



超低频和极低频电磁波的传播及噪声

Propagation and Noise of
SLF and ELF Electromagnetic Waves

袁翊 著



國防工業出版社

National Defense Industry Press

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

超低频和极低频电磁波的 传播及噪声

**Propagation and Noise of
SLF and ELF Electromagnetic Waves**

袁翊 著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

超低频和极低频电磁波的传播及噪声 / 袁翔著. —北京:
国防工业出版社, 2011. 6

ISBN 978 - 7 - 118 - 07412 - 3

I. ①超... II. ①袁... III. ①超长波传播: 电磁波传播 - 研究 ②极长波传播: 电磁波传播 - 研究 IV. ①TN011

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 089929 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

腾飞印务有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 787 × 1092 1/16 印张 26½ 字数 500 千字

2011 年 6 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 158.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010) 68428422

发行邮购: (010) 68414474

发行传真: (010) 68411535

发行业务: (010) 68472764



谨以此书献给我已故的父亲袁国章，
一位辛勤一生的海员，一位活了98岁的长寿老人。

此书同时获得

总装备部国防科技图书出版基金资助

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。
4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金
评审委员会

国防科技图书出版基金

第六届评审委员会组成人员

主任委员	王 峰			
副主任委员	宋家树	蔡 镭	程洪彬	
秘书长	程洪彬			
副秘书长	邢海鹰	贺 明		
委 员	于景元	才鸿年	马伟明	王小谟
(按姓氏笔画排序)	甘茂治	甘晓华	卢秉恒	邬江兴
	刘世参	芮筱亭	李言荣	李德仁
	李德毅	杨 伟	肖志力	吴有生
	吴宏鑫	何新贵	张信威	陈良惠
	陈冀胜	周一宇	赵万生	赵凤起
	崔尔杰	韩祖南	傅惠民	魏炳波

序 言

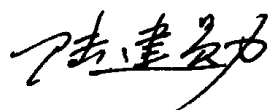
在无线电频率中,300Hz 以下的超低频、极低频虽然因携带的信息量很少往往不被重视,但它对介质的巨大穿透力和在地球圈层间极远的传播能力却是其他波段无法比拟的。早在 20 世纪中叶,地球物理学家发明了利用大气中雷电等产生的天然超低频和极低频电磁信号来探测地质构造(MT 法),其后又发明了人工产生超低频和极低频(CSAMT)等方法,进一步达到了人工控制信号频率、强度、甚至辐射方向的目的,改善探测精度和发展了其他用途,例如利用超低频、极低频监视地下岩层电参数的变化进行地震预测的研究;利用不同深度地壳电阻率的变化进行局部矿藏、油气层和地下水的探查;在同样时期内,由于军事上对水下潜艇通信提出了更高要求,世界潜艇大国对超低频、极低频远距离大深度的无线电水下通信进行了大量研究,也促进了对超低频、极低频和更低的频率电磁波传播研究的进展。最新的科学研究成果表明通过多方面的结合,一种新的多用途大功率人工源无线电磁法(WEM)可以使超低频、极低频的电磁波有效覆盖半径达数千千米,探测深度可达数十千米,具有同时向不同的区域为多用户发送事先计划好的电磁信号的能力,该方法将成为一种新的多学科、多用途科学研究手段,所有这些都需要对超低频、极低频和更低的频率的发射和传播特性有更深的研究和了解。

本书是超低频和极低频频段电磁波传播的专著,比较全面地阐述了这些频率电磁波远距离传播的波导理论,导出了水平电偶极子和垂直电偶极子在圆球形和平行板形地—电离层波导内产生的严格的电磁场公式和各种近似公式。采用经过电波传播实验验证过的计算方法对地—电离层波导参数的计算进行了充分讨论。用矢量位方法推导出了地面附近水平电偶极子、水平磁偶极子和垂直磁偶极子的电磁场公式。导出了多种偶极子近距离电磁场的计算公式,弥补了文献中资料的缺漏。本书还对超低频发射天线的各种问题进行了深入探讨,介绍了超低频和极低频的应用。对超低频和极低频频段电磁波传播的特殊问题,如一般情况下是椭圆极化波的合成水平电磁场问题进行了深入研究和分析。在近距离电磁场公式中提出了索末菲型积分的数值计算方法,对该方法进行了深入阐述,应用该方法进行了广泛计算,证明该方法是实用的,一般情况下精度很高。对存在于现有文献中的圆球形和平板形波导的电磁场公式正、负号相反问题,作者找出了原因,进行了改正。本书的特点是通过编写了众多的计算机程序,进行了广泛的数值计算。例如,计算不同接收点的合成水平电(磁)场的幅度和方向,计算各个电磁场分量随距离的变化规

律,计算发射台的服务区,计算发射天线的参数和近距离电磁场,计算地面附近各种偶极子的电磁场,计算分层不均匀大地的表面阻抗和反射系数,计算天线阵的方向性等。通过计算,比较和验证了一些公式的正确性和精度,深化了对问题的理解,也有利于读者应用本书理论解决自己遇到的实际问题。应用本书编制的程序,可以方便地预测已有系统在各个距离上产生的电磁场,以及保证完成任务的区域;可以应用于老系统改造和新系统建设的论证工作。

国内外专门论述超低频和极低频以下电磁波传播的书籍很少,一般在电波传播书籍中提到一点。国内比较接近的有《长波超长波极长波传播》一书(潘威炎著,电子科技大学出版社,2004年11月),它的重点是长波(低频)和超长波(甚低频)传播理论;本书则是对 $300\text{Hz} \sim 3\text{Hz}$ 的超低频、极低频频段结合实际进行了系统地论述,内容充实,论述详尽,相信本书的出版对我国的无线电通信、地球物理和地质勘探及其他前沿科学研究等学术领域将是一项重要的补充。

中国工程院院士



前 言

根据无线电频谱划分规定,超低频(SLF)是指 300Hz ~ 30Hz 频段(波长 1Mm ~ 10Mm 波段),极低频(ELF)是指 30Hz ~ 3Hz 频段(波长 10Mm ~ 100Mm 波段)。3Hz 以下频率称为至低频(TLF)。

有耗介质对透入的电磁波的衰减率随电磁波频率的降低而减小,因此降低频率可以使电磁波传播得更深。在对海面下目标的通信中,为了实现大深度通信,应用的频率越来越低。目前国外已经应用超低频实施对水下目标通信。在地质勘探中,为了探知大深度的地层结构,也需要应用很低的频率。通过对超低频以下频率电磁波的监测也许可以预报地震。超低频以下频率的电磁波也用于空间物理领域,用于探测电离层和磁层。

电磁波传播科学的根本内容可以归结为在已知的天线电流分布条件下,求天线在不同距离和方位上的电磁场。从理论上说,这是一个解麦克斯韦方程组的电磁场边值问题。地球上空存在电离层,它的电参数是随高度、经纬度、季节和昼夜时间随机变化的。因此,严格地求解上述边值问题是十分复杂的。对于甚低频以下频率的传播,目前一般把地面上的传播空间等效为电离层和地面形成的波导,认为电磁波是在这个波导内传播的。这样,把地面上的远距离电磁波传播问题一分为二:一个问题是在求电磁场源(偶极子)在波导内产生的电磁场;另一个问题是根据电离层的理论知识和实验数据确定地—电离层波导的两个参数——波导高度和波导的波数(传播常数)。前一个问题主要是数学问题,在一定的近似条件下可以求出偶极子电磁场的各种形式的表达式。后一个问题不仅是数学问题,还与电离层的状态有关,比前一个问题更复杂。由于电离层的复杂性,以及电离层资料获取的困难,在现有电离层资料基础上计算出的地—电离层波导参数是否正确,最终还得由电磁波传播的实验数据来验证。

本书是作者近几年参加陆建勋院士领导的用无线电磁法(WEM)进行地质勘探和地震预报研究的国家重大科学技术基础设施建设项目的工作总结。本书共分 11 章,涵盖了超低频和极低频电磁波传播的主要方面。对于无线电磁法中电磁波传播的一些特殊问题,如地面上水平电磁场的合成问题、两根交叉水平发射天线的服务区与天线馈电相位差的关系等问题进行了深入研究和阐述。本书中很多内容是作者的工作成果,如索末菲型积分的数值积分计算方法;椭圆极化波和地面上合成水平电磁场的理论分析和数值计算;地面附近水平和垂直磁偶极子电磁场积分公式的推导;用矢量磁位方法推导地面附近水

平电偶极子的电磁场公式,并证明这些公式与用傅里叶变换方法导出的公式完全相同;以及超低频发射天线输入阻抗的数值积分计算,超低频发射天线近距离电磁场的数值计算方法等。

本书的部分内容引用了已有资料,但作者在援引过程中进行了分析研究,优化了一些问题的阐述,使它们的概念更清晰明确,更易理解;澄清和纠正了某些已有资料中存在的一些问题。

本书的特点是使用计算机程序进行了广泛的数值计算。通过计算,比较和验证了一些公式的正确性和精度,深化了对问题的理解,也有利于读者应用本书理论解决自己遇到的实际问题。

本书的一些概念、理论、公式等不仅适用于超低频和极低频频段,而且也适用于更宽广的频率范围。例如,波导传播理论可以往上应用至甚低频频段;地面附近各种偶极子电磁场的近似公式,在频率范围方面,只要 $|k_1| > 3k_2$ 就可应用。

本书可供从事超低频通信、应用低频电磁波从事地质勘探和地震预报等领域的科研和工程技术人员参考,也可作为电波传播、天线和电磁场理论专业的本科生和研究生的参考用书。

本书采用有理化的 MSK 单位制,时间依从关系取 $e^{j\omega t}$ 。本书内容可能有疏漏和错误之处,欢迎批评指正。

陆建勋院士和司徒梦天高级工程师(一级)为本书的出版撰写了推荐意见,作者在此表示衷心感谢。

目 录

第 1 章 基础理论	1
1.1 电磁场及其位函数	1
1.1.1 电磁场的麦克斯韦方程组	1
1.1.2 电场和磁场满足的微分方程	2
1.1.3 电磁场的各种位函数以及它们的表达式	3
1.2 用洛伦兹规范推导矢量位的亥姆霍兹方程	4
1.3 洛伦兹规范不适合应用于圆球坐标系内的径向源	6
1.3.1 在洛伦兹规范下直角坐标系中矢量位的 直角分量满足标量亥姆霍兹方程	7
1.3.2 在洛伦兹规范下圆柱坐标系中矢量位的 轴向分量满足标量亥姆霍兹方程	7
1.3.3 应用洛伦兹规范不能使圆球坐标系的 径向矢量位满足标量亥姆霍兹方程	8
1.4 标量亥姆霍兹方程的解	10
1.4.1 非齐次标量亥姆霍兹方程的积分解法	11
1.4.2 齐次标量亥姆霍兹方程的分离变量解法	13
1.5 电磁场的边界条件	17
1.5.1 电场和磁场的切线边界条件	18
1.5.2 电场和磁场的法线边界条件	19
1.5.3 电磁场的独立边界条件	20
1.5.4 矢量位的边界条件	21
1.6 电磁场的唯一性定理及其证明	26
1.7 关于电磁场的对偶性问题	28
1.7.1 无限大介质中电偶极子和磁偶极子的 各种公式满足对偶性原理	29
1.7.2 存在内边界的电磁场问题中对偶性原理不成立	30
1.8 磁偶极子与小电流环的等效	30

第 2 章 传播介质的电磁性能及其对电磁波传播的影响 34

2.1 地面的电磁特性 34

2.1.1 土壤、岩石和水等的电磁参数 34

2.1.2 地面对均匀平面波的反射和透射,地表面阻抗和表面导纳 35

2.1.3 地面上电磁场的近似边界条件 38

2.1.4 电导率纵向分层情况下的地表面阻抗 40

2.2 电离层的结构和电磁参数 43

2.2.1 电离层的分层结构 43

2.2.2 低电离层的电子密度和碰撞频率随高度的变化 44

2.2.3 忽略地球磁场影响时电离层的电磁参数 45

2.2.4 考虑地球磁场影响时电离层的电磁参数 47

2.3 各向同性电离层下边界的表面阻抗及反射系数 52

2.3.1 各向同性垂直渐变电离层的下边界表面阻抗与反射系数 52

2.3.2 电离层等效下边界高度的改变及相应参数值的换算 59

2.4 各向异性电离层 61

2.4.1 均匀各向异性电离层中的电磁波 61

2.4.2 垂直渐变各向异性电离层中的规格化阻抗矩阵的微分方程 64

2.4.3 解规格化阻抗矩阵微分方程的初始值 65

2.4.4 垂直渐变各向异性电离层不同高度下边界参数的换算 67

2.4.5 地—各向异性电离层波导规格化波数的计算 69

2.4.6 数值计算举例 69

第 3 章 电磁波的波导传播理论 75

3.1 电磁波的波导传播模式、截止频率和衰减率 75

3.1.1 横磁波模式 76

3.1.2 横电波模式 79

3.2 平面地—电离层波导中的电磁波传播 80

3.2.1 平面地—电离层波导的波数和特性阻抗 80

3.2.2 垂直电偶极子产生的电磁场 82

3.2.3 水平电偶极子产生的电磁场 84

3.3 圆球形地—电离层波导中的电磁波传播 86

3.3.1 垂直电偶极子产生的电磁场 87

3.3.2 垂直磁偶极子产生的电磁场 93

3.3.3 水平电偶极子产生的电磁场 96

3.3.4	简化径向函数和模式方程,求解模式方程的特征值	102
3.3.5	考虑电离层极化转换情况下准 TEM 模式的模式方程	108
3.3.6	TM 模式和 TE 模式的衰减率和相速度的计算	111
第 4 章	勒让德函数、电磁场的近似公式和舒曼谐振	115
4.1	勒让德函数及其导数的级数表达式及各种近似表达式	115
4.1.1	勒让德函数及其头两阶导数的级数表达式	115
4.1.2	勒让德函数及其头两阶导数的行波近似表达式	116
4.1.3	勒让德函数及其头两阶导数的平面近似表达式	117
4.1.4	勒让德函数及其头两阶导数在对极点附近的近似表达式	118
4.1.5	近距离上勒让德函数及其头两阶导数的近似表达式	120
4.2	球形波导准 TEM 场的平面近似公式	121
4.3	以对极点为中心的电磁场公式	122
4.4	Bannister 近似公式	123
4.4.1	垂直电偶极子的 Bannister 近似公式	123
4.4.2	水平电偶极子的 Bannister 近似公式	125
4.4.3	Bannister 公式的最大适用距离及其精度	126
4.5	地—电离层波导的舒曼谐振	128
第 5 章	椭圆极化波和地面上的合成电磁场	131
5.1	电磁场的区域划分问题	131
5.2	电磁场的极化	132
5.2.1	极化、线极化、椭圆极化、圆极化	132
5.2.2	两个正交电(磁)场的合成电(磁)场	133
5.2.3	椭圆极化电场的最大值及其方向	135
5.2.4	椭圆极化电磁波的接收	137
5.3	单根水平天线产生的合成水平电磁场的极化	139
5.4	两根交叉水平天线产生的合成电磁场分量及总的 合成水平电磁场的极化	146
5.4.1	两根交叉水平天线产生的合成电磁场分量	146
5.4.2	两根交叉水平天线产生的总的合成水平电磁场的极化	147
第 6 章	地面上水平天线产生的远距离电磁场的计算,电磁场的方向性及 发射台的服务区	153
6.1	地—电离层波导规格化波数的简化公式	154

6.2	衰减率及相速度比值的实验数据与近似公式计算数值的比较	161
6.3	地—电离层波导参数的计算	163
6.4	两端接地水平天线电磁场的幅度和方向计算	164
6.5	垂直电场分量、水平磁场分量及合成水平磁场随距离的变化曲线	168
6.6	电磁场的方向性及其控制	171
6.6.1	单根两端接地水平天线在地面上产生的电磁场的方向性	172
6.6.2	两根交叉的两端接地水平天线在地面上产生的电磁场的 方向性及方向性控制	174
6.7	发射台的服务区	179
6.8	昼夜变化通信线路的电磁场计算	184
第7章	地(海)面附近偶极子产生的电磁场	187
7.1	球面波的索末菲积分表达式	187
7.2	地面附近垂直电偶极子产生的电磁场	189
7.2.1	地面下垂直电偶极子电磁场的积分表达式 (通过矢量磁位方法求解)	190
7.2.2	地面下垂直电偶极子电磁场的积分表达式 (通过傅里叶变换方法求解)	195
7.2.3	电磁场公式中无法严格积分的积分项 (侧面波和修正项)的估算	198
7.2.4	地面下垂直电偶极子在地面下和地面上两个区域内的 电磁场的积分后的代数式	204
7.2.5	地面上空垂直电偶极子产生的电磁场	207
7.2.6	位于分界面上、下两侧的垂直电偶极子产生的 电磁场公式的比较	212
7.3	地面附近水平电偶极子产生的电磁场	213
7.3.1	区域1中的水平电偶极子产生的电磁场(用傅里叶 变换方法求解)	213
7.3.2	区域1中的水平电偶极子产生的电磁场(用矢量磁位 方法求解)	219
7.3.3	用傅里叶变换方法和用矢量磁位方法导出的两组 公式完全相同的证明	222
7.3.4	区域1中的水平电偶极子产生的电磁场的积分后的代数式	225
7.3.5	区域2中的水平电偶极子产生的电磁场的积分表达式 及积分后的公式	232

7.3.6	位于分界面两侧的水平电偶极子产生的电磁场公式的比较	237
7.4	地面附近垂直磁偶极子的电磁场	238
7.4.1	地面之下垂直磁偶极子的电磁场	239
7.4.2	地面上空垂直磁偶极子的电磁场	242
7.5	地面附近水平磁偶极子的电磁场	244
7.5.1	地面之下水平磁偶极子产生的电磁场	244
7.5.2	地面上空中水平磁偶极子产生的电磁场	252
7.6	地面上(上侧)偶极子在地面上空间产生的电磁场公式的 另一种推导方法	254
7.6.1	一次场和二次场	254
7.6.2	地面上垂直电偶极子的电磁场公式	255
7.6.3	地面上水平磁偶极子的电磁场公式	258
7.6.4	地面上水平电偶极子的电磁场公式	260
7.6.5	地面上垂直磁偶极子的电磁场公式	263
7.7	地面上偶极子的准静态电磁场	265
7.7.1	地面上垂直电偶极子的准静态电磁场	265
7.7.2	地面上水平磁偶极子的准静态电磁场	266
7.7.3	地面上水平电偶极子的准静态电磁场	267
7.7.4	地面上垂直磁偶极子的准静态电磁场	268
7.8	分层不均匀地面上空偶极子的电磁场	269
7.8.1	地面上四种偶极子在地面上空产生的电磁场公式	269
7.8.2	分层不均匀地面对不均匀平面波谱的反射系数	273
7.8.3	分层不均匀地面上偶极子电磁场的数值计算	275
第8章	地(海)面附近偶极子产生的近距离电磁场的数值计算	279
8.1	索末菲型积分的数值计算方法	279
8.1.1	按贝塞尔函数的0点把无穷积分变为无穷级数	279
8.1.2	索末菲型积分数值计算中源点和场点高度(深度)不能都 等于0	283
8.1.3	数值计算中的误差	287
8.2	电磁场数值积分计算精度检验	289
8.2.1	地面上侧垂直电偶极子在地面上空产生的径向电场直接波 的数值积分结果与代数公式计算结果的比较	289
8.2.2	地面上侧水平电偶极子在地面上空产生的径向磁场直接波 的数值积分结果与代数公式计算结果的比较	291

8.2.3	海面下侧垂直电偶极子在海水中产生的径向电场直接波的数值积分结果与代数公式计算结果的比较	293
8.3	电磁场数值积分计算及其与各种近似公式计算结果的比较	294
8.3.1	海水中单位水平电偶极矩在海水中产生的电磁场	294
8.3.2	海水中单位水平电偶极矩在海面上空产生的电磁场	297
8.3.3	地面上单位垂直电偶极矩在地面上空产生的电磁场	303
8.3.4	地面上单位垂直磁偶极矩在地面上空产生的电磁场	307
8.3.5	海水中单位水平磁偶极矩在海水中产生的电磁场	309
8.3.6	海水中单位水平磁偶极矩在海面上空产生的电磁场	312
8.3.7	海面上空单位水平磁偶极矩在海水中产生的电磁场	314
第9章	超低频和极低频的大功率发射天线	317
9.1	超低频和极低频大功率发射天线的形式	317
9.2	两端接地水平天线既可以看作是电偶极子,又可以看作是磁偶极子	318
9.3	两端接地水平天线的性能指标	319
9.3.1	两端接地水平天线电磁场的方向性	319
9.3.2	两端接地水平天线的辐射能力与天线场地视电导率的关系	319
9.3.3	两端接地水平天线的辐射电阻	320
9.3.4	无限长导线单位长度阻抗公式的推导	320
9.3.5	两端接地水平天线的效率	325
9.4	地面附近无限长导线单位长度阻抗的数值积分计算	325
9.5	两端接地水平天线上的电流和电压分布	329
9.6	两端接地水平天线附近电磁场的计算	334
9.6.1	用水平电偶极子的电磁场公式计算两端接地水平天线附近的电磁场	334
9.6.2	根据无限长导线电场公式用数值积分方法计算地面上的水平电场	339
9.6.3	天线电压引起的垂直电场	341
9.6.4	天线终端下引线的电磁场	342
9.7	天线场地电阻率的各向异性及其对天线方向性的影响	343
9.7.1	各向异性岩层的电阻率矩阵	343
9.7.2	各向异性场地的地表面阻抗矩阵及天线的方向性函数	344
9.7.3	实际天线方向图的一种测量方法	348
9.8	天线场地高电导率覆盖层对视电导率的影响	349