3 卫星远距无线电导航系统	121
3.5 无线电防相撞系统	128
3.5.1 脉冲式询问-应答无线电防相撞系统	131
3.5.2 异步式询问-应答无线电防相撞系统	134
3.6 地形跟踪雷达系统	137
3.7 地面成像雷达系统	141
3.7.1 全景地面成像雷达系统	141
3.7.2 合成孔径地面成像雷达系统	147
3.8 航空气象雷达系统	151
3.9 全自动无线电罗盘	154
3.10 采用关联函数方法测量航向速度和偏差角的无线电系统	159
3.11 地形匹配无线电导航系统	163
第4章 无线电探测与跟踪系统	168
4.1 引言	168
4.2 无线电识别系统	168
4.3 无线电拦截与瞄准系统	170
4.4 无线电制导系统	183
4.4.1 无线电照射制导系统	183
4.4.2 无线电自动制导系统	188
4.5 雷达预警和引导系统	190

第5章 无线电电子防御系统	193
5.1 引言	193
5.2 无线电电子侦察系统	193
5.3 电子干扰系统	203
5.3.1 主动式的电子干扰方法	203
5.3.2 发射假目标干扰信号的电子干扰系统	213
5.3.3 被动式的电子干扰方法	221
5.4 电子隐身系统	225
5.4.1 提高无线电系统隐身特性的基本方法	226
5.4.2 降低目标的雷达“可观测性”技术方法	228
5.5 无线电电子防御系统	231
5.5.1 采用空间选择方法的无线电电子防御系统	231
5.5.2 采用频率选择方法的无线电电子防御系统	234
5.5.3 采用时间选择方法的无线电电子防御系统	238
5.5.4 采用幅度选择方法的无线电电子防御系统	243
第6章 无线电着陆导航综合系统	250
6.1 引言	250
6.2 近距导航无线电系统	250
6.2.1 近距导航无线电系统的测距通道	251
6.2.2 近距导航无线电系统的测角(方位角)通道	256
6.3 小高度测量无线电系统	262
6.4 无线电着陆系统	266
6.4.1 无线电着陆系统的测距通道	268
6.4.2 无线电着陆系统的测角通道	270
参考文献	279

第1章 无线电信号

1.1 无线电信号的基本概念

“信号”这个单词来源于拉丁语 *signum* (符号),通常解释为信息的物质载体。正是由于这个原因,信息(传递具有涵义的消息)和信息载体(信号)一般被认为是彼此相互独立的客体。信息或许是非物质的(可以是虚拟的,假想出来的),而信号则总是物质的,它们或许是声音、温度(热度)、水压等。有两种情况可以发出无线电信号:

一是电流和带电子的电荷流经电阻 R 而出现的电流 I 或电压 U 。

二是电磁波。这种情况下,信号的物质载体是由一组相互关联的场强为 E 的电场和场强为 H 的磁场构成的电磁场。

因此,以电流(或电压)形式存在的无线电信号,通常在某个无线电设备中的电器仪表、电子管、晶体管等之间传播。而以电磁场形式存在的无线电信号,通常在特定介质中(对流层、电离层等)的空间传感器或各种无线电系统之间传播。

无线电信号的两种存在方式可以相互转换,其中的物理原理是:一是流经导体的交流电 I 可以引起导体周围空间的电磁场变化;二是电磁体磁场变化会对导体产生电磁感应,而使导体产生交流电。由于上述原因,电磁场和交流电的频率是一致的,这就保证了无线电信号的稳定性。

无线电信号随时间的变化,可以用各种解析函数的数学公式进行表示,并且还可以随意地进行函数变换,但进行函数变换时不总是可以用很规范的表达式进行表示,特别是在设计标准的无线电组件的时候。

为了解决这个问题,通常选择一个基本数学公式作为基准函数。选择基准函数通常依据一些技术性的因素(例如,是否便于产生特定形式的信号,是否可以将特定的信号放大后而其失真很小,信号的参数调制起来比较简单等)或者是一些便于理解的因素(例如,数学公式简单明了,数学运算简单方便,数学关系可以被完全解析等)。总之,通常选择那些常见的被称为谐波的正弦函数作为基准函数。

利用谐波作为基准函数的优点是,那些不是正弦波的无线电信号可以用线性的正弦复合函数进行表示。

基准函数还可以利用下列公式进行表示：

$$U(t) = U_m \sin(\omega_0 t + \varphi_0) \quad (1.1.1a)$$

$$I(t) = I_m \sin(\omega_0 t + \varphi_0) \quad (1.1.1b)$$

$$E(t) = E_m \sin(\omega_0 t + \varphi_0) \quad (1.1.2a)$$

$$H(t) = H_m \sin(\omega_0 t + \varphi_0) \quad (1.1.2b)$$

上述公式中的 $U(t)$ 、 $I(t)$ 、 $E(t)$ 、 $H(t)$ 是瞬时值, 其中: $U(t)$ 为瞬时电压强度, 单位是伏特(V); $I(t)$ 为瞬时电流强度, 单位是安培(A); $E(t)$ 为瞬时电场强度, 单位是伏特每米(V/m); $H(t)$ 为瞬时磁场强度, 单位是安培每米(A/m); U_m 为电压强度幅度值(最大值), 量纲是 V; I_m 为电流强度幅度值, 量纲是 A; E_m 为电场强度幅度值, 量纲是 V/m; H_m 为磁场强度幅度值, 量纲是 A/m; ω_0 为角频率, 单位是弧度每秒(rad/s); t 为当前瞬时时间, 单位是秒(s); φ_0 为初始相位, 单位是弧度(rad)或度($^\circ$), 弧度和度之间的换算关系约为: $1\text{rad} = 180/3.14^\circ \approx 57.3^\circ$; $1^\circ = 3.14/180 \approx 0.0174\text{rad}$ 。

需要注意的是, 尽管电流 $I(t)$ 和电压 $U(t)$ 具有不同的物理属性, 但它们彼此之间相互依存, 因此可以用相同的公式进行表示, 即如图 1.1.1 所示的函数表达式。同样, 电动扬声器的不同物理性质的电场 $E(t)$ 和磁场 $H(t)$, 也可以用相同的公式进行表示, 为了简化只使用如图 1.1.2 所示的函数表达式。补充一点就是, 电流频率与激发电流的电磁场频率相同, 对于研究无线电信号的基础函数特征来说, 可以只从一个函数表达式(1.1.1)入手。无线电信号基础函数图形如图 1.1.1 所示。

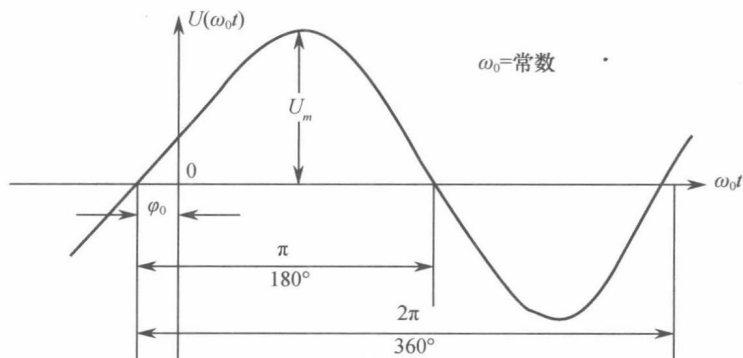


图 1.1.1 周期无线电信号基础函数图形 1

实际上, 经常会有无线电信号角频率 ω 与频率 f 不同的情况出现。频率的测量单位是 1Hz, 即 1s 振荡 1 次的频率记为 1Hz, 而 1s 与 1Hz 之间的转换关系是 $S^{-1} = \text{Hz}$, 数学公式是

$$f_0 = \frac{1}{T} \quad (1.1.3)$$

式中: T 为振荡周期(s)。

如果换算角频率 ω 与频率 f , 则

$$\omega_0 = 2\pi f_0 \quad (1.1.4)$$

式中: $\pi = 3.14$ 。基础函数在坐标系中的表现形式可能与图 1.1.1 不同, 而是如图 1.1.2 所示。这种情况下分析基础函数可以利用下列公式:

$$U(t) = U_m \sin(2\pi f_0 t + \varphi_0) \quad (1.1.5)$$

$$U(t) = U_m \sin\left(\frac{2\pi}{T}t + \varphi_0\right) \quad (1.1.6)$$

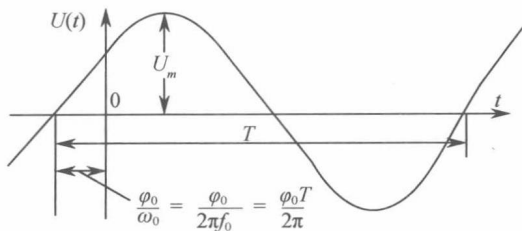


图 1.1.2 周期无线电信号基础函数图形 2

容易看出, 式(1.1.5)和式(1.1.6)可以表示成:

$$U(t) = U_m \sin\left[2\pi f_0 \left(t + \frac{\varphi_0}{2\pi f_0}\right)\right]$$

$$U(t) = U_m \sin\left[\frac{2\pi}{T} \left(t + \frac{\varphi_0}{2\pi}T\right)\right]$$

无线电理论中角频率与频率(后文中统一简称为频率)相关的一项非常重要的研究就是关于频谱的问题。

通常情况下, 无线电信号完整频谱被称为指定频率组成的无线电信号谐波调幅调制关系式。根据这个定义, 完整的频谱包含两个部分:

一是由各种频率为 f_0 的谐波成分组成的无线电信号, 这些谐波成分的初始相位 φ_0 曲线图(无线电信号相位频谱);

二是由各种频率为 f_0 的谐波成分组成的无线电信号, 这些谐波成分的幅度 U_m 曲线图(无线电信号幅度频谱)。

实际上经常使用到的频谱主要是幅度频谱, 而相位频谱的使用情况比较少, 因而幅度频谱通常被简称为频谱。

最初的时候, 人们通常会从两种物理特性对无线电信号开展研究, 一是无线电信号内部的电子特性, 二是无线电设备或无线电系统之间传播信号的空间电磁场特性。因此, 一说到频谱的概念, 就会联系到无线电信号的电子特性。

图 1.1.3 描述了低频和高频无线电信号及其频谱的基础函数形式。

如果从电磁场特性对无线电信号进行分析, 实际上就会衍生出一个使用更为广泛的概念——波长。

基础函数数学表达式中的无线电谐波信号波长 λ , 被称为谐波振荡一个周

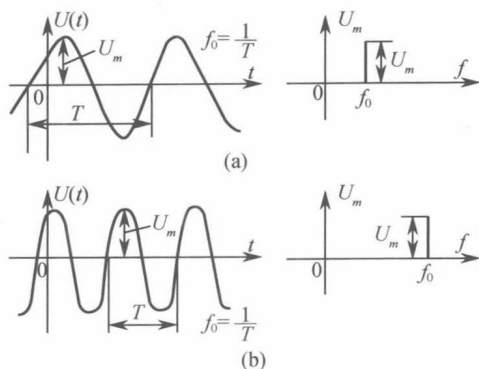


图 1.1.3 低频和高频无线电信号的基础函数波形及其信号频谱

期 T 内无线电信号传播的距离。波长 λ 和周期 T 之间的关系是

$$\lambda = CT \quad (1.1.7)$$

式中: C 为空间中无线电信号的传播速度。对于在地球大气层中传播的无线电信号来说, C 为 $299792.4562\text{km/s} \pm 0.2\text{m/s}$, 但实际计算时, C 取 300000km/s (无线电信波在真空中的传播速度)。

如果要对式(1.1.7)进行求解, 那么式(1.1.2a)可以改写成

$$E(l) = E_m \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda_0} l + \varphi_0\right) \quad (1.1.8)$$

式中: l 为当前无线电信号传播的距离 ($l = Ct$); λ_0 为无线电信号波长。

根据式(1.1.8)可以看出, 如果固定时间 t , 那么在无线电波的传播距离中场强 E 的分布情况, 如图 1.1.4 所示。

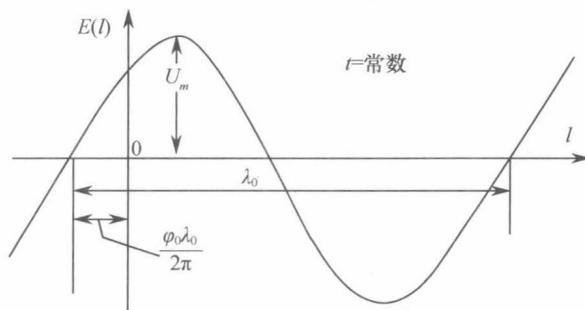


图 1.1.4 固定时间 t 时, 无线电基础函数谐波的空间波形图

谐波振荡 $E(l)$ 的初始相位是 $\frac{\lambda_0}{2\pi} \cdot \varphi_0$, 因此式(1.1.8)可以改写为

$$E(l) = E_m \sin\left[\frac{2\pi}{\lambda_0} \left(l + \frac{\lambda_0}{2\pi} \varphi_0\right)\right]$$

在空间中的固定点上, 谐波振荡 $E(t)$ 的函数特性如图 1.1.5 所示。

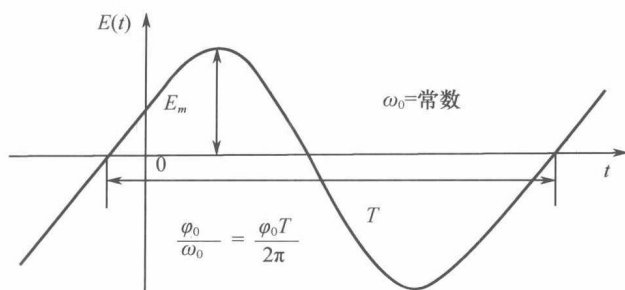


图 1.1.5 随时间变化的电场强度(基础函数谐波振荡信号的)特性曲线

同样,根据图 1.1.4 和图 1.1.5 的图解说明,式(1.1.2a)和(1.1.8)可以用于表示电场强度 E 的空间和时间变化特性。图 1.1.6 和图 1.1.7 可以描述固定时间 t 时,电流 I 和磁场强度 H 之间的关系曲线。可以注意到,这些关系曲线与如图 1.1.2 所示的 $U(t)$ 图形没有太大的不同,可作为另一种表示 $U(t)$ 的关系曲线。

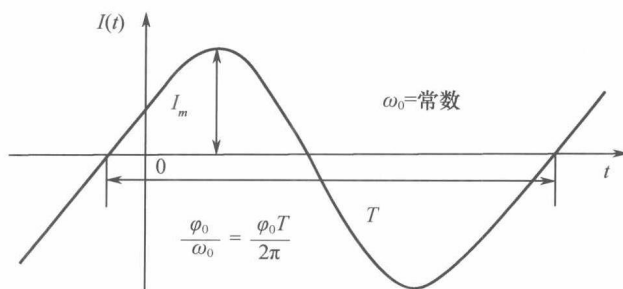


图 1.1.6 随时间变化的电流强度(基础函数谐波振荡信号的)特性曲线

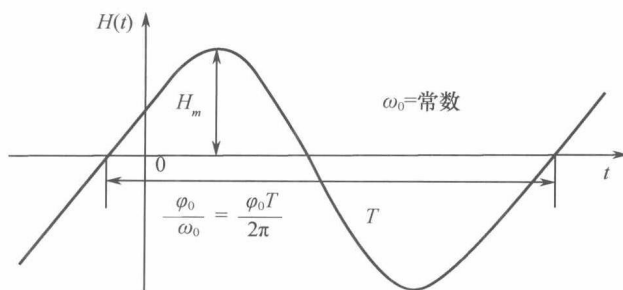


图 1.1.7 随时间变化的磁场强度(基础函数谐波振荡信号的)特性曲线

另外,将式(1.1.1b)、式(1.1.6)和式(1.1.8)进行转换之后,可以为某个基础函数的构成参数(时间、相位和幅度)提供不同的注解。

再回到前言中提到过的关于无线电信号分类的问题。

实际上诞生于 20 世纪初的那些航空无线电系统,至今仍然被允许使用,所以就造成了在大气层中会有各种波长的无线电波同时传播。因此,波长成为无

线电信号波段划分的一个重要原则。

现代无线电波和光波(用于测向)的波段划分,如表 1. 1. 1 所列。

表 1. 1. 1

下边界		波段名称	上边界	
f_0/Hz	λ_0/m		f_0/Hz	λ_0/m
3×10^{-3}	10^{11}	次声波	3×10^3	10^5
3×10^3	10^5	超长波	3×10^4	10^4
3×10^4 (30kHz)	10^4	长波	3×10^5	10^3
3×10^5 (300kHz)	10^3	中波	3×10^6	10^2
3×10^6 (3MHz)	10^2	短波	3×10^7	10
3×10^7 (30MHz)	10	超短波:米波	3×10^8	1
3×10^8 (300MHz)	1	超短波:分米波	3×10^9	10^{-1}
3×10^9 (3GHz)	10^{-1}	超短波:厘米波	3×10^{10}	10^{-2}
3×10^{10} (30GHz)	10^{-2}	超短波:毫米波	3×10^{11}	10^{-3}
3×10^{11} (300GHz)	10^{-3}	光波:红外光	4×10^{14}	7.5×10^{-7}
4×10^{14} (400THz)	7.5×10^{-7}	光波:可见光	7.5×10^{14}	4×10^{-7}
7.5×10^{14} (750THz)	4×10^{-7}	光波:紫外光	3×10^{15}	10^{-7}

对表 1. 1. 1 做出以下说明:

(1) 航空无线电系统中实际上没有使用波长长度超过 10^5m 和短于 10^{-5}m (如红外线波段)的波段,只是为了波段图谱的完整性而列出其他波段。

(2) 航空无线电系统中实际上集中使用超短波波段(波长从 $1 \sim 10\text{m}$),而处于厘米波和分米波段的电磁波有时会被称为特高频电磁波。

(3) 表 1. 1. 1 中附带的参数单位对应的参数值是:

$1\text{kHz} = 10^3\text{Hz}$; $1\text{MHz} = 10^6\text{Hz}$; $1\text{GHz} = 10^9\text{Hz}$; $1\text{THz} = 10^{12}\text{Hz}$ 。

1.2 无线电信号的传播

前文提到各种波长 λ_0 的无线电波通过各种方式在大气层(航空无线电系统

的主要工作空间)中传播,下面将深入研究这个问题。

简要说明一下无线电波在两个最有效的大气层空间(对流层和电离层)中的传播效应。

1.2.1 对流层对无线电信号传播的影响

最靠近地表的大气层最底层部分被称为对流层。在两极上空的对流层上限高度为 10km,在热带地区上空的对流层上限高度为 18km。对流层中有十分充沛的水蒸气(从海洋表面蒸发出来的),其质量占据整个大气层质量的大部分(大约 80%)。由于对流层内部的不均匀性(水蒸气凝结后从高空 h 处落下,改变了对流层内电介质的渗透性和折射系数 $n = \sqrt{\epsilon}$),进而导致无线电波在对流层中传播路径发生弯曲(折射)。

通常情况下,较厚的对流层表面折射梯度 $\frac{\partial n}{\partial h}$ 值是恒定值,取值 $4 \cdot 10^{-8} \text{ 1/m}$,因此无线电波以曲度半径 $R_{\text{КРИБ}} = \left(-\frac{\partial n}{\partial h} \right)^{-1}$ 开始向地面方向偏转(如图 1.2.1 中的线条 1)。对于标准的对流层来说, $R_{\text{КРИБ}}$ 等于 25 000km。由于折射增大了无线电台工作距离,同时也提高了无线电接收装置配置点处的电磁场强度。

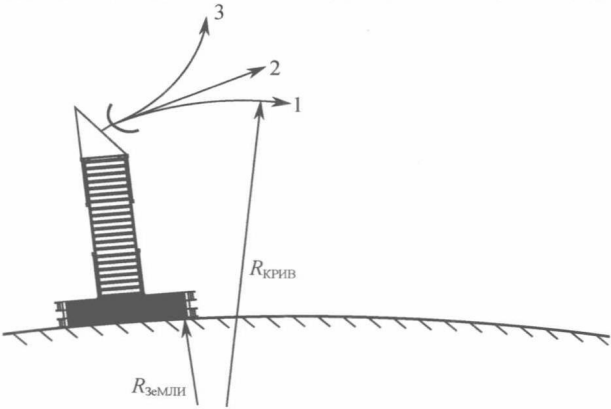


图 1.2.1 对流层中无线电波传播示意图

但是受各种气象因素影响,对流层会从标准状态转变成具有异常性质的状态,如果不同高度 h 的折射系数 n 不同,那么可能不会产生折射(如图 1.2.1 中的线条 2),而如果折射系数 n 随着高度 h 增强,那么无线电波传播路径会向地面凸起(如图 1.2.1 中的线条 3)。这两种情况实际上对航空无线电系统来说都是不利的,因为这两种情况会使接收端接收不到无线电信号或是无线电信号较弱。

最后,还有一种折射效应就是超折射(图 1.2.2)。这种情况下,由于某个折射角度弯曲较大,无线电波在对流层下层部分受到反射而反射回地表,并依次反