

短波通信线路 工程设计

[联邦德国] 盖哈德·布劳 著 魏 津 管叙涛 吴岫崢 译

短波通信线路工程设计

〔联邦德国〕 盖哈德·布劳 著

魏 津 管叙涛 吴岫崢 译

电子工业出版社

内 容 提 要

本书从实际使用出发,叙述 1.5 兆赫至 30 兆赫短波无线电通信线路的特点和设计。全书分为六章。第一章作概括性介绍;第二、三章叙述电离层的特点以及达到预定的信号质量所必须满足的技术条件;第四、五两章分别详述天波传播和地波传播两种短波通信方式的计算,并给出设计步骤和相应图表;最后一章对广泛用于发、收电台的天线做出性能对比。每章都列出了参考书目。

本书是近年出版的新著,为了充分达到实用和简化设计的目的,摘录了许多曲线图和数据表,并详细说明设计步骤。对于大多数军用、海关、外交、公安及公共通信和广播部门的短波工程人员来说,根据本书足以方便地完成短波通信线路的设计。对大学生和无线电业余爱好者也是很有价值的参考书。

Planning and Engineering of Shortwave Links

Gerhard Braun

Berlin 1982

短波通信线路工程设计

〔联邦德国〕 盖哈德·布劳 著

魏 津 管叙涛 吴岫崢 译

责任编辑 王昌喜

*

电子工业出版社出版(北京海淀区万寿路)

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

北京市密云县印刷厂印刷

*

开本: 787 × 1092 毫米 $1/16$ 印张: 13.875 字数: 320 千字

1987 年 9 月第一版 1987 年 9 月第一次印刷

印数: 1—2,500 册 定价: 2.95 元

统一书号: 15290·500

*

ISBN7—5053—0049—0/TN29

译 者 的 话

在电信方面，短波无线电通信居于主导地位的历史约有 50 年。近 20 年来因卫星通信、光纤通信的发展，短波无线电通信已不再占有昔日的皇位了，但其收发设备简单、成本低廉、装设方便等优点至今仍然没有较量的对手，因此在许多方面仍然占据着相当重要的地位。尤其当我国南极长城站利用短波越过半个地球向祖国发回考察喜讯时，又一次使短波通信引人注目。

短波通信技术的研究已经历了若干年，出版的著作也相当丰富，但却鲜有一本内容新颖、叙述简要、便于实用、令工程人员得心应手的书。本书是 1982 年出版，原文是德文，因它具有如下特点而迅速被译成英文、俄文和日文，在许多国家发行。

本书十分实用而不涉及过多的理论。只要凭藉书中的插图和数表就足以完成短波通信线路的设计。

本书提供的图、表、公式及代号均来自国际组织颁布的文献。因此，不仅结论的权威性是可信赖的，而且引用这些数据必然符合国际标准，不会出现和国家或国际标准抵触的问题。

本书中的计量单位采用国际单位制 (SI)，和我国法定计量单位完全一致。

本书每章均选列出主要的参考文献，没有代表性的文献不选列。读者可以循此线索深入研究，以补不足。

译者很乐意向国内有关人士介绍这一本篇幅不多却集中了较多特点和精萃的著作，相信读者研读之后定会得到裨益。

译者 1986·4

前 言

本书从实用角度论述 1.5 至 30MHz 频段短波通信线路的规划和设计。为了简化计算,节约时间,从广泛的文献摘录并且自行推算了若干曲线图和诸模图,可用来求出无线电传输路径的特性,其中重要的数据还归纳成表格。这些材料不仅包括传输路径上与技术手段无关的自然现象,还包括国际无线电咨询委员会 (CCIR) 有关传输质量和可靠性要求的建议和通告,以及排除干扰完成各种测量的有关建议和通告。至于在实现指定指标方面也很重要,发、收天线技术特性,本书单辟一章来论述,在那一章将提出选择适当天线的建议。

诚然,如果对发射信号在介质中的传播过程以及介质对信号质量和可靠性的影响有某些了解,对设计将会有所帮助。这里不去详细研究基本理论和介质的结构,只对了解这些过程提供充分资料。更多的资料可从大量的专门文献中找到,为此目的本书列出了参考文献。

相信本书的出版既适宜作为设计和推销工程师的参考书,也适宜作为工程技术人员的进修教程,他们都渴望自己对短波传播的基本知识得到更新。

盖哈德·布劳

1982年3月于慕尼黑

目 录

第1章 绪论	1
第2章 原理	3
2.1 传播类型	3
2.1.1 地波	3
2.1.2 天波	4
2.2 电离层的结构	4
2.2.1 电离层的结构	4
2.2.2 有用电离层	5
2.3 太阳黑子的影响	6
2.4 地磁场效应	11
2.5 衰落效应	12
2.5.1 干涉衰落 (选择性衰落)	13
2.5.2 极化衰落	13
2.5.3 吸收衰落	13
2.5.4 电离层反射衰落	13
2.5.5 接收点场强的统计分布	14
2.6 天波的传播路线	16
2.6.1 天波的传播路线	16
2.6.2 多径传播	20
2.7 多普勒效应引起的接收频率变化	22
2.8 0.5至30MHz频率范围的无线电干扰	23
2.8.1 大气噪声	23
2.8.2 电机和电气装置引起的干扰	28
2.8.3 宇宙 (银河系) 噪声	29
2.8.4 噪声场强	29
2.8.5 对所要求信号场强的设计值	30
2.9 短波频段	37
参考文献	44
第3章 短波通信线路的技术条件	45
3.1 发射类型	45
3.1.1 各种电报发射类型	46
3.1.2 无线电话发射类型	50
3.2 工作方式	54
3.2.1 单工	54
3.2.2 双工	55
3.2.3 半双工	56
3.3 无线电设备的频率稳定度	57
3.4 发射机的功率	59

3.4.1 高频载波功率	60
3.4.2 发射机的平均功率	60
3.4.3 峰包功率(平均峰值功率)	60
3.4.4 峰包功率、平均功率和载波功率间的关系	60
3.4.5 多路工作的功率分配	63
3.5 其他的条件	65
3.5.1 工作频率的谐波	66
3.5.2 寄生振荡频率	66
3.5.3 互调产物	66
3.5.4 带外辐射	67
3.5.5 要求的信噪比	69
3.6 分集方法	71
3.6.1 分集接收	71
3.6.2 时间分集方法	74
参考文献	74
第4章 天波传播的短波路径计算	75
4.1 大圆距离和方向	76
4.2 最佳辐射仰角的确定	77
4.3 可用频段的确定	81
4.3.1 计算步骤	83
4.3.2 设计举例	136
4.4 路径衰减和场强预期值的计算	143
4.4.1 短波系统的损耗	143
4.4.2 计算步骤	151
4.4.3 设计举例	153
4.5 天线数据概要	166
参考文献	168
第5章 地波传播的短波路径计算	170
5.1 均匀特性地面上的地波传播	170
5.1.1 地波场强的计算	171
5.1.2 地波衰减和极化的关系	179
5.2 不平坦地形上的地波传播	179
5.3 不均匀地形上的地波传播	180
5.3.1 艾克斯莱算法	180
5.3.2 米林顿算法	181
5.4 采用地波传播时的干扰	184
5.4.1 多径传播	184
5.4.2 其他发射机引起的干扰	184
5.4.3 大气干扰(或称天电干扰)	184
5.4.4 同一发射机的天波对地波的干扰	185
5.4.5 电机和电气装置引起的干扰	186
参考文献	187

第 6 章 短波天线	188
6.1 概述	188
6.1.1 极化	188
6.1.2 辐射方向图	188
6.1.3 增益	191
6.1.4 频率范围	191
6.1.5 失配 (驻波比)	193
6.1.6 允许的高频功率	195
6.2 适用于天波传播的天线	195
6.2.1 短距离通信线路	195
6.2.2 中距离通信线路	204
6.2.3 长距离通信线路	208
6.3 适用于地波传播的天线	212
6.4 接收天线	212
6.4.1 可选择极化的接收天线	213
6.4.2 有源接收天线	213
参考文献	214

第1章 绪 论

自从使用1.5至30MHz频段的高频电磁波在几公里直到很远距离的范围传送信息以来，这类无线电通信线路的设计方法已经得到发展并且仍在不断改进。其中包括传播条件的研究，天波和地波可能到达范围的研究；这里天波是由有用电离层和地面的反射而传播的，地波是由电性存在很多变动的地面传播的。对短波通信线路作细致的观测表明：使用的频率和这些频率的使用时刻对于在特定距离上实现无线电通信起着决定性的作用。

由电报、电话或短波广播传送消息必须满足可靠、质量和持续工作时间等等有关的特定要求，这些要求主要参照CCIR建议书。有时这些要求也以一些组织机构——例如民用或军用当局，以及国际气象预报业务、海事和航空业务、医药卫生业务和世界无线电广播等等组织机构——的“活页”或规范形式发表。为了满足这些特定技术要求，必须在虑及昼夜和季节的传播特点进行路径计算的基础上，对该无线电线路进行设计和配备。计算的结果才能使我们最后定下设备的设计，以及应该配备的发射机的功率，发、收天线的性能和接收机、调制和解调设备的质量。

短波业务使用的传播介质其特性不是不变的，这和电缆通信线路不同。后者传输线路的特性与时间无关，并能够相当精确地规定和复现。但在天波传播时，支配短波传播的条件总在不断地变化，结果导致接收信号的正负起伏。对这类通信线路进行设计时，必须弄清电波在电离层中的传播过程及其对无线电路径的影响，这对天波传播来说是十分重要的，在第2章有必要叙述这些影响。

要在可利用的频带内容纳大量的通信和广播业务，必须互不发生干扰。若要保持连续24小时工作，每个通信线路就必须有几个频率，这是很复杂的。更严格的技术要求是在无线电设备方面：比如频率准确度、发射机的寄生辐射和谐波的抑制制度，对接收机来说，除选择性、灵敏度外，因为短波频段极端拥挤所以还要求调谐准确度。接收机拾取了大气噪声和宇宙噪声这一类不可控制的干扰会对传输质量产生严重的损害。地球表面的大气噪声强度分布并不是均匀的，热带地区最强，越向两极越小。第2章给出了大气噪声强度的分布示意图。就线路设计所需，我们从CCIR322通告中（摘要）复制了天线噪声系数和大气噪声的函数关系，并根据CCIR285-2通告推算出各地区出现的工业干扰。民用业务短波通信线路的工作频率是由各国邮电管理局分配的，他们再将分配的频率转报给国际电信联盟（UIT）的国际频率登记委员会（IFRB）。国际电信联盟中心卡片室在登记这些频率之前要对这些频率相互干扰或受到其他业务干扰的可能性进行审定，而后把已登记的频率按无线电业务来分配。例如，不允许固定电台工作在航空和海事的无线电频段。本书还引用了“无线电规则（1976年日内瓦）”中的频率分配文件，作为短波通信线路规划的基本文件，它是不可缺少的。

第3章介绍采用各种发射类型时，电报和电话信息传输质量的技术要求。这些技术条件是根据CCIR的有关建议书，其中包括了商业性或非商业性业务的数据。

第3章还谈到了CCIR关于调制和解调中出现不希望有的频率的建议，这些频率对其他无线电业务会引起干扰并且使传输可靠性和信号质量变坏。分集技术对于降低电报和数据传输中的这种错误频率能起重要的作用，这一点也要在第3章叙述。

计算以天波形式传播的短波路径,第一步是求最佳工作频率。其计算步骤和 CCIR 340-1 通告公布的“电离层特性图集”都在第 4 章介绍。这些内容都根据对那些在短波传播中起重要作用的电离层的观测。这些观测是利用遍布全球的专门装备的电台经过许多年工作才完成的;有些观测是用卫星作出的。短波通信线路特性的计算,特别是路径衰减的计算,是根据戴维斯(K. Davies)在“电离层无线电传播”(美国商务部国家标准局专题论文,80)一文中叙述的方法。它考虑了影响天波的所有因素,诸如自由空间衰减,电离层的吸收损耗,地面反射损耗,衰落效应的余量,大气和工业噪声等级。这些计算存在一个准确度问题。我们从第 2 章和第 4 章得知,天波受到不断变动的传播条件影响,如果在计算时刻,这些条件能准确地确定,就能够正确地确定路径条件。但如把另外一个时刻的计算值错误地当作这一时刻的数值,就会导致错误的结果。所以,只有把天波起伏事件的统计分布和起伏出现的频数作为基本条件,才可能正确地论述传输条件随时间而变的路径特性。长期观测表明,接收点的场强服从瑞利分布。根据介绍的步骤进行路径计算,则达到或超过指定接收场强的时间占 50%。若能适当提高衰落余量,则可得出在 90% 的时间里场强分布等于或超过指定的概率值。只有对短波通信线路进行长时间的观测才能证明路径计算值和实际达到值是一致的。短波通信线路的观测,只应在频率计算时得到的频率上或者据此计算而分配的频率上进行,而且使用的频率和使用这些频率的时间必须不变。仅由一次或几次路径观测,而要对某一通信线路作出评价是很不充分的。

第 5 章对地波传播的短波通信线路(包括几种主要土壤类型的传播)的计算作了详细叙述,并且采用了曲线图加以说明。因此事实上,这几种传播类型以及出现与此相似的传播类型的所有线路规划课题都能得到解决。经常会遇到包含几种不同电性的地表的通信线路,例如海上通信路径的计算要估计岛屿的存在,本书叙述了这类通信路径详细而完善的计算方法。如果这里也要考虑到路径计算的准确度,那么必须估计到土壤特性的可能变化。我们只能假定海面和大沙漠地区的传播条件长期不变,也只有对这类通信路径,可以指望计算结果和实际通信线路的工作情况能够很好地符合。某些类型地面的电性参数受气候的影响,考虑到长期影响会使与计算值有相当大的偏差。但如用可能发生的最不利土壤条件去计算,误差会保持在按正常条件下和最不利条件下的土壤电性参数两次计算值之间。热带地区雨季和旱季的计算就是典型的例子。这种交替计算方法已考虑到路径参数的变化,并由此得出与设备设计有关的数据。

在路径计算中涉及到对无线电设备的要求及发、收天线的类型和电性参数。本书旨在概括说明短波天线的理论,并从销售和使用两方面介绍各种类型短波天线。为此,第 6 章将介绍少数几种短波最常用的天线,它们的辐射图可以和满足最短距离要求而计算出来的辐射图相比拟。于是在规划短波路径时,按照无线电路径长度或服务范围的大小来选择天线,就变得很容易了,并且最佳工作频率的选择也很方便了。第 6 章只介绍少数几种天线并不意味着限制天线的选型。天线的尺寸、架设时间、占用空间、搬运可能性以及诸如此类的要求,在短波装备中,和天线电特性一样,都可能是决定性因素。时常会碰到,上述这些条件对于按照路径计算来构成电台反而成了障碍,在这种情况下,为了不不断地工作,可对设备作欠额设计。遇到这种情况,规划路径时明智的办法是在某一些时间里(例如在 24 小时之内的某个时间段)建立良好的通信,并且在工作的時候,也不能指望满足特定的质量要求。

第2章 原 理

众所周知,无线电通信使用 $1.5\sim 30\text{MHz}$ 的短波频段 已经有几十年了。当初,一般电报是采用莫尔斯电码以比较小的发射功率利用天波传送很远距离。不太久之前才实现了电话传送(以及用单边带技术同时传送许多话路)和全球的无线电广播。当然,一个话路也可用作多个报路。实际证明,在特定短波频段,使用地波可以进行良好的无线电通信。直到有了海底电缆和六十年代初出现卫星通讯(以及某些区域有国际无线电接力线路)之前,短波是所有国际和洲际电气通信的唯一手段。几乎所有国家的邮电局都装备了相当多的发射台和接收台,多数情况下是根据时间表进行联系,而时间表是按照所管理的总通讯业务量制定的。此外,其它通讯业务,诸如海事和航空无线电通信、天气预报、以及邮电局的若干附属业务、国家机关和私人机构,也采用短波交换信息。军事通讯代表了另一类应用领域,在这个领域中主要是以小发射功率和简单的天线确保短距离或中等距离的可靠通讯。此类便携式或车载式无线电设备仅使用一个话路或报路。另一类使用短波的非邮电业务是以使用电传线路为主的外交业务。

短波通信线路的设计,要求对每条无线电路径的路径长度作细致考虑,还要对其地理位置作周密计算。这是因为某个长度为 1000 公里的路径,在北半球和在南半球经受的传播条件是十分不同的,甚至在赤道南北 $\pm 20^\circ$ 的热带地区差异也很大。一天中的时刻不同和季节差异以致最佳可用工作频率也不一样,地球表面上大气噪声等级也有差别,如要保证良好地通信就要求发射功率与之相应。但特别重要的是无线电传播路径沿途介质的状态:地波传播时土壤的电性,天波传播时电离层特性,它们都与时间有很大关系。

2.1 传 播 类 型

$1.5\sim 30\text{MHz}$ 频段的无线电频率在地球表面传播即为地波,被电离层和地面反射而传播即为天波。两种传播类型各具有特定的距离范围和频率范围。在此范围内,如使用适当的技术设备,就能得到良好的信息传输。两种传播类型的特点将在下面叙述,影响短波传播的各种现象也将涉及。

2.1.1 地 波

1.5 到约 5MHz 频段的无线电频率使用地波进行通信。这一频段也称为无线电话频段。其覆盖距离很大程度上取决于传播过程中有关介质(陆地还是水面等等)的电性。辐射垂直极化场的天线特别适用于地波传播。由于在地波接收中存在着干扰——诸如来自另外发射机的频率干扰,由电气装置和电机引起的干扰,以及收到同一发射源辐射的天波引起的干扰等等。当接收地波使用的场强相当于该发射类型在接收天波使用的最小场强时,这些干扰是不容忽视的(见2.8节)。有关地波在不同介质中的传播将在第5章详述。

2.1.2 天 波

一般说来,对短波线路而言,天波比地波更重要。因为天波不仅可以跨越很远距离和越过复杂的地形,而且可以在非常近的距离上设立无线电路,但在这么近的距离上地波却不起作用。在作天波短波线路设计时,必须对每条线路的可用频率按一天中的时刻、一年中的季节和太阳黑子活动性作出计算。用这个频率去确定发射机功率和天线增益以便达到计算所要求的场强(见第4章)。CCIR建议中引用的各种发射类型的最小场强(见第3章)是参照了地球上通用的不同大气干扰等级和电离层传播出现的起伏制定的。这些场强值可以作为天波线路设计的依据。

电离层构成的传输路径其特性在任何时候都是变化的。就整体来说,传输条件的变化完全是不规则的。所以,使用天波的短波线路质量只能由大量的无线电路径的统计分析中得出。线路质量的估计值是在一个比较长的时间内,考虑到日期和季节传输条件的所有变化、以及考虑到太阳黑子活跃性的影响而作出的。事实上,这些研究工作已经进行了许多年,并且某些结果都已公布。

2.2 电离层的结构

2.2.1 电离层的结构

电离层由围绕地球的几个导电层组成。来自太阳的辐射是这些导电层电离及其强弱变化的主要原因。太阳辐射增强使得各层的反射能力增强,以致能将电波反射再回到地面(在极端情况下,甚至能够反射短波频段以外的电波)。但与此同时,对无线电发射机发射能量的衰减也变大了。由于太阳辐射是不规则的,所以各电离层也不是固定不变的,随一天中的时刻、季节和太阳黑子活跃性而有很大的变化,故发射频率的传输可能性也相应的有所改变。由于超过40MHz以上的频率只可能在最有利的条件下被电离层反射,这是难得发生的,故高于短波段的频率不能经常指望用天波传输。更高频率的传输则完全不可能。

地球的大气层伸展到很高的高度,随高度的增加其密度和气压都连续地减小,温度也有很大变化。这些数值都与太阳辐射有关并且随时间而变,因此不宜作为电离层特性计算的依据。为此设想出“大气模型”用来反映大气层的平均状况,并据此研究电离层的结构和得出电波传输特性。1959年制定的ARDC模型是采用较多的模型^[1]。图2.1表示这个模型中大气压力和密度分布与高度的关系。温度也随高度变化,如果我们把地面温度288K(15°C)作为起点,则在90千米高度处温度降到166K(-107°C),此后温度逐渐上升。当高度为700千米时,温度达1812K(1519°C)。温度的变化本质上完全受一天中太阳辐射强度变化的支配。上部大气层的化学成分也随高度增加而改变。

我们关心的是X射线和粒子辐射引起的各层电离状况。由于紫外线照射,空气分子分离成电子和正离子。电子引起大气层的导电性,但电子不断地和离子发生碰撞,互相中和(即复合)。随着太阳升得更高(即太阳天顶角减小),电离强度增加,自由电子和离子数目都持续地增加。当太阳升到最高位置时达到最大值。从日出直到正午这段时间里,电离超过复合。此后随太阳的降落,电离渐弱而复合增加,日落之后再次恢复到完全中性状态。上述过程在

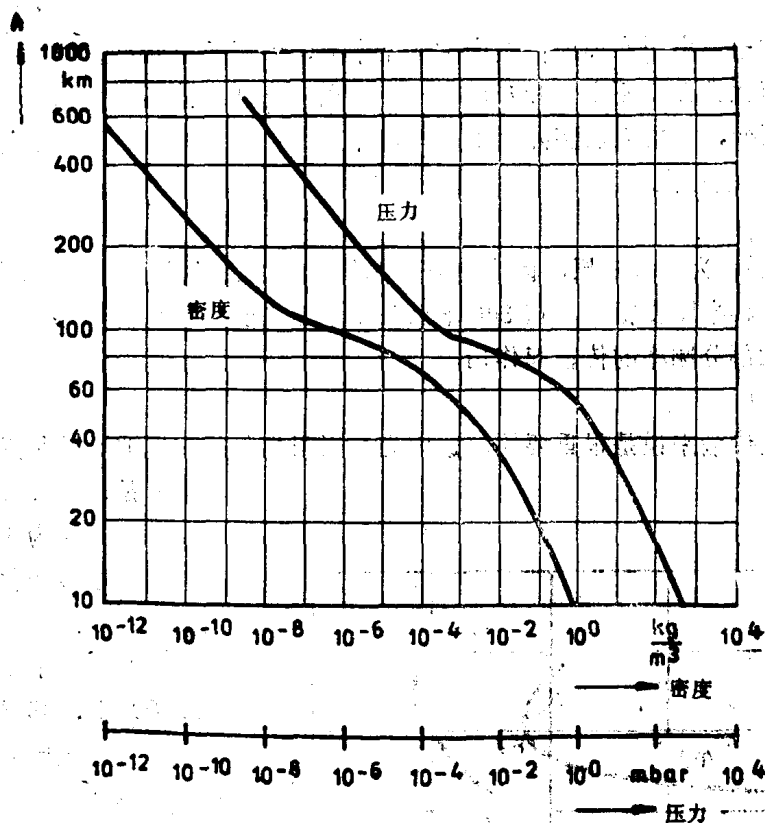


图2.1 根据1959年的ARDC模型绘出上部大气层的空气密度和压力的分布

密度较高的地方亦即低高度上发生得更快些。而在比较大的高度上，白天电离快于复合而产生各个电离层，夜间虽然电离大大减少，但在比较大的高度上各电离层对短波的传输实际上仍然起作用。

在电离层中各层对短波传播的影响不同，亦即，对高频能量辐射衰减和对最佳可用工作频率的衰减明显不同。

2.2.2 有用电离层

下面我们将叙述电离层的结构和各电离层起作用的方式。这对短波传播来说是很重要的。

D层

D层的地面高度为60至90千米，是电离层中的最低层。约在80千米处电子浓度最大，其半厚度（指电子浓度降低到最大值一半处的厚度）约为10千米。D层在日出后出现，当太阳位置最高时其电离达到最强。此后，随着复合越来越强，该层逐渐变坏而在日落之后消失。D层的离子浓度不足以反射短波^{[2][7]}，但却有利于中波范围以下较长的电波作远距离传输。短波可以穿透D层但会有严重的衰减，此衰减比相邻的E层和F层要大得多。为使短波良好地传播，日间存在的D层是确定电波达到的范围、发射功率和天线增益时必不可少的因素。根据最近的研究^[6]，只要在日间向D层发送2~5MHz频段短波，就能用卫星测量其电子浓度。远达1000千米距离的试验证明，衰减的测量值和计算值是相当吻合的。

E层

E层的最大电离出现在地面高度为110千米处,该层的半厚度为20~25千米^{[3][7]}。在日间,上述数值大致保持不变。和D层一样,电离也是从日出时开始到中午前后达到最大,此后该层逐渐衰变,日落之后实际上不起任何作用。在开始电离后的上午时间内,E层可反射1.5MHz以上的频率。

Es层

Es层有时被称为分散E层,因为它只是偶然发生的,约位于120千米的地面高度上。与其他各层相比,其半厚度很小,在300米至几千米之内变化^[8]。但因离子浓度很高,能对短波频段以上的大部分频率的传输起作用。

F层

F层对短波传输来说是很重要的,这因为F层很高,能使电波跨越很远距离。F层的第一部分是F1层,F1层只在白天存在,地面高度为170至220千米。其高度和季节变化及某时刻的太阳位置有关。

F2层位于地面高度225至450千米上,其半厚度为100至200千米。该层的高度与一天中的时刻和季节有关。同样在日间,冬季高度最低,夏季高度最高。F2层在日落之后不完全消失,残余电离仍然存在的原因在于电子浓度低,故此复合减慢,以及黑暗之后数小时仍然有粒子辐射。夜间,残余电离仍允许传输短波段,能够传输的频率比日间可用频率还要低许多。

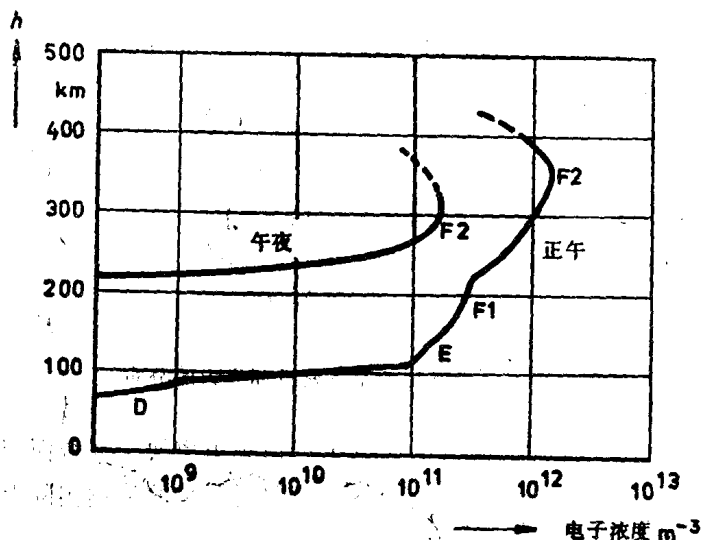


图2.2 平静的电离层高度和电子浓度的典型值

图2.2表示中午和午夜电子浓度的典型分布。从中可以清楚地看出,在太阳辐射的影响下产生各个电离层。夜间,只有F2层维持着短波传播,但此时该层的电子浓度已下降了一个数量级。对可用工作频率来说,各层的电子浓度是至关重要的,较高的工作频率要由电子浓度高的电离层来反射,如果电离层的电子浓度比较低,同样的频率就穿透了。

可用频率要按照一天中的时刻、季节和太阳黑子活跃性的关系来确定,这将在第四章中叙述。

2.3 太阳黑子的影响

如前所述,太阳黑子对上部大气层的电离强度的影响极大,并由此影响到短波传播的可能性^{[1][9]}。关于太阳黑子数的定量方法,现在仍然使用沃耳夫(Wolf)一百多年前发明的苏黎世太阳黑子数(简称ZSN或称沃耳夫数),常以R表示。此数值由苏黎世天文台按月

公布，也可用如下公式计算：

$$R = k(10g + s) \quad (2.1)$$

式中 g 是太阳黑子群的数目，

s 是单个黑子的数目，

k 是修正系数，与观测设备的性能有关。每天的太阳黑子数目也易产生急剧的变动。为此，要根据已测得的太阳黑子数得出按月的平均值。十二个月的变动平均值 $\bar{R}_{12}$ 是按下述方法求得的：欲求未知某个月的平均值，应根据以往六个月的测量平均以及根据未来六个月的预期平均来求得。在作短波线路设计时和求取可用工作频率时有了 $\bar{R}_{12}$ 就完全够用了。太阳黑子的观测自从 1749 年以来持续进行以及采用沃耳夫的上溯法求得的 R 值，都显示了太阳黑子的最大和最小值出现的平均周期是 11 年。最大值的周期是 7 年至 17 年，最小值的周期在 8.5 年到 14 年之间变化。所以，太阳黑子的数目有增加和减少，但最大值和最小值不呈现对称的关系。多年观测表明，每年的 $\bar{R}_{12}$ 的最小值在 0 至 10 之间，最大值在 50 至 190 之间^[1]。图 2.3 表示 1830 年到 1977 年出现的太阳黑子周期，其中 $\bar{R}_{12}$ 变动平均值是按日期绘出的。图中最大值上边标出的数字是已观测到的总循环次数。太阳辐射活跃性与太阳黑子的数目有很大关系，如果太阳黑子的数目多，则紫外线和 X 射线也强，因之 D 层、E 层和 F 层电离也就强。由于这个原因，随着太阳黑子数目的增多，短波在 D 层中衰减增大，而 E 层和 F 层将能反射更高的短波频率。图 2.4 表示 E 层、F1 层和 F2 层的临界频率与太阳黑子变

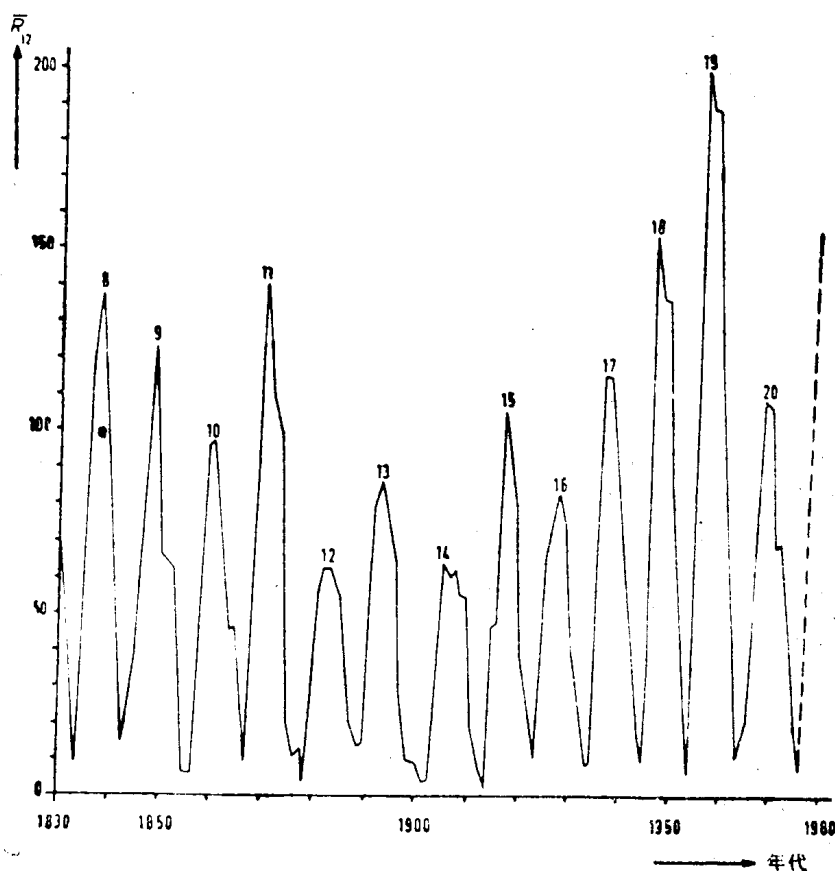


图2.3 1830年以来太阳黑子循环

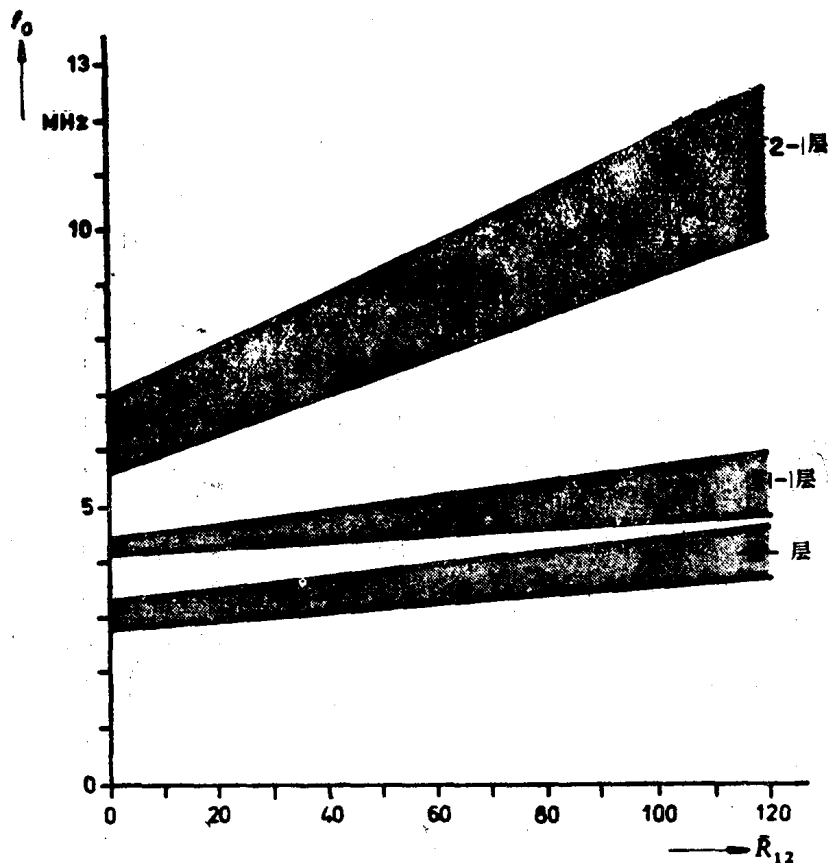


图2.4 临界频率 f_0 的变化与太阳黑子数 $\overline{R_{12}}$ 的关系

动平均值 $\overline{R_{12}}$ 的关系 (临界频率 f_0 是垂直入射电离层时所能反射的最高频率)。为了进一步搞清临界频率和地点的关系, 在华盛顿 (美国)、万卡约 (秘鲁)、温多腊 (澳大利亚) 的正午时刻测量的全部结果得到一个频带, 将其绘成图 2.4。这些测量站位于北半球或南半球的温带和位于回归线上。有关 f_0 的测量结果在参考文献〔4〕的 5.5 节有详细叙述。

当太阳的黑子数少时, 各电离层的电离不太强但比较稳定, 则我们就说电离层是平静的, 比较高的频率能够穿透而不再反射, 于是, 无线电只能在相对比较低的频率上工作。整个可用频段有严格的限制, 而且许多短波线路的工作频率被挤在减小了的频段之内。这样, 相互干扰的危险增加了。再者, 因为随着频率降低, 大气噪声的场强增加 (见 2.8.4 节), 大气噪声的影响变大了。

随着太阳黑子数目增加, D 层、E 层和 F 层的电离变得更强。于是可采用更高的频率以减小大气干扰的影响。然而 D 层的衰减也急剧增加, 所以太阳黑子较多时, 可望得到的场强必然更小。经常发生的太阳耀斑, 伴随着产生很强的 X 线辐射。X 线穿透了上部电离层直到 D 层, 使电离增强到几乎所有无线电波都被吸收了。这种现象称为穆格尔-戴灵格 (Mögel-Dellinger) 效应, 能使所有短波的无线电通讯中断几分钟至 1 小时。图 2.5 表示这种典型现象对近距离无线电线路影响的记录。开始, 接收机输入电压在数分钟内降到 $0\mu\text{V}$, 一小时后电压开始慢慢上升, 这表明 D 层电离逐渐复合。再过一小时, 接收机输入电压恢复到常规

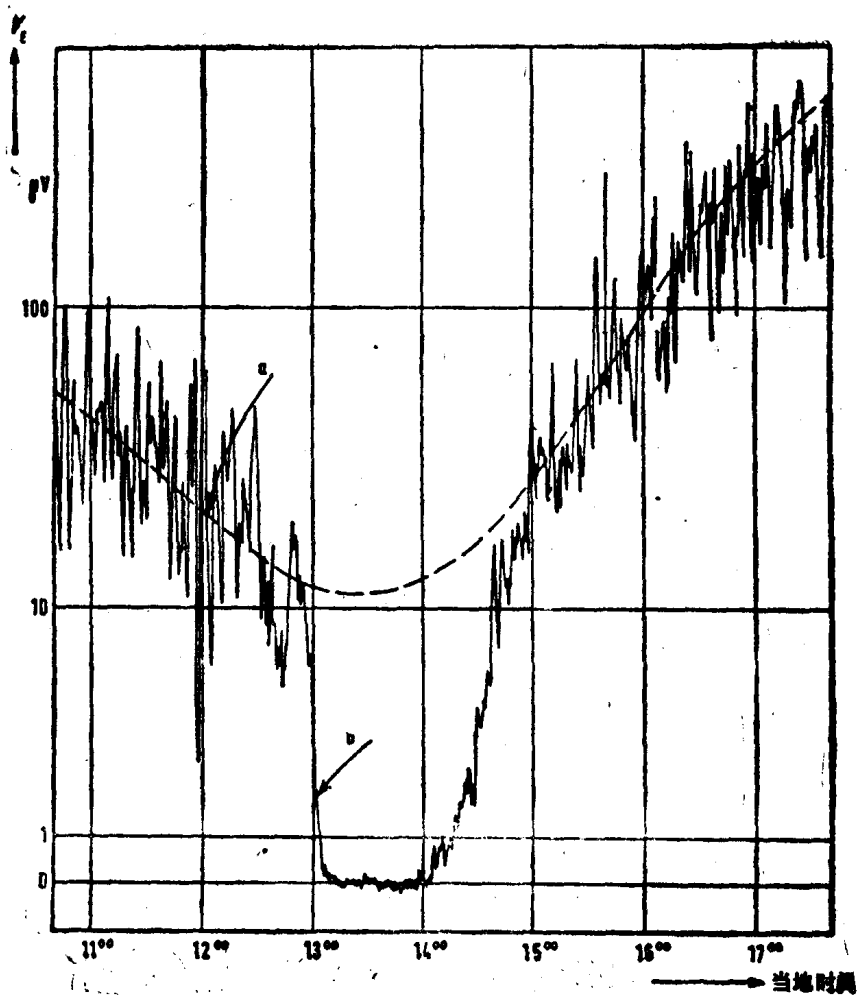


图2.5 由于爆发太阳耀斑对某无线电信号的干扰 (根据文献〔4〕)

a) 接收机输入电压 V_E 的常规日变化 b) 由于穆格尔-戴灵格效应 V_E 的非常规下降

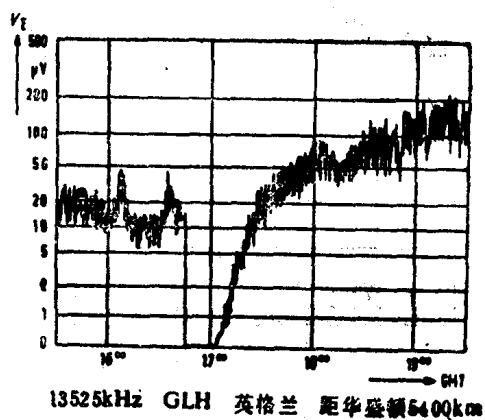
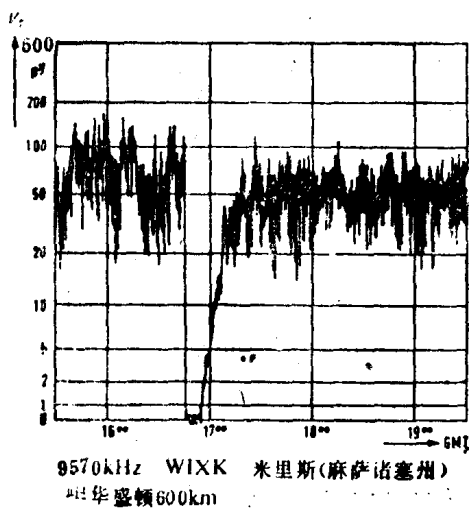


图2.6 1936年4月对不同长度和不同频率的两个无线电路进行测量, 在突然产生电离暴时接收机输入电压同时下降的情况。