

YUANCHENG TONGXIN

远程通信

上海高级专家协会电子电讯专业委员会 编
储钟圻 主编

- 权威作者编写，资深院士推荐
- 图文并茂，以应用技术为核心
- 理论结合实际，反映最新技术成果



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

TN919/64

2008

远 程 通 信

上海高级专家协会电子电讯专业委员会 编

储钟圻 主编



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

本书分为8章,系统地介绍了远程通信领域中各个方面的技术。内容包括:甚长波与超长波通信、现代短波通信、数字微波通信、数字卫星通信、海底光缆通信、航天通信、激光通信及通信发展趋势等。

全书内容丰富,理论结合实际,图文并茂,有一定的深度和广度,注重反映最新技术成果,并以应用技术为主。

本书对于大专院校师生、科研及通信领域的工程技术人员、管理人员均有参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

远程通信/储钟圻主编. —北京:中国电力出版社,2008

ISBN 978-7-5083-5841-3

I. 远… II. 储… III. 远程通信网络-通信技术 IV. TP393.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第091723号

中国电力出版社出版发行

北京三里河路6号 100044 <http://www.cepp.com.cn>

策划:周娟 责任编辑:齐伟 杨淑玲

责任印制:陈焊彬 责任校对:罗凤贤 封面设计:左铭

北京市同江印刷厂印刷·各地新华书店经售

2008年1月第1版·第1次印刷

787mm×1092mm 1/16·28.5印张·698千字

定价:49.80元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

本社购书热线电话(010-88386685)

编 委 会

主任委员	张 煦	陆 铭	
副主任委员	王世伟	周 娟	王建平
	吴明琪	汤庭龙	梁高权
	储钟圻	施鼎钊	
委 员	张 煦	陆 铭	王世伟
	王建平	吴明琪	周 娟
	汤庭龙	梁高权	储钟圻
	施鼎钊	周鹤岐	刘绍宽
	王选仁	薛蔚芝	
主 编	储钟圻		
编写人员	(按章为序)		
	梁高权	储钟圻	薛蔚芝
	施鼎钊	吴明琪	冯 骏
	司 艺	高军诗	陈 亮
	江 伟	蔡海民	

序

自从 20 世纪 20 年代发现短波可实现远距离通信以来，短波已被广泛应用于传送电报、电话、传真、低速数据和图像、语言广播等信息。20 世纪是通信大发展时期，在近一个世纪中，远程通信手段日新月异，相继发展了海底电（光）缆通信、微波通信、卫星通信、长波通信、光纤与激光通信、航天通信等。通信技术的快速发展使地球变小了，几乎能在地球上的任何地点、任何时间与任何人进行任何种类的信息交流（包括在太空中，如美国在 1969 年的阿波罗登月时月球与地面上的通信）。

2020 前后，人类将登上火星，这将是离地球最远距离通信。

21 世纪信息社会中，人们在政治、经济、文化、教育和社会生活等各个方面都愈来愈依赖于信息。为了加强远程通信最新技术的推广和教育，集中了业内专家，鼎力合作，精心编写了本书，以期向在校师生、通信领域的工程技术人员、科研人员和管理干部作一全面、系统的介绍。

全书编排合理，内容新颖，是一本值得肯定的远程通信最新的技术著作。本书编写人员都是业内学科带头人，技术精湛，造诣深厚。应该说整体上是颇具实力的，所撰内容亦可谓有一定水准。耄耋之年愿作扶掖，特予推荐。相信它将会成为广大读者的良师益友。

中国科学院资深院士
上海交通大学教授
张 煦

前言

在信息化的进程中，通信的重要性已越来越被人们所认识，各类学科的工作者学习通信技术的要求也变得更加迫切。

作为远程通信的手段，短波是人类最早开发利用无线电频段、历史最为悠久的现代通信手段之一。紧接着是洲际通信，发展了海底电（光）缆通信。20 世纪 50 年代，微波中继接力通信又掀起了一个高潮。20 世纪 60 年代，又向卫星通信方向发展，使得除了地球两极外，通信无处不在。20 世纪 60 年代末的阿波罗飞船的登月，促进了航天通信的发展。光纤通信的使用又促使激光通信得以发展起来，水下潜艇与陆地的通信只有采用长波及蓝绿激光才能胜任。

本书作者大都来自远程通信领域中的教育、科研、运行等部门，具有一定的理论基础与丰富的实践经验。

本书由储钟圻主编。编写分工如下：第 1 章由梁高权编写；第 2、6、7、8 章由储钟圻编写；第 3 章由薛蔚芝编写；第 4 章由施鼎铧编写；第 5 章由吴明琪等编写。

本书第 5 章由施鼎铧审核；全书由储钟圻主编和统稿。

由于时间仓促和作者水平有限，难免存在错误及不妥之处，敬希读者批评指正。

编者

目 录

序

前言

第1章 甚长波与超长波通信	1
1.1 概述	1
1.2 甚长波、超长波的传播	3
1.3 甚长波通信的收发信设备	11
1.4 甚长波发信天线	16
1.5 超长波通信的收发信设备	43
1.6 超长波发信天线	45
1.7 海水(有耗媒质)中的收信天线	52
1.8 潜艇甚长波和超长波通信系统的组成和通信方式	61
第2章 现代短波通信	66
2.1 概述	66
2.2 现代短波通信新技术、新体制	67
2.3 短波通信的基本概念	69
2.4 短波在电离层中的传播特性	72
2.5 短波信道的噪声和干扰	76
2.6 短波自适应技术	77
2.7 短波扩频通信	79
2.8 差错控制技术	88
2.9 短波天线	91
2.10 短波通信数字化	102

第3章 数字微波通信	110
3.1 概述	110
3.2 微波传播	118
3.3 数字微波的调制与解调	132
3.4 同步数字系列 (SDH)	148
第4章 数字卫星通信	162
4.1 概述	162
4.2 卫星轨道和卫星发射	168
4.3 通信卫星	179
4.4 卫星通信系统的体制	186
4.5 卫星链路大气传播效应及其影响	202
4.6 静止地球轨道 (GEO) 卫星通信系统	206
4.7 卫星通信地球站	216
4.8 VSAT (Very Small Aperture Terminal) 卫星通信系统	222
4.9 卫星网络	230
4.10 中高度地球轨道卫星通信系统	235
4.11 海事移动卫星通信	245
4.12 低地球轨道 (LEO) 卫星通信系统	249
4.13 数字直接广播卫星电视	258
4.14 卫星通信系统的可靠性	269
4.15 卫星通信与数据通信网	273
4.16 21 世纪的卫星通信	279
第5章 海底光缆通信	285
5.1 海底光缆通信的基本概念及发展概况	285
5.2 海底光缆通信系统构成	289
5.3 海中设备的构成和工作原理	297
5.4 陆上设备系统	317
5.5 海底光缆的施工、故障判断及维护	352
第6章 航天通信	379
6.1 概述	379

6.2 国外航天测控通信网发展概况	379
6.3 航天器的测控与通信	383
6.4 统一 S 频段测控通信系统	393
6.5 航天器通信使用的其他频段	399
第 7 章 激光通信	411
7.1 概述	411
7.2 激光通信系统	413
7.3 光信道	415
7.4 瞄准、捕获和跟踪 (PAT)	417
7.5 卫星激光通信网络	421
7.6 激光水下通信	423
第 8 章 通信发展趋势	427
8.1 卫星通信发展目标	427
8.2 未来的光通信技术	428
8.3 纳米技术在通信领域中的应用	434
8.4 同温层通信系统的新设想	436
8.5 紫外光通信系统的研究	437
8.6 量子密码通信	437
8.7 紫蜂技术	438
8.8 中微子通信	442
附录	443
参考文献	444

甚长波与超长波通信

1.1 概述

我国对 3Hz ~ 300kHz 范围内电磁波的频段（波段）划分见表 1-1。

表 1-1 3Hz ~ 300kHz 电磁波的频段及波段

频段名称	频率/Hz	波段名称	波长/km
极低频	3 ~ 30	极长波	100 000 ~ 10 000
超低频	30 ~ 300	超长波	10 000 ~ 1 000
特低频	300 ~ 3 000	特长波	1 000 ~ 100
甚低频	3 000 ~ 30 000	甚长波	100 ~ 10
低频	30 000 ~ 300 000	长波	10 ~ 1

以甚长波和超长波（有些国外文献中称上述超低频为 Extremely Low Frequency，称上述超长波为 Extremely Long Wave）为信息载体的无线电通信分别被称为甚长波通信和超长波通信。实际上，从 300kHz 以下频段的无线电频率资源中，目前用于通信的仅有其中的一部分，如 10 ~ 300kHz 及 30 ~ 300Hz 频段。而 10 ~ 60kHz 频段及 30 ~ 100Hz 频段，被认为是较适合远程通信的频段，其中甚长波主要用于海军岸上指挥当局对潜航潜艇发信，超长波通信则是冷战时期超级大国专为战略弹道导弹核潜艇通信的需求而研发的。故以下讨论的甚长波通信和超长波通信主要是讨论它们被一些国家应用在潜艇通信中的有关问题。

上述无线电频率资源中除用于通信外，还可用于大地物理勘探、地震研究；其中 100kHz 的电磁波可用于授时、导航。

1. 甚长波通信的特点

- 1) 甚长波在大气中传播衰减较小。
- 2) 与中、短波相比传播比较稳定，能以较高的可靠性实现远程通信。
- 3) 与中、短波相比，其对海水的穿透能力较强，故可实现对潜航潜艇发信。

4) 甚长波的波长在 10km 以上，根据电磁场基础理论，要想使天线能有效辐射电磁波，天线的几何尺寸必须能与其所载电流的波长相比拟。显然，这对甚长波来说在物理上实现起来是很困难的，为了得到尽可能大的辐射功率，必须把天线做得很大。因此，甚长波的发信天线就成了天线家族中的“巨人”。建设这样的天线，占地面积大，耗资多，结构复杂，战时难隐蔽，抗毁能力差。

5) 由于发信天线体积巨大, 甚长波通信只能是岸发艇收的单向通信。

6) 发信天线体积虽然巨大, 但它却是名副其实的电小天线, 因为这些巨大结构的几何尺寸仍然远小于 $1/4$ 工作波长, 它具有电小天线的一切固有缺点, 如: 辐射电阻小, 容抗大, 辐射效率低, 频带窄, 从而使传输速率严重受限, 若无特别措施, 在载频为十几千赫到三十千赫范围内, 码元速率仅几十到几百波特。

7) 对甚长波通信的非人为干扰主要是大气电磁干扰。

2. 超长波通信的特点

与甚长波通信相似, 但由于频率更低, 这些特点表现得更为突出。超长波在大气中传播所受到的衰减比甚长波更小; 传播也更稳定; 超长波对海水的穿透深度是甚长波的 10 倍, 能使潜艇在更大的深度上收信; 天线辐射效率则更低, 绝对带宽更窄; 再加上大气电磁干扰和接收系统的内部电磁噪声均随频率降低而增大, 可以想象到超长波接收机的前端将经常是在劣信噪比条件下工作, 必然使传输速率远远低于速率不高的甚长波通信。

甚长波通信和超长波通信尽管有上述严重缺点, 但就其优点而言, 仍极受海军国家的重视, 尤其是甚长波通信。在可预见的若干年内, 不可能被别的通信手段所取代。

3. 供有兴趣的读者思考

甚长波通信面世近一个世纪, 在潜艇作战需求牵引下有了很大的发展, 但还有一些也许是拥有潜艇的国家普遍存在的问题, 这些问题可能会引起读者的兴趣。举例如下。

(1) 如何实现不间断通信 所谓不间断通信并非昼夜不停地通信, 而是要求在任何时候任何地方当需要通信时就能通信。对于一般在海面以上的通信用户, 可能认为这并非太大的问题, 但对于潜艇通信来说则是一大难题, 自有潜艇通信历史以来, 尚未有人解决过。传统的潜艇通信方式是: 岸发潜收的定时通信 (收发双方事先约定通信时间), 潜发岸收 (短波或微波卫星通信) 虽不需定时, 但至少要求潜艇的发信天线露出水面, 所以也是受制约的 (发信时辐射的电磁波易破坏潜艇的隐蔽)。迄今为止, 即使是技术最先进的国家也未能例外。其根本原因在于含盐的海水使携带信息的电磁波能量在进入海水后以指数形式随深度衰减, 使潜艇收信深度远不能满足工作深度的要求。

(2) 如何提高通信系统的抗干扰能力 由于频率较低, 绝对带宽窄, 可用的频率资源少, 工作频率实际上是公开的, 所有这些都不利于抗干扰技术的发挥。为了抗自然和人为干扰, 历来采用的办法是加大辐射功率、选取合适的调制解调和编译码方法。加大辐射功率是公认的有效手段, 有的国家已拥有功率容量为兆瓦级的甚长波发信台多个, 甚至将自己的发信台装到了国外, 但辐射功率毕竟不能无限制地加大, 剩下来的就只能在信号处理方面去挖掘了。

(3) 如何增强发射天线的顽存力 如前所述, 这类天线体积都很大, 隐蔽困难, 易破坏, 不易迅速恢复。二战后一些国家有了改进的气球天线 (以氦气取代了易燃的氢气) 和机载甚长波发信系统。但这类天线在现代战争条件下其生存能力也很脆弱, 所以仍更希望改进固定台发射天线的结构、形态, 使之体积减小便于隐蔽和修复, 而辐射效率则至少保持现有水平甚至更高。

(4) 如何提高通信系统的传输速率 甚长波通信的传输速率主要受限于发信天线系统频带窄、接收系统周围的电磁噪声大、信号微弱等因素。在上述条件下如何提高传输速率? 在理论上能否有所突破?

此外, 在本章涉及的内容中, 尚有许多其他问题也值得进一步思考、探索。

1.2 甚长波、超长波的传播

本节将介绍甚长波与超长波何以能成为远程通信的载体,以及接收点(海面以上和海中)的场强计算。

1.2.1 地-电离层波导

首先来回忆一下曾经学习过的几个表达式,其中之一是描述电离层中存在传导电流的等效电导率表达式(该式考虑了电子与离子的碰撞,尚未考虑地磁影响)

$$\sigma = \frac{Ne^2\nu}{m(\nu^2 + \omega^2)} \quad (1-1)$$

式中 N ——电子密度;

e ——电子电荷 ($e = -1.592 \times 10^{-19} \text{C}$);

ν ——碰撞频率;

m ——电子质量 ($m = 9.1 \times 10^{-31} \text{kg}$);

ω ——电磁波角频率。当频率下降时,等效电导率将增加。

其二是描述电离层中存在位移电流的相对介电常数

$$\frac{\epsilon_i}{\epsilon_0} = \left[1 - \frac{Ne^2}{\epsilon_0 m (\nu^2 + \omega^2)} \right] \quad (1-2)$$

式中 ϵ_0 ——自由空间介电常数 ($\epsilon_0 \approx \frac{1}{36\pi} \times 10^{-9} \text{F/m}$);

ϵ_i ——电离层介电常数,当频率下降时,相对介电常数变小。

式(1-1)、式(1-2)表明当频率下降时电离层电特性趋向导体。还有一个表达式是宏观描述大地表面电参数的复相对介电常数

$$\epsilon_r' = \frac{\epsilon_a}{\epsilon_0} - j \frac{\sigma_a}{\epsilon_0 \omega} \quad (1-3)$$

或

$$\epsilon_r' = \epsilon_r - j60\lambda \sigma_a$$

式中 ϵ_a ——大地有效介电常数;

ϵ_r ——相对介电常数 ($\epsilon_r = \frac{\epsilon_a}{\epsilon_0}$);

λ ——自由空间电磁波波长;

σ_a ——大地有效电导率。对于给定的地面,当 $\epsilon_r \gg 60\lambda \sigma_a$ 时可将其近似为介质;反之,当 $\epsilon_r \ll 60\lambda \sigma_a$ 时可将其近似为导体。故当频率下降时,地面的有效电参数趋向于导体。

由于以上原因,大地表面和电离层下界对甚长波与超长波传播而言,均呈现导体的性质,即对频率较低的电磁波呈现较强的反射能力。因此,把地球表面与电离层下界看成是由两个同心(近似的)球壳构成的球形波导,称其为地-电离层波导,如图1-1所示。甚长波与超长波之所以被用作远程通信的载体,就是由于它们有这一特殊的传播环境,即它们是在一个相对封闭的波导中传播的,除波导截止波长及其附近的波长外,传播路径上的衰减比较小,适合作远距离传输。但因波导壁非理想导体,所以波导壁有损耗和泄漏,此损耗和泄漏表现为波导的传播衰减。毫无疑问,泄漏少有利于远程通信,从这个意义上考虑,希望泄漏

越少越好,然而,潜艇在海面以下之所以能接收到远方发来的信号,正是由于作为波导壁之一的海面泄漏了携带信号的电磁能量所致。

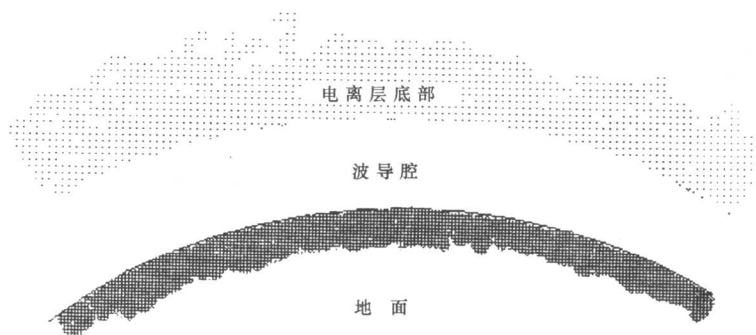


图 1-1 地-电离层波导

1.2.2 甚长波在地-电离层波导中的传播

1. 波导模传播

电离层和地面对甚长波是两个反射边界,电磁波能量能在两边界之间被引导传播,传播的模式有 TE (横电波) 模、TM (横磁波) 模,主要是 TM 模。从波导模传播的概念来理解甚长波传播时,在源附近是多模传播区,场结构比较复杂,但因高阶模衰减较快,在超过 1 000km 以后一阶模明显占了优势,并具有约 2dB/1 000km 的衰减率。距离足够大 (如大于 2 000km) 以后,则逐渐过渡到单模传播区,如图 1-2 所示。当工作频率提高,二阶模的衰

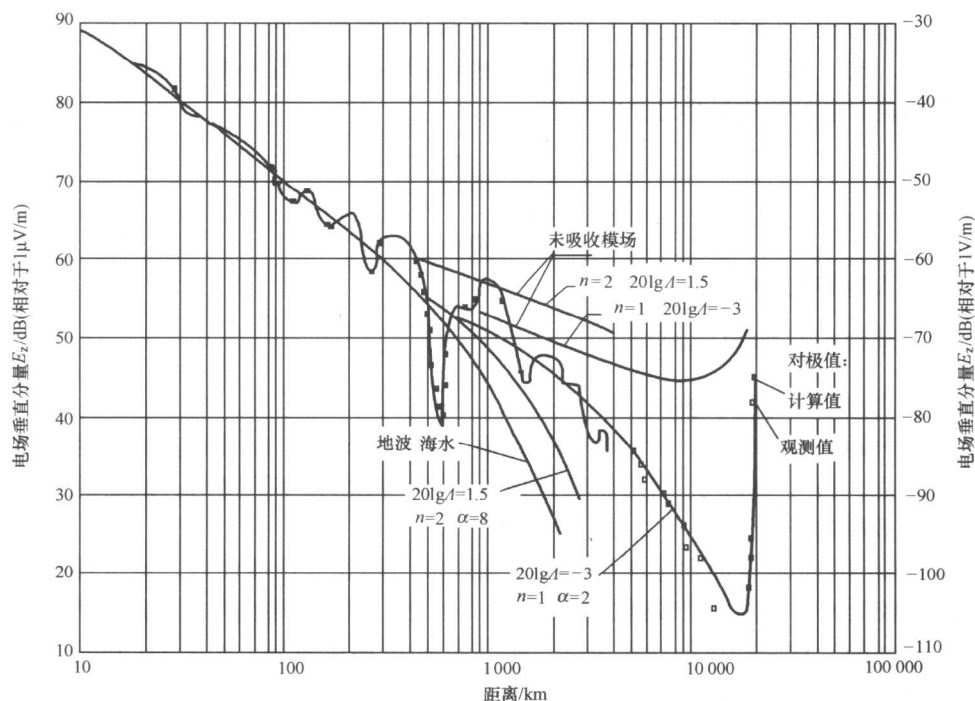


图 1-2 场强与距离的关系 (频率较低)

n —传播模的阶; α —衰减系数 (dB/100km); A —激励因子; 辐射功率 $P_r = 1\text{ kW}$

图中实测数据: 由 Plush 自 WWVB 20kHz 由 Round 自 WQL17kHz

• 由 Bickel 自 NPM 16.6kHz 由 Garner 自 NAA 14.7kHz

减小, 模干扰的范围扩大, 如图 1-3 所示。

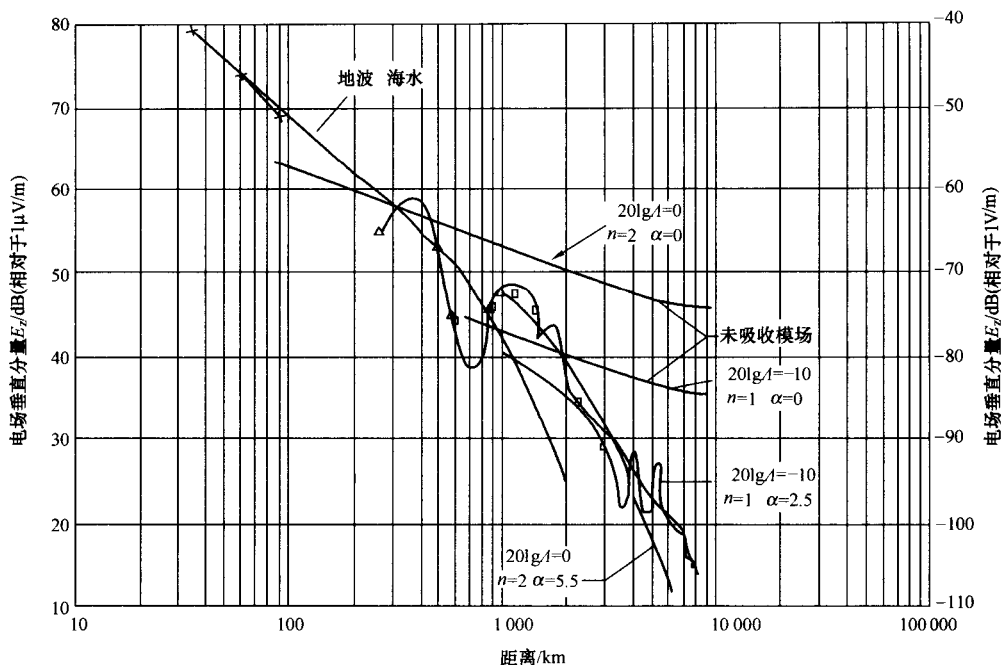


图 1-3 场强与距离的关系 (频率较高)

n —传播模的阶; α —衰减系数 (dB/1 000km); A —激励因子; 辐射功率 $P_r = 1\text{kW}$

图中实测数据; 由 Plush 自 NSS 22.3kHz 由 Hollingsworth 自 FT 21kHz

由 Round 自 LCM 25kHz 由 Round 自 MUU 21kHz

对甚长波在地-电离层波导中传播的分析, 一般是先将它简化为高度等于电离层反射高度 (对甚长波的反射高度通常在 $70 \sim 90\text{km}$, 但有时可低到 60km) 的良导电平板波导, 沿用已学习过的波导理论来求证其模谐振条件、波导中的相速、波导波长、截止波长等。这一过程较简单, 接下来的就是对分析结果进行多种修正, 如: 波导不是良导电平行板波导, 是有曲率的; 波导壁不均匀也不光滑; 电离层反射高度是时变的, 且变化的因素甚多; 等等。这些修正因子的引入, 使传播模的场强表达式变得相当复杂。一些修正因子被作成曲线供计算场强时查阅。

2. 波导中的衰减

实际的地-电离层波导壁不是理想导体, 因而存在衰减。一方面是由于波导壁本身对电磁波有损耗作用 (如将电磁波转化为热能), 另一方面是由于有一部分电磁波泄漏或渗透到波导壁深处。衰减率与电磁波频率、传播方向 (受地磁影响)、地面电导率和粗糙度、昼夜变化、季节、纬度、太阳活动性等有关, 且各因素互有影响。

(1) 地磁场的影响 地磁的作用使电离层的反射系数发生了变化, 因而出现从西向东传播的衰减比从东向西传播的衰减要小 (可相差数分贝)。其方向效应在赤道上具有最大值, 而在两磁极附近则趋于零。

(2) 地面电导率的影响 由于海水的电导率比陆地电导率大, 海洋传播路径的衰减率比陆地传播路径的衰减率小。

(3) 昼夜变化的影响 在远距离无模干扰情况下, 夜间的场强往往大于白天的场强, 显

示出夜间衰减率较白天小, 夜间电离层反射高度较白天的大是原因之一, 但有时也出现相反的情况。

(4) 季节变化的影响 观察场强表明有 1 年周期的变化规律性, 夏季白天的衰减率比冬季的要低, 季节变化的主要原因是太阳天顶角 (太阳相对于观察点地面法线之间的夹角) 的改变, 白天的年变化幅度在 $1\text{dB}/1\,000\text{km}$ 以内, 夜间的年变化幅度小于 $0.5\text{dB}/1\,000\text{km}$ 。

此外, 纬度、太阳活动周期对衰减率都有影响, 但变化幅度均小于 $1\text{dB}/1\,000\text{km}$, 至多在 $1\text{dB}/1\,000\text{km}$ 左右。

(5) 平均衰减率 平均衰减率是指纬度为 45° 处、北-南方向、海水路径上的平均衰减率, 对典型的昼夜取平均, 再对 12 个月取平均, 最后对太阳活动周期内取平均。图 1-4 和图 1-5 是 Wait 和 Spies 按理论计算所得的衰减率曲线。

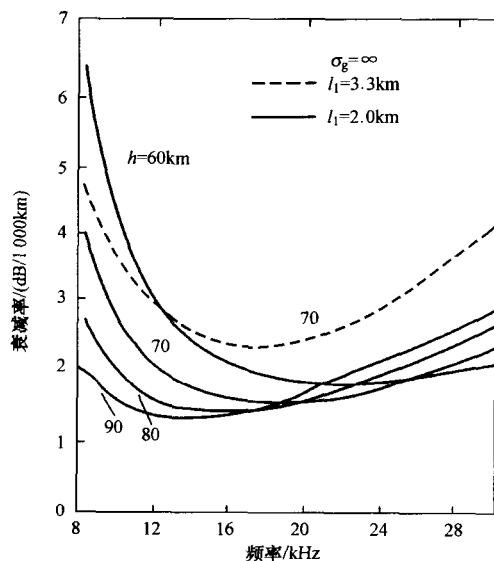


图 1-4 一阶模的电离层衰减率

σ_g —地电导率; l_1 —电离层梯度, 表示在电离层中, 由某一点到另一点, 其空间电子密度与碰撞频率之比增大 2.71 倍的距离; h —电离层反射高度

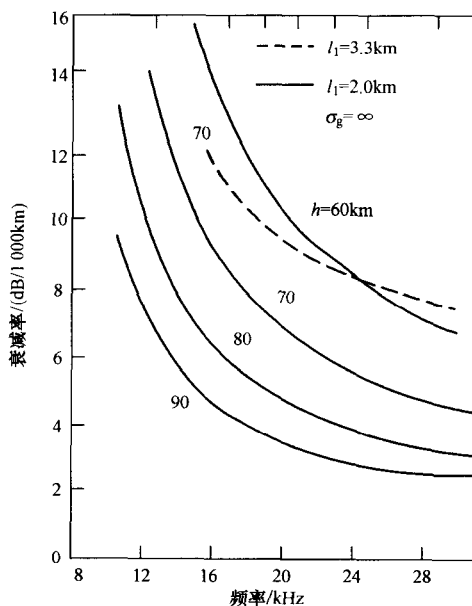


图 1-5 二阶模的衰减率

σ_g —地电导率; l_1 —电离层梯度, 表示在电离层中, 由某一点到另一点, 其空间电子密度与碰撞频率之比增大 2.71 倍的距离; h —电离层反射高度

3. 场强计算及场强近似计算

根据波导模理论, 波导中的总场是表示式中各阶模场之和, 表示式中含多个变化因子, 而这些变化的参数取决于沿传播路径上地-电离层波导壁之电磁特性。这些参数由有关专业部门编制成曲线供计算时查阅。

我国信息产业部电波传播研究所编制了国家军用标准《甚低频 (VLF) 无线电系统电波场强与相位计算方法》, 可供计算参考。此外, 在其他一些有关的著作中也有甚低频场强的计算方法。但由于传播路径电磁特性的复杂性和时变性, 计算结果与实测结果不太吻合也是常有的。

前面提到过, 电磁波传播的物理过程是客观存在的, 但如何认识它、处理它可以有不同的方法, 不一定任何情况下都要按波导模理论来处理。对于距离小于一个波长范围内的场

强,可按导电平面上的垂直单极子在上半空间所产生的静态场(场强与距离的立方成反比)计算,由于天线的几何尺寸远小于波长,这样处理是符合实际的;当距离增大但尚不需考虑电离层的影响时,可按地波传播理论处理;当距离大于500~600km以后,可按射线理论处理,需同时考虑地波和天波。这些是大家比较熟悉的,与其他较高波段明显不同的是,地面和电离层底部对甚长波呈现的电特性更趋近于良导体、在地面上的绕射能力也更强。

作为远程通信,如果只需作一些工程估算时,采用近似公式计算颇为方便,近似公式也不止一种,此处向读者推荐Pierce公式作近似计算,这是一个较简单的近似公式,在距离较大逐渐进入单模区以后,其计算结果与实测结果有较好的一致。如:对昼间海上传播常用

$$E_z = \frac{210 \sqrt{P}}{[\sin(d/a)]^{1/2}} e^{-0.2 \frac{d}{a} f^{0.75}} \quad (\mu\text{V/m}) \quad (1-4)$$

式中,辐射功率 P 以kW为单位;频率 f 以kHz为单位; d 和 a 分别为大圆距离和地球半径。从指数衰减项可算出每千千米的衰减倍数,如 $f=20\text{kHz}$,指数衰减项为0.743,取对数得每1000km衰减2.58dB。上式计算结果是海面上的电场垂直分量,由于电磁波在海上传播过程中,其水平磁场在海面上感应产生一径向水平电场(常称其为二次场),此水平电场为

$$E_x \approx \frac{E_z}{\sqrt{60\sigma_s \lambda}} \quad (\mu\text{V/m}) \quad (1-5)$$

式中 λ ——电磁波在自由空间的波长(m);

σ_s ——海水的电导率(S/m)。

此水平电场与原来的水平磁场在界面上连续,它们就是进入海中的平面电磁波,此平面电磁波以接近垂直的方向向海洋深处传播,由于海水导电,传播路径中的衰减较大,到达接收天线处的水平电场为

$$E_x(z) \approx E_x(0) e^{-\alpha z} \quad (\mu\text{V/m}) \quad (1-6)$$

式中 $E_x(0)$ ——海面水平电场,即式(1-5)中的 E_x ;

z ——深度(m);

$E_x(z)$ ——深度等于 z 处的水平电场;

α ——电磁波在海水中的衰减系数

$$\alpha = \sqrt{\pi f \sigma_s \mu_0} \quad (\text{Np/m}) \quad (1-7)$$

式中 f ——电磁波的频率;

μ_0 ——自由空间的磁导率,此处将海水的磁导率近似为自由空间的磁导率。

读者也可从式(1-4)的结果用自由空间波阻抗算得水平磁场,直接用式(1-6)将其中的电场换成磁场,即可得到深度等于 z 处的水平磁场。

4. 甚长波传播的不稳定性

前面提到甚长波在地-电离层波导中传播较稳定,是与长波、中波、短波相比较而言的。因为在传播过程中,能量主要是在电离层下部,仅有很少的能量深入电离层,从而受电离层的变化影响相对较小。由于波导的高度和电特性都随时间变化,还有地磁场的作用,使甚长波的幅度和相位都会随时间变化,这种不稳定性与以下原因有关。

(1) 多模干涉 在多模区,因各阶模存在不同的相速和衰减率,各阶模叠加后,总场幅度、相位将出现波动;

(2) 模转换干涉 电离层高度的变化(白天约70km,夜间约90km),地面电导率的突

变,可产生模的转换(如一阶模转换为二阶模),于是出现不同阶模的干涉。其中电离层高度的变化不仅与昼夜有关,还与纬度和外层空间电离源作用有关,高纬度地区,受宇宙线作用强,电离层变低;

(3) 电离层的各向异性 电离层是各向异性的,这与地磁场有关,使衰减率和相速与传播方向有关,从西向东传播衰减较小,反之衰减较大,南北向居中。以 $f=10\text{kHz}$, 距离 $d=1\,000\text{km}$ 为例,其衰减率(dB)见表1-2。

表 1-2

衰 减 率

单位: dB

时 间	昼/路径		夜/路径	
方 向	海	陆	海	陆
东→西	4.0	5.4	2.5	3.5
南↔北	2.4	2.8	1.5	2.5
西→东	1.6	3.0	1.0	2.0

(4) 高空核爆炸的影响 核爆炸使电离层的电子和离子密度激增,电离层下界向下延伸,有效反射高度降低,使甚长波衰减增大,据实验观察,在离爆炸点 $1\,000\sim 2\,000\text{km}$ 可出现短暂的场强减弱(几分贝 $\sim 20\text{dB}$),在距爆炸点 $6\,000\text{km}$ 以远时,对场强已无明显影响。

1.2.3 超长波在地-电离层波导中的传播

1. 超长波传播特点

与甚长波传播相似,地面和电离层下部的电特性就足以使它成为引导超长波传播的波导壁,不过超长波在这个波导中的传播衰减比甚长波的更小,这使得仅 1W 左右的辐射功率也可实现数千千米的远程通信。电离层对超长波的有效反射高度约在 $70\sim 90\text{km}$ 之间,有时也可低到 60km ,这远远小于超长波在自由空间的波长($1\,000\sim 10\,000\text{km}$),在如此“小”的波导中,高阶模在离源不远处即基本消失,只能传输最低阶模 TEM(横电磁波)模。由于实际地-电离层波导壁的不均匀性及损耗等原因,扰乱了 TEM 模结构,成为准 TEM 模。对这种波导的分析,由于波导衰减小,可按理想波导处理,一般可参考对微波波导的分析方法,但需作一定的修正。

可以预见到,通信距离较小时,允许将地-电离层波导近似为平板波导,但当通信距离增大以后,地面的曲率对超长波传播将产生较大的影响,应把地-电离层波导看成球形波导,此时与平板波导相比,首先是波前的高度虽未变,但波前宽度小于平板波导的波前宽度,若两种波导中源的辐射功率相同,则球形波导中的功率流密度会要大一些,场强也自然要大一些;其次是球形波导的封闭性,使它的空腔成为有限结构,波不是向无限远传播、扩散,而是绕地球一周后又回到源点,并继续下去,任何一点的场都是来自两个相反方向的波多次迭加,当某些频率的波满足绕地球一周后波的相位改变为 $n2\pi$, n 是整数,则波导成了一个谐振腔;其三是地磁的存在,地磁场与电离层中的带电质点相互作用,电离层成了各向异性的媒质,在这种情况下使互易理论不再适用。以上推理是成立的,实际观察结果,有些影响表现明显,有些则弱到可以忽略的程度,这些和甚长波的传播相似。

2. 超长波场强计算

地面上的超长波水平磁流源在球形地-电离层波导中辐射的场,可用以下公式计算。水平磁场为

$$|H_{\phi}| \approx \frac{Idl f}{240\pi} \left(\frac{2\pi\mu_0}{c} \right)^{1/2} \frac{\cos\phi}{h_i [\sigma_e(c/v)]^{1/2}} \cdot \frac{e^{-\alpha\rho}}{[a_e \sin(\rho/a_e)]^{1/2}} \quad (\text{A/m}) \quad (1-8)$$