

冯锡生 田秀占 叶林云 编著

短波通信电路设计

国防工业出版社

73.452
650

短波通信电路设计

冯锡生 田秀占 叶林云 编著



国防工业出版社

9010154

内 容 简 介

本书较系统地介绍了短波通信电路的设计和计算方法。全书共分五章。主要包括：电离层概况，无线电波在中性介质和离子化介质中的传播，地波传播工程计算，短波天波传播通信电路设计，最后介绍了短波天波传播场强及可用频率的计算机计算方法。

本书可作为无线电技术、通信工程、电子学等专业师生的教学参考书，对于从事通信、遥测遥感、环境监测等专业的技术人员，特别是对从事短波通信工作的工程技术人员，是一本有用的参考书。

D024/26

短波通信电路设计

冯锡生 田秀占 叶林云 编著

*

国防工业出版社出版、发行

(北京市车公庄西路老虎庙七号)

新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印刷

*

787×1092 1/16 印张21 486千字

1990年12月第一版 1990年3月第一次印刷 印数：0,001—1,860册

ISBN7-118-00418-9/TN85 定价：10.70元

前 言

短波通信具有设备简单、成本低廉、灵活机动、通信距离远等优点，长期以来，一直是一种必不可少的通信方式。即使在微波、卫星、光纤等通信方式蓬勃发展的今天，人们仍然不断地对它进行研究，并取得了许多进展。自从1.5~30MHz短波频段用于几百公里到几千公里的长距离传输信息以来，短波通信电路的设计方法已有很大发展并正在逐步改进完善，其中包括短波传播条件的研究，地波传播特性，天波传播特性以及电离层的电特性研究等。编写本书的目的，旨在系统地介绍短波通信电路设计的基本内容和具体方法，供有关专业的师生和从事通信、遥测遥感、环境监测等专业技术人员以及从事短波通信电路设计的工程技术人员参考。

本书共分五章，第一章是短波传播的基础理论知识，主要介绍无线电波传播的基本理论和射频电磁波在电离中传播的理论——磁离子理论的主要内容及其结论。第二章介绍了短波传播的主要概念和短波通信的主要技术指标。第三章介绍了地表面波传播的基本理论分析及其场强值的工程计算方法。第四章介绍了天波传播短波通信电路的计算方法。本书第五章介绍了用计算机计算短波天波传播场强及可用频率的方法和程序。

非常感谢吴岩、曾建彪、刘学军、阎世铨等同志，他们为本书提供了短波通信电路实际计算结果，并给予了大力支持。

限于编者水平，书中难免有不妥和错误之处，恳请读者批评指正。

编 者

一九八八年五月

目 录

第一章 电离层中电磁波传播	1
§ 1.1 电离层结构	1
1.1.1 概述	1
1.1.2 有效电离层	1
§ 1.2 太阳黑子	3
§ 1.3 电离层的变化	4
1.3.1 电离层的规则变化	5
1.3.2 电离层的不规则变化	6
§ 1.4 电波传播的基本原理	8
1.4.1 麦克斯韦方程组	8
1.4.2 无损耗电介质中的平面波	9
1.4.3 坡印亭矢量	12
1.4.4 偏振和极化	14
1.4.5 反射和透射	16
1.4.6 波动方程的一般形式	19
1.4.7 色散关系和折射率	22
1.4.8 在各向异性介质中的传播	25
1.4.9 群速度和相速度	26
1.4.10 相路径和群路径	27
§ 1.5 磁离子理论	29
1.5.1 等离子体和冷等离子体	29
1.5.2 等离子体振荡	29
1.5.3 等离子体中的磁旋频率(或回旋频率)	30
1.5.4 离化介质的折射率	31
1.5.5 磁等离子体的折射率	32
1.5.6 无外磁场、无碰撞条件下离化介质中的波的传播	34
1.5.7 考虑外磁场、无碰撞条件下离化介质中波的传播	35
1.5.8 无外磁场、考虑碰撞情况下离化介质中波的传播	37
1.5.9 考虑外磁场和碰撞的情况下离化介质中波的传播	39
第二章 短波传播基本概念及技术特性	41
§ 2.1 短波传播基本形式	41
2.1.1 地波传播	41
2.1.2 天波传播	41
§ 2.2 天波传播路径	41
2.2.1 传播模式	44
2.2.2 多径传播	45
2.2.3 接收频率变化	47
§ 2.3 短波频带内无线电干扰	47
2.3.1 大气噪声	47
2.3.2 电子仪器所产生的噪声	54
2.3.3 宇宙噪声	54
2.3.4 通信信号场强	54

§ 2.4 衰落及接收点场强的统计分布	61
2.4.1 衰落	61
2.4.2 接收点场强的统计分布	63
§ 2.5 发射类型	63
2.5.1 无线电报发射类型	66
2.5.2 无线电话发射类型	68
2.5.3 总结	69
§ 2.6 工作模式	74
2.6.1 单工通信	74
2.6.2 双工通信	74
2.6.3 半双工通信	74
§ 2.7 发射功率	75
§ 2.8 PEP、平均功率与载波功率之间的关系	76
§ 2.9 其它技术条件	78
2.9.1 工作频率谐波	79
2.9.2 寄生频率	79
2.9.3 互调	79
2.9.4 所需信噪比	79
§ 2.10 分集接收方式	81
2.10.1 分集接收	81
2.10.2 时间分集	82
第三章 地波传播短波通路计算	83
§ 3.1 均匀特性地形上地波传播	83
3.1.1 地波场强计算	84
3.1.2 依赖于极化方式的地波衰落	91
§ 3.2 不规则地形地波传播	91
§ 3.3 非均匀地形上地波传播	92
3.3.1 Eckersley计算方法	92
3.3.2 Millington计算方法	93
§ 3.4 地波传播干扰	95
§ 3.5 地面上表面波的传播原理	97
第四章 天波传播通路计算	106
§ 4.1 引言	106
§ 4.2 天波传播基本概念	106
§ 4.3 天波传播可用工作频带的预测	111
4.3.1 可用工作频率的计算步骤	164
4.3.2 计算举例	166
§ 4.4 路径损耗和接收点场强的计算	180
4.4.1 短波系统损耗	180
4.4.2 短波通路计算步骤	188
§ 4.5 计算举例	192
第五章 短波电离层传播场强预测	212
§ 5.1 引言	212
§ 5.2 基本MUF 预测	213
5.2.1 利用虚高估算任何路径的跳数	213
5.2.2 E层临界频率 (f_oE) 的预测	214

5.2.3 E层基本MUF预测	215
5.2.4 E层截止频率(f_r)	215
5.2.5 F ₂ 层基本MUF预测	216
5.2.6 电路MUF和工作 MUF	218
§ 5.3 传播损耗的计算	219
5.3.1 自由空间基本传输损耗	219
5.3.2 电离层吸收损耗	219
5.3.3 地面反射损耗	220
5.3.4 频率高于基本MUF传播的损耗	220
5.3.5 其它损耗	221
§ 5.4 场强中值预测	221
§ 5.5 长距离传播场强预测	221
5.5.1 FTZ经验方法简介	221
5.5.2 路径长度在7000~9000km 时场强预测	223
§ 5.6 计算机程序框图说明	223
§ 5.7 计算机程序	260
§ 5.8 计算举例	324
参考文献	328

第一章 电离层中电磁波传播

§ 1.1 电离层结构

1.1.1 概 述

电离层是地球高空大气层的一部分，它从60km一直延伸到大约1000km的高度。整个电离层由相应的几个区域组成，分别称为D层、E层、F₁层和F₂层等。太阳辐射是大气电离的主要能源。当太阳辐射较强时，相应地各个电离层可以反射较高的频率（有时超过短波频带）。与此同时，短波发射机辐射能量受到的衰减也相应增加。由于各电离层受到太阳辐射的强度是不断变化的，因此，电波受到的衰减随一天中不同的时间、季节以及太阳黑子活动性的变化而不断变化，电离层所能反射的电波频率也相应变化。当频率接近于40MHz时，只有当电离层条件非常好时才能被电离层反射，并且这种情况极少出现，电离层几乎不能反射超过40MHz的频率。

地球表面大气层中的密度和压力随高度的增加而不断降低，温度也不断变化。如果地球表面的温度为288K(15°C)，高度为90km时，温度下降为166K(-107°C)，然后随高度增加温度又升高。在7000km高处时，温度为1812K(1519°C)。大气密度和压力的变化主要依赖于太阳的辐射强度。

电离层中的电离是由于X射线以及微粒子辐射所造成的。由于太阳的紫外线辐射以及高能微粒子辐射，大气分子部分游离，分裂为电子和正离子，形成由电子、正、负离子和中性分子、原子等组成的等离子体。由于电子的存在，使得大气层导电，同时，自由电子和离子又不断碰撞，复合成中性分子（或原子）。太阳升高时（天顶角减小），电离强度增加，自由电子和离子数增多，当太阳在最高点时，自由电子和离子数增至最大值，这时，电子和离子的中和低于电离。随着黑夜的降临，电离降低，但电子和离子的中和增加，因此，日落后形成了完全的中和状态。在高密度区即低高度区域，这种情况出现的更快。尽管在高层区域夜间电离降低，但高层区对夜间的短波传播起着重要作用。

1.1.2 有效电离层

一、D层

D层，距地球表面60~90km，是最低的电离层，最大电子浓度出现在大约80km高度处，半厚度（层的半厚度指电子浓度降为最大值一半的区域）大约为10km。日出时，出现D层，太阳达到最高点时，D层电离最强。随着电子和离子中和作用的增强，D层的电离作用逐渐减弱。日落时，D层消失。D层的离子并不能反射短波电波，但D层有助于较长波长的电波直至中波的远距离传输。短波穿透D层时，受到严重衰减，D层衰减远大于由于邻近E层和F层所引起的衰减。白天短波通信时，D层可以决定短波通信的范围、发射功率以及天线增益。根据卫星对电子密度的测量结果，白天经D层可以传

9010154

送 2~5MHz 频段的短波频率。

二、E 层

1. 正规 E 层

正规 E 层的高度大约为 90~130km 之间, 其电子浓度的最大值一般认为在 110km 处, 半厚度为 20~25km。在白天, 这些值基本保持不变。同 D 层一样, E 层也是在日出时开始电离, 正午达到最大值。然后, 电离作用逐渐降低。日落后, E 层基本上没有任何作用。通信中 E 层最重要的特性参数是 E 层临界频率 (临界频率指电波垂直投射电离层时所能反射回来的最高频率)。它不仅说明电离层最大电子浓度 N_{max} 的情况, 而且还方便地说明电离层对不同频率电波的反射情况。当工作频率大于临界频率时, 电波就会穿透 E 层而不在 E 层反射。经 E 层可以反射 1.5MHz 以上的短波频率。

2. 不规则 E 层

E_s 层被认为是不规则 E 层, 它的出现仅仅是偶然的, 没有一定的规律性。在垂直或斜投射的电离图上, E_s 层处在正规 E 层最大电离高度附近, 其特性是在它的临界频率上有少许或者没有延迟 (即不发生减速), 而且有可能产生遮蔽现象 (全反射) 或者半透明作用 (部分反射)。 E_s 层的临界频率有时很高 (斜投射下高于 75MHz)。这些现象对无线通信可能有利, 也可能有害。例如, E_s 层遮蔽现象可以终止经正规 E 层或 F_2 层实现的有规则的传播模式。当然, 在扩大可用频率范围以及减小偏倚吸收方面, E_s 层又是有益的。

三、F 层

F 层是短波电离层传播最重要的部分。F 层包括两部分: F_1 层和 F_2 层。 F_2 层是 F 层的主要部分, F_1 层只是在一定时间出现在 F 区下部的突出部分。

F_1 层的高度范围大约为 170~230km 之间, 其特性随季节和太阳黑子周期变化。在白天或电离层暴时, F_1 层对于短波通信是重要的, 其临界频率较高, 但因 M 因数较低, 结果由其乘积得到的最高可用频率大致和 E 层由相关值求出的最高频率相同。

F_2 层的高度大约为 225~450km, 半厚度约为 100~200km。 F_2 层的高度与一天中的时间和季节有关。冬季 F_2 层高度低, 而夏季其高度达到最大值。日落后, 由于电子浓度降低, 碰撞减少; 同时, 夜间时还有剩余微粒子辐射, 因此, 夜间时 F_2 层并不完全消失, 同样可以进行短波通信, 但所用频率低于白天时所用的工作频率。

图 1.1 给出了正午和午夜时电子浓度的典型分布曲线。从图中可以看出, 夜间时只有 F_2 层反射短波频率, 但此时 F_2 层的电子浓度比白天时 F_2 层的电子浓度低一个数量级。各层的电子浓度对可用工作频率起着很重要的作用。高电子浓度可以反射较高的频率; 而低电子浓度只能反射较低的工作频率。

电离层主要是由于太阳的辐射而形成的, 各层的电子浓度、高度等参数和通信的地理位置、季节, 以及太阳活动性等有密切

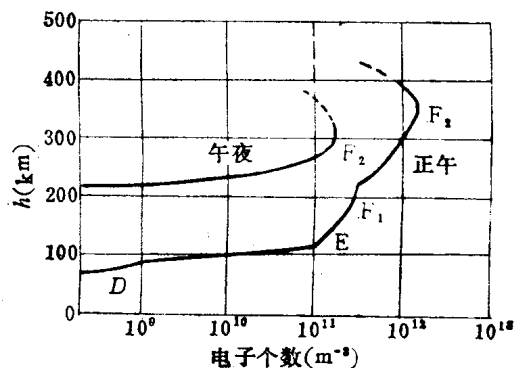


图 1.1 平静电离层状态的电子浓度以及层高度的典型值

的关系。表 1.1 列出了各电离层的分层状况和基本特点。

表1.1 电离层的分层状况及基本特点

电 离 层	D 层	E 层	F ₁ 层	F ₂ 层
区域范围(km)	60~90	90~150	150~200	200~500
最大电子浓度处的高度(km)	≈70	≈110	180~200	≈320
最大电子浓度 $N_{\max}$ (个/cm ³)	$10^3 \sim 10^4$	$10^3 \sim 10^5$	10^5	$10^5 \sim 10^6$
中性分子密度(个/cm ³)	$4 \times 10^{18} \sim 10^{15}$	$7 \times 10^{10} \sim 10^{13}$	$8.5 \times 10^9 \sim 10^{10}$	$2 \times 10^8 \sim 10^9$
大气成分	N ₂ , O ₂ , 少量NO	N ₂ , O, O ₂	O, N ₂ , O ₂	
电离成因	X射线和赖曼 α 射线的光电 离; 宇宙射线的 碰撞电离	X射线及紫 外线的光电离	$\lambda_0 = 200 \sim 800 \text{ \AA}$ 紫外线的光电离	
基本特点	夜间消失	电子浓度白 天大, 夜间小	F ₁ 层夜间消失, 常出现于夏季。 F ₂ 层电子浓度白天大, 夜间小, 冬季大, 夏季小	

§ 1.2 太 阳 黑 子

从前面的讨论可以知道, 太阳活动性对短波传播有着重要的影响。由于太阳黑子数与太阳活动性之间有着较好地统计关系, 因此人们常常以黑子数的多少作为“太阳活动”强弱的主要标志。

太阳黑子就是指太阳光球表面经常出现的黑斑或黑点 (约比光球表面温度6000 K低2000~3000 K, 因此呈亮度较暗的黑点), 成群、成双或单个的出现。黑子的大小和形状很不一样, 小黑子的直径只有1500 km, 而大黑子的直径可达十万千米以上。太阳黑子的寿命变化也很大, 一些黑子持续几天, 而少数黑子比太阳的四个或五个自转周期还长 (太阳自转周期大约为27天)。太阳黑子趋于群集, 一群黑子可包含几个孤立的黑子或许多黑子。

太阳黑子最明显的特征是具有约为11年重复出现的周期。黑子的强弱由式 (1-1) 给出的相对太阳黑子数 R 表示:

$$R = k(10g + s) \quad (1-1)$$

式中, g 是太阳黑子群数, s 是观测到的单个黑子数, k 是考虑设备和观察者特征的修正因子。

太阳黑子数的日变化是非常大的, 因此根据观测到的太阳黑子数求得月平均值, 然后确定12个月滑动平均值 $\bar{R}_{12}$ 。根据 $\bar{R}_{12}$ 的值可以确定可用工作频率以及设计短波通信电路。自从1749年以来, 人们就开始了电离层的观测。观测表明, 太阳黑子数呈现11年周期性的变化。对于太阳黑子最大值, 各个周期的持续时间从7年到17年变化, 太阳黑子最小值各周期的持续时间从8.5年到14年变化。多年的观测表明, 太阳黑子数 $\bar{R}_{12}$ 的年度最小值在0~10之间, 年度最大值在50~190之间。图 1.2 中给出了自从1830年到1977年出现的太阳黑子周期。图中最大值上面的数字表示所观测的周期数。

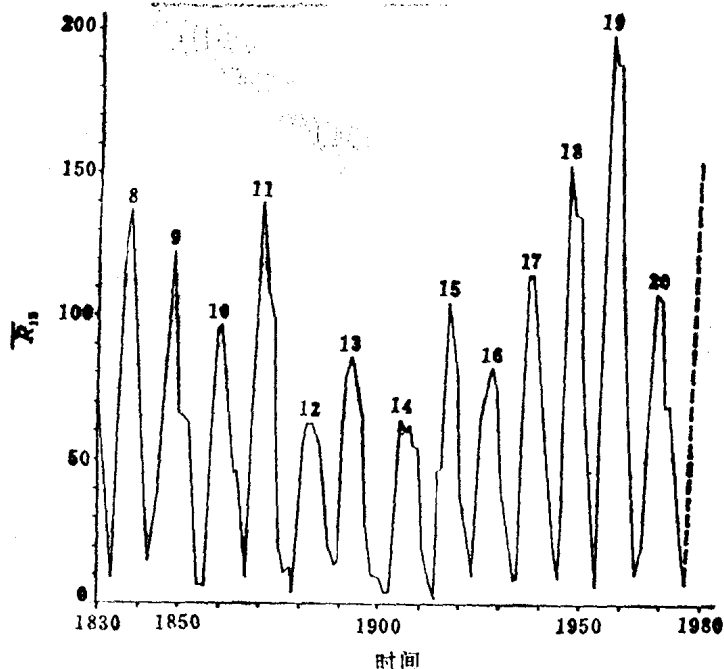


图1.2 1830~1977年太阳黑子周期

太阳黑子数对太阳的辐射性起着非常重要的作用。当太阳黑子数高时，紫外线和X射线辐射增加，D层、E层和F层电离也增加，使得短波穿透D层受到更大的衰减，E层和F层可以反射更高的短波频率。当太阳黑子数降低时，各层的电离也减弱。此时的电离层描述为平静状态。此时，短波频带较高的频率穿透电离层而不反射，通信电路的工作频率降低，总的可用工作频带限制在一很窄的频带内，增加了短波通信的相互干扰，同时，大气噪声的影响变得更为明显。

§ 1.3 电离层的变化

在天波传播过程中，电离层是一种主要的传播媒质，电离层的变化严重地影响天波传播的通信质量。为了进行可靠的短波通信，有必要对世界范围的电离层情况有所了解。探测电离层的方法有多种，如探空火箭、人造卫星和地面观测等手段。探测电离层的无线电技术有多种分类法，如可按脉冲与连续波的方法，或按固定频率与扫频的方法，也可按间断与连续的方法。常用的方法是地面观测法，即每隔15分钟或30分钟由地面观测站的电离层探测仪向高空垂直发射一组脉冲波，用以探测站址上空电离层的情况。电离层探测仪是0.25~30MHz宽频带的脉冲收发信机，该设备旨在直接测量无线电波脉冲往返电离层的时间 t 与频率的函数关系，即测电离层的虚高 h' ，其中

$$h' = \frac{1}{2} ct = 0.15 t \quad (1-2)$$

式(1-2)中， t 以 μs 为单位。用适当的电子装置或机械装置使收、发信机保持调谐，并将接收机的输出连同所需要的频率和时间(高度)标记一起显示在阴极射线示波器上。这些信号通常以窄的消隐脉冲的形式加入，它们每隔 $1/3$ 、 $2/3$ 或 $6 \frac{2}{3} \mu s$ (分别相

当于50、100和1000km)中断一次描述。此外,因为发射机的频率是变化的,所以整个描述可能在该频率通过每一兆赫(或0.1兆赫)时有短暂的中断。因而可用格状参考线来求任何频率的虚高。

探测电离层的另一种方法是,通过把无线电装置放在火箭上或卫星上送入太空来探测电离层。将地面观测站移到卫星上,有三个主要特点:

(1) 可用探针实地测量某些电离层参数,从而检验过去测得的无线电数据并加以改进。

(2) 可以从最大高度上获得无线电探测。

(3) 可对探测参数进行地理上的精细考查,达到用地面散射站从未有过的详细程度。

由于大气结构和电离源的随机变化,电离层是一种随机的时空变化的半导电媒质。电离层的特性和参数都是随时间而随机变化的。电离层的变化可以分为较规则的变化和随机的不规则的变化。

1.3.1 电离层的规则变化

电离层的规则变化主要是指电离层的临界频率和虚高有明显的日变化、季节变化和太阳11年周期的变化。图1.3是太阳活动最小年(1954年)和最大年(1957年)的冬季和夏季,在北半球某地上空电离层的临界频率(月中值)的日变化曲线。图1.4是中纬地区虚高 h' (月中值)的日变化曲线。

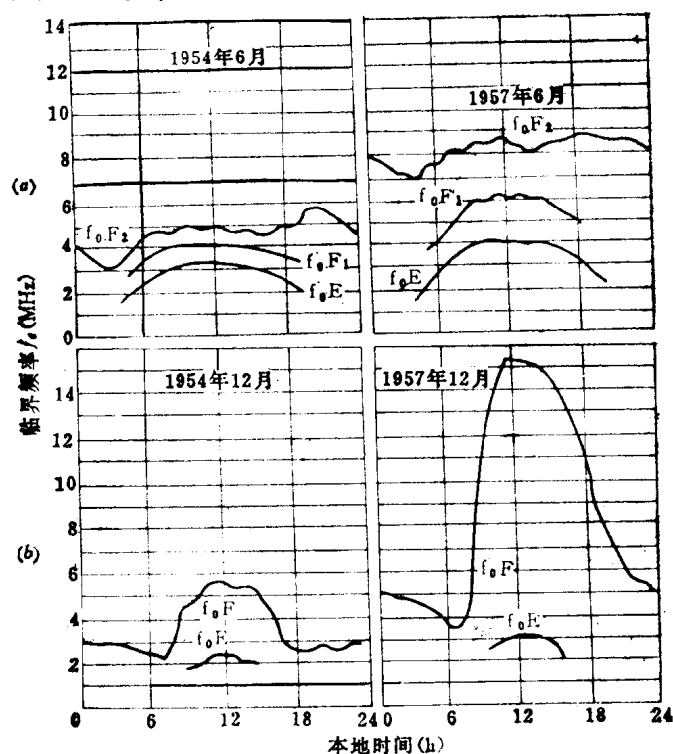


图1.3 太阳活动最小年(1954年)和最大年(1957年)电离层 f_0 (月中值)日变化曲线

(a) 夏季; (b) 冬季。

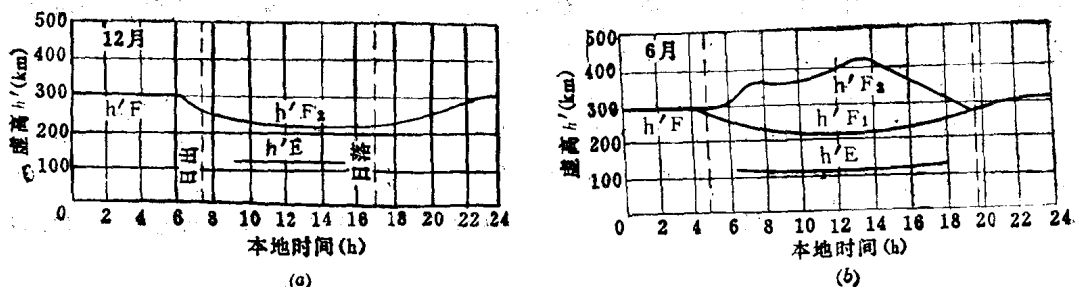


图1.4 中纬度地区虚高 h' (月中值) 的日变化曲线

(a) 冬季; (b) 夏季。

从图中可以看出:

电离层的日变化是指昼夜 24 小时 之内的变化情况。E 层和 F 层的临界频率大致为白天高、夜间低。E 层的虚高比较稳定, 约为 110km, 无显著的日变化。F₁ 层白天出现, 夜间消失。F₂ 层较为复杂。F₂ 层电子浓度白天高、夜间低。

电离层季节变化: E 区的高度随季节变化不大。F 区高度随季节变化较大, F₁ 区多出现在夏季白天, 冬季不如夏季显著, 有些地区冬季则完全不见。F₂ 区的高度为夏季高、冬季低; F₂ 层临界频率冬季高、夏季低。

由于太阳黑子有 11 年周期的变化, 因此电离层的特性随太阳黑子 11 年周期的变化。

1.3.2 电离层的不规则变化

在电离层的变化中, 有时还会出现一些电离状态随机的、非周期的、突发的急剧变化, 称为电离层不规则变化。

1. 电离层骚乱

太阳黑子区域常常发生的耀斑爆发对短波电波传播影响很大。太阳耀斑是出现在太阳黑子附近的一种光爆发。耀斑爆发时, 放出极强的 X 射线和紫外线辐射。X 射线穿透高空大气层一直到达 D 层, 使得 D 层区域的电子密度可比正常值大 10 倍以上, 如图 1.5 所示。此时短波的大部分甚至全部受到 D 层的强烈吸收, 造成短波通信中断。这种现象称为 Mögel-Dellinger 效应。由于引起 D 层电子浓度的增加往往是突然的, 因此也称这种现象为电离层突然骚乱, 它是太阳耀斑出现时产生的辐射线所致, 因此只发生在地球上的太阳照射区。图 1.6 给出了太阳耀斑对短波信号的干扰影响。

耀斑爆发时间很短, 一般不超过几分钟。太阳的 X 射线和紫外线辐射也不到几分钟就恢复正常。因此电离层骚乱也持续几分钟, 然后, D 层和 E 层电子浓度降低, 短波穿透 D 层的吸收减小, 即可恢复短波通信。但在个别情况下, 耀斑爆发持续时间较长, 电离层骚乱可以一直持续几十分钟甚至几个小时。

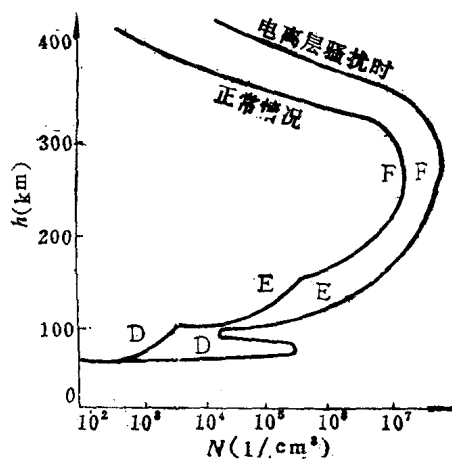


图1.5 电离层骚乱时电子密度增大

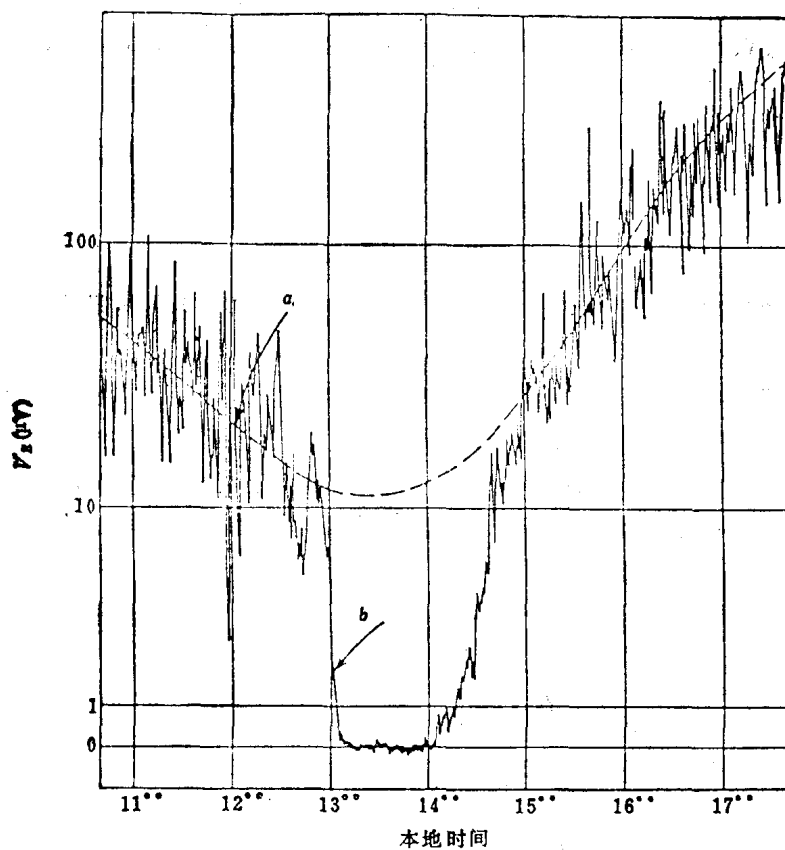


图1.6 太阳耀斑时对短波信号的干扰影响

图中, a 为接收机输入电压 V_R 的日变化; b 为由于Mögel-Dellinger效应引起的 V_R 的异常变化。

低纬度地区受到耀斑爆发增强的 X 射线和紫外线辐射的影响较大, 短波通信受到的影响也较严重。另一方面, 各次耀斑爆发的猛烈程度差别很大, 因而电离层骚乱的程度也各不相同, 较轻微的骚乱不会使短波通信中断。

2. 电离层暴

太阳耀斑爆发时, 除了电磁辐射 (主要是紫外线和 X 射线) 增强外, 还喷射出大量的带电微粒子流, 引起地球磁场的干扰。当带电粒子流接近地球时, 大部分被挡在地球磁层之外绕道而过。有一小部分穿过磁层顶, 到达磁层。当带电粒子流和地球磁场相互作用时, 使地球磁场产生变动。地磁场比较显著的变动称为地磁暴乱。出现磁暴时, 在极区伴随着出现北极光。出现这种干扰非常突然, 只需几秒钟便可遍及全球。一般几天后地球磁场才回到它的正常状态。

当带电粒子穿过磁层到达电离层时, 使电离层正常的电子分布产生激烈变动, 正常的电离层状态遭到破坏。这种电离层状态的异常变化称为电离层暴。出现电离层暴时, 自 F 层、 E 层至 D 层依次受到影响。其中 F_2 层表现最为明显, 有时出现 F_2 层临界频率急剧下降, 厚度扩展, 电子密度最大值下降, 最大电子密度所处高度上升。当 F_2 层临界频率降低时, 还可能使原来使用的较高频率的电波穿透 F_2 层而不被反射回地面, 造成通信中断。为了维持通信, 必须相应地降低通信频率。但是由于 D 层和 E 层同样受到电

离层暴的影响, 电波通过D层、E层时受到的短波损耗增加, 可用工作频率降低, 使损耗更大, 从而使接收端的信号减弱。猛烈的电离层暴可大大降低通信质量, 甚至使通信中断。

§ 1.4 电波传播的基本原理

1.4.1 麦克斯韦方程组

研究无线电波传播的最终目的是决定接收点的场强。解决这个问题的理论基础是麦克斯韦方程组。

麦克斯韦方程组描述了电磁场的基本特性, 给出了电磁场和它的源之间的关系。电磁场的源由电流密度矢量 J 和电荷密度 ρ 表征。电磁场中有四个场矢量, 它们是电场强度矢量 E 、磁场强度矢量 H 、电通量密度矢量 D 和磁通量密度矢量 B 。麦克斯韦方程组表明了电磁场中四个场矢量之间的关系, 以及四个场矢量和源之间的关系。

麦克斯韦方程组的积分形式是:

$$\oint H \cdot dl = \int_s \left(J + \frac{\partial D}{\partial t} \right) \cdot ds \quad (1-3)$$

$$\oint E \cdot dl = - \int_s \frac{\partial B}{\partial t} \cdot ds \quad (1-4)$$

$$\oint_s D \cdot ds = \int_V \rho dV \quad (1-5)$$

$$\oint_s B \cdot ds = 0 \quad (1-6)$$

方程 (1-3) 是从安培环路定律导出的麦克斯韦方程, 方程 (1-3) 表明电流是磁场的源, 时变电场可以感生磁场。

方程 (1-4) 是从法拉第电磁感应定律导出的麦克斯韦方程, 它表明时变磁场可以感生电场。

方程 (1-5) 是从电场中的高斯定律导出的麦克斯韦方程, 它表明电通量从电荷发出并终止于电荷上。

方程 (1-6) 是从磁场中的高斯定律导出的麦克斯韦方程, 它表明磁力线是封闭的。

以上方程组的微分形式是:

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (1-7)$$

$$\nabla \times E = - \frac{\partial B}{\partial t} \quad (1-8)$$

$$\nabla \cdot D = \rho \quad (1-9)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (1-10)$$

假设已知电流和电荷, 那么麦克斯韦方程组 (1-3)~(1-10) 等价于 8 个方程式, 但标量未知数却有 12 个。因此必须加上场量之间的其它关系式, 才能求解这些方程。这些附加关系式被称为结构关系, 它描述了电磁场与介质之间的关系, 它们是: 在一点的欧姆定律为

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (1-11)$$

连续性关系式为

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = -\frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (1-12)$$

$\mathbf{E}$ 和 $\mathbf{D}$ 间以及 $\mathbf{B}$ 和 $\mathbf{H}$ 间的关系式为

$$\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E} = \varepsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P} \quad (1-13)$$

$$\mathbf{H} = \mathbf{B} / \mu \quad (1-14)$$

在上述结构关系式中, σ 、 ε 和 μ 分别是介质的电导率、介电常数和磁导率, $\mathbf{P}$ 是极化矢量。在自由空间, 方程 (1-13) 和 (1-14) 有下面简单形式:

$$\mathbf{D} = \varepsilon_0 \mathbf{E} \quad \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H} \quad (1-15)$$

其中 ε_0 和 μ_0 是自由空间的介电常数和磁导率, 其值为

$$\varepsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} (\text{F/m})$$

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} (\text{H/m})$$

在自由空间的特殊情况下, 电流密度矢量 $\mathbf{J}$ 和电荷密度 ρ 为零, 于是麦克斯韦方程组有较简单的形式。方程组的积分形式是:

$$\oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \int_s \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \cdot d\mathbf{s} \quad (1-16)$$

$$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = - \int_s \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \cdot d\mathbf{s} \quad (1-17)$$

$$\oint \mathbf{D} \cdot d\mathbf{s} = 0 \quad (1-18)$$

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = 0 \quad (1-19)$$

方程组的微分形式是:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (1-20)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = - \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (1-21)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = 0 \quad (1-22)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (1-23)$$

另外, 如果假设电磁场随时间作简谐变化, 则麦克斯韦方程组可用另一特殊形式表示, 它们的微分形式为

$$\nabla \times \mathbf{H} = (\sigma + j\omega\varepsilon) \mathbf{E} \quad (1-24)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -j\omega\mu \mathbf{H} \quad (1-25)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (1-26)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (1-27)$$

1.4.2 无损耗电介质中的平面波

下面我们讨论电磁波传播的最简单情形, 也就是无损耗电介质中的线偏振平面波的情形。

平面波, 也叫主波、零序波或 TEM 波 (横电磁波), 它的基本特征是 $\mathbf{E}$ 和 $\mathbf{H}$ 都与传播方向相垂直。平面波理论适用于任何理想电介质。

所谓理想电介质,就是具有 $\sigma = 0$, $J = \sigma E = 0$ 特性以及各向同性的媒质,各向同性的无损耗电介质(非导电媒质)是一种理想电介质,自由空间也是一种理想电介质。所谓自由空间,严格说应指真空,但实际上是不可能获得这种条件的。自由空间是指充满均匀、无耗媒质的无限大空间,该空间具有各向同性、电导率 σ 为零, $\epsilon_r = 1$ 和 $\mu_r = 1$ 的特点。

1. 平面波和波动方程

平面波的基本特征是 E 和 H 位于同一平面上, E 和 H 处处互相垂直, E 和 H 都与波的传播方向相垂直。参看图 1.7 的右手坐标系,假设平面波沿 x 方向行进,那么电场 E 只有 y 方向上的分量 E_y ,磁场 H 只有 z 方向上的分量 H_z 。这样的波就称为 y 方向上的偏振波。

由于我们所讨论的媒质是无损耗电介质,因此,麦克斯韦方程组中的式(1-7)和式(1-8)可写为

$$\nabla \times H = \frac{\partial D}{\partial t} \quad (1-28)$$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (1-29)$$

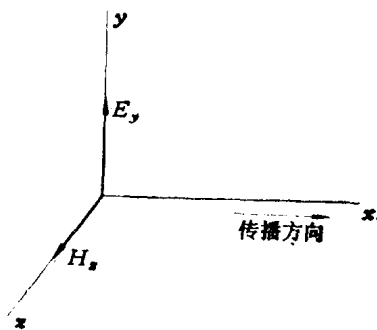


图1.7 平面波的场分量与坐标系的关系

或用直角坐标表示为

$$\begin{aligned} & i \left(\frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} \right) + j \left(\frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} \right) + k \left(\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} \right) \\ &= \frac{\partial}{\partial t} (iD_x + jD_y + kD_z) \end{aligned} \quad (1-30)$$

$$\begin{aligned} & i \left(\frac{\partial E_x}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z} \right) + j \left(\frac{\partial E_z}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial x} \right) + k \left(\frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y} \right) \\ &= -\frac{\partial}{\partial t} (iB_x + jB_y + kB_z) \end{aligned} \quad (1-31)$$

对沿 x 方向行进的平面波而言, $\frac{\partial}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial z} = 0$,式(1-30)中起作用的分量只有:

$$-j \frac{\partial H_z}{\partial x} = j \frac{\partial D_y}{\partial t} \quad (1-32)$$

所以有:

$$\frac{\partial H_z}{\partial x} = -\epsilon \frac{\partial E_y}{\partial t} \quad (1-33)$$

式(1-31)中起作用的分量只有:

$$k \frac{\partial E_y}{\partial x} = -k \frac{\partial B_z}{\partial t} \quad (1-34)$$

所以有:

$$\frac{\partial E_y}{\partial x} = -\mu \frac{\partial H_z}{\partial t} \quad (1-35)$$

利用式(1-33)和式(1-35)可求出:

$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} = \frac{1}{\mu \epsilon} \frac{\partial^2 E_y}{\partial t^2} \quad (1-36)$$