雷达手册

第二分册

〔美〕M.I. 斯科尔尼克 主编

国防工业出版社

需要全本请访问 www.ertongbook.com

雷 达 手 册

（第二分册）

〔美〕M. I. 斯科尔尼克 主编

谢 卓 译　　张直中等 校

中国科学技术大学 图书馆藏

国防工业出版社

1974

内 容 简 介

本《手册》系根据〔美〕M. I. 斯科尔尼克主编的《雷达手册》一书译出。

全《手册》共有三十九章。为了读者使用方便，译文不是按原书章次编排，而是大致按细分的专业将其分成十个分册。

《雷达手册》第二分册共有六章，即第五、六、七、八、九、十章。第五章 气候对雷达的影响；第六章 地面回波；第七章 海面回波；第八章 目标的雷达截面积；第九章 目标噪声；第十章 电磁兼容性。

本《手册》可供所有从事雷达工程的工人、科技人员和大专院校师生参考。

Radar Handbook
M. I. Skolnik
McGraw-Hill, Inc. 1970

*

雷 达 手 册
（第二分册）
〔美〕M. I. 斯科尔尼克 主编
谢 卓 译　　张直中等 校

*

国防工业出版社 出版
北京市书刊出版业营业许可証出字第074号
新华书店北京发行所发行　　各地新华书店經售
国防工业出版社印刷厂印装

*

787×1092 1/16　印张 11　255千字
1974年2月第一版　1974年2月第一次印刷　印数：0,001—10.000册
统一书号：15034·1345　　定价：0.95元

出 版 者 的 话

为了适应我国电子工业迅速发展的形势，我们组织翻译了由〔美〕M. I. 斯科尔尼克主编的《雷达手册》一书，以帮助读者了解雷达方面的情况。

在原书中，编者试图包含雷达技术领域的各种主要问题。看来，本书的内容比较广泛，但不很深。它省略了一般雷达方面的书籍中通常有的数学推导和详细说明。其实，讨论的许多题目本身都可以写成单独的书籍。为了帮助读者深入研究，原书的每章都提供了许多参考文献。

本《手册》共有三十九章。为了读者使用方便，译文不是按原书章次编排，而是大致按细分的专业将其分成十个分册。第一分册包括雷达简介、雷达检测能力、波形设计；第二分册包括目标特性、气候影响、电磁兼容性；第三分册包括接收机、显示器、自动检测理论、数字信号处理；第四分册专论发射机；第五分册包括馈线、移相器；第六分册包括天线、天线罩；第七分册包括连续波、调频、脉冲压缩和动目标显示雷达；第八分册包括脉冲多卜勒、跟踪、测高和合成孔径雷达；第九分册包括固态、民用航海、卫星监视、天文和航天雷达；第十分册包括多基地、激光雷达，以及雷达信标和无源检测。这十个分册先后出版以后，另外再出版一部分合订本。

原书主编者在前言中对全书未能采用单一标准符号作了说明。他认为，由于当前没有一致通用的符号，如果本书采用某种单一的标准符号，就意味着武断地确定某一种符号是优先选用的，因此，原书允许各章的作者采用自己惯用的符号，只要对它作出确切的定义就行。例如，雷达方程这样一种被认为是标准的和常见的公式，在本《手册》的几个不同部分就写成稍有不同但又是等效的形式，用不同的符号来表示距离、功率、最小可检测信号等等。我们认为上述处理办法是可行的，因此，我们对译文全书的符号也没有统一。

虽然本书偏重于雷达系统方面，但除了对从事雷达系统方面的工程技术人员有用外，还可供其他所有从事雷达工程的有关人员参考。

虽然本《手册》篇幅较大，但在有关厂、所、院校的大力协同下，译校工作开展得比较顺利。在此，谨向为《雷达手册》一书的出版作了不少工作的单位和个人表示衷心感谢。

由于水平有限，书中的缺点和错误在所难免，希望读者批评指正。

目　录

第五章　气候对雷达的影响（24）● ……2-5

5.1　引言 ……2-5

5.2　无线电波的空气折射率 ……2-5

5.3　对流层折射对雷达的影响 ……2-7

5.4　直线或等效地球半径模型 ……2-9

5.5　改进的等效地球半径模型 ……2-11

5.6　指数模型 ……2-13

5.7　衰减 ……2-14

5.8　大气的气体衰减 ……2-14

5.9　气体吸收范围的估计值 ……2-16

5.10　无线电波全程的总吸收 ……2-18

5.11　单一球形粒子的衰减和散射 ……2-19

5.12　体散射 ……2-20

5.13　云的衰减 ……2-20

5.14　雨的衰减 ……2-21

5.15　雹的衰减 ……2-25

5.16　雾的衰减 ……2-25

5.17　气象的雷达回波 ……2-26

5.18　杂粒散射的雷达方程 ……2-26

5.19　云和雾的检测 ……2-28

5.20　降雨检测 ……2-28

5.21　冰雹的检测 ……2-29

5.22　雪的检测 ……2-29

5.23　仙波 ……2-29

5.24　气候与雷达设计的考虑 ……2-32

参考文献 ……2-33

第六章　地面回波（25） ……2-37

6.1　引论 ……2-37

6.1.1　理论和实验重要性的比较 ……2-38

6.1.2　缺乏足够的散射数据 ……2-38

6.2　影响地面回波的参数 ……2-39

6.3　理论模型及其局限性 ……2-40

6.3.1　地面的描述 ……2-40

6.3.2　简化的模型 ……2-41

6.3.3　小平面模型 ……2-41

6.3.4　克希霍夫-惠更斯模型 ……2-42

6.3.5　球面和柱面突起 ……2-44

6.3.6　其它模型 ……2-44

6.4　地面回波的衰减 ……2-44

● 为了便于查对原文，在每章题目后的圆括弧内用阿拉伯数字注明了相应的原书章次。——译注

需要全本请访问 www.ertongbook.com

6.4.1 衰减速率计算 ……2-46
6.4.2 检波的影响 ……2-48
6.4.3 动目标表面 ……2-49
6.5 地面回波测量技术 ……2-49
6.5.1 连续波系统 ……2-49
6.5.2 距离测量系统 ……2-51
6.5.3 测量精度所要求的独立抽样 ……2-52
6.5.4 连续波-多卜勒散射仪 ……2-52
6.5.5 接近垂直入射的问题 ……2-53
6.5.6 实验室系统 ……2-54
6.5.7 由形象测得散射系数 ……2-55
6.5.8 双基地测量 ……2-55
6.6 散射系数数据 ……2-56
6.6.1 随角度和频率的变化关系 ……2-58
6.6.2 极化效应 ……2-62
6.6.3 双基地观测 ……2-62
6.7 雷达高度计和地面回波 ……2-65
6.7.1 脉冲系统的性能 ……2-66
6.7.2 调频雷达高度计 ……2-67
6.7.3 树木、冰和雪 ……2-67
6.8 形象雷达说明 ……2-67
6.8.1 形象雷达在地质学中的应用 ……2-67
6.8.2 用形象雷达观察植物 ……2-68
6.8.3 居民区测绘 ……2-68
6.8.4 冰的测绘 ……2-71
参考文献 ……2-71
第七章 海面回波 (26) ……2-74
7.1 引言 ……2-74
7.2 入射余角 ……2-77
7.3 海面状态和风 ……2-78
7.4 极化 ……2-83
7.5 频率 ……2-85
7.6 其它因素 ……2-87
7.6.1 雨 ……2-87
7.6.2 污物 ……2-87
7.6.3 脉冲宽度 ……2-87
7.6.4 虚警 ……2-87
7.6.5 遮擋 ……2-87
7.6.6 波动 ……2-87
7.6.7 多卜勒效应 ……2-88
7.7 海面回波理论 ……2-89
7.8 对设计的影响 ……2-92
7.8.1 杂波条件下的作用距离方程 ……2-92
7.8.2 极化的选擇 ……2-94
7.8.3 临界角和目标的可检测性 ……2-95
7.8.4 杂波滤波器 ……2-95
7.8.5 频率去相关 ……2-96
7.8.6 σ^0 的选擇 ……2-96

参考文献 ……2-97
第八章 目标的雷达截面积(27) ……2-99
8.1 引言……2-99
8.2 雷达截面积的定义……2-99
8.3 雷达截面积的单位 ……2-100
8.4 极化散射矩阵 ……2-100
8.5 雷达截面积的测量方法 ……2-102
8.5.1 雷达靶場法 ……2-102
8.5.2 背景产生的误差 ……2-103
8.5.3 室外靶場法 ……2-104
8.5.4 现場雷达法；动态测量 ……2-104
8.5.5 雷达靶場法的设备 ……2-104
8.5.6 测量数据的估价 ……2-105
8.5.7 雷达截面积测量实例 ……2-105
8.5.8 测量的重复性 ……2-109
8.5.9 角反射器…… ……2-109
8.5.10 高分辨力测量 ……2-110
8.6 雷达截面积预计方法 ……2-112
8.6.1 描述雷达截面积的理论 ……2-113
8.6.2 应用于简单物体的理论 ……2-114
8.6.3 应用于复合体的理论 ……2-121
8.6.4 应用于再入体的理论 ……2-122
参考文献……2-126
第九章 目标噪声(28)……2-130
9.1 目标噪声引论 ……2-130
9.1.1 幅度噪声（衰落）……2-130
9.1.2 角噪声（闪燦）……2-130
9.1.3 极化调制 ……2-130
9.1.4 多卜勒调制 ……2-131
9.1.5 距离噪声 ……2-131
9.2 幅度噪声 ……2-131
9.2.1 低频幅度噪声 ……2-131
9.2.2 高频幅度噪声 ……2-133
9.2.3 幅度闪燦对雷达性能的影响 ……2-134
9.3 角噪声 ……2-135
9.4 极化调制 ……2-142
9.4.1 极化的定义 ……2-142
9.4.2 复杂目标的极化调制 ……2-142
9.5 由角闪烁和目标运动引起的多卜勒闪烁 ……2-143
9.6 距离噪声 ……2-147
9.7 多途径引起的跟踪误差 ……2-149
参考文献……2-150
第十章 电磁兼容性(29)……2-152
10.1 引言……2-152
10.2 干扰效应……2-152
10.3 电磁兼容性系统分析……2-154

10.3.1 干扰系统方程 ……2-154
10.4 系统性能 ……2-161
10.4.1 雷达作用距离的减少 ……2-161
10.4.2 平面位置显示器的性能降低 ……2-161
10.5 减弱干扰的设备和技术 ……2-162
10.5.1 滤波器 ……2-162
10.5.2 扇形匿影 ……2-164
10.5.3 脉冲匿影器 ……2-164
10.5.4 脉冲重复频率鉴别器 ……2-164
10.5.5 脉冲宽度鉴别器 ……2-164
10.5.6 可调能力 ……2-164
10.5.7 旁瓣抑制 ……2-164
10.5.8 旁瓣匿影 ……2-164
10.5.9 脉冲同步 ……2-165
10.5.10 脉冲整形 ……2-165
10.6 环境的考虑 ……2-168
10.7 高功率的影响 ……2-169
10.7.1 天线之间耦合的高功率影响 ……2-169
10.7.2 异常的检测 ……2-170
10.7.3 非天线耦合：射频对人体的伤害 ……2-170
10.7.4 非天线耦合：射频对原油、油类和润滑剂的伤害 ……2-171
10.7.5 非天线耦合：射频对军械武器的伤害 ……2-171
10.7.6 射频伤害的计算 ……2-171
10.7.7 X辐射对人体的伤害 ……2-171
参考文献 ……2-172

目　录

第五章　气候对雷达的影响（24）❶ ……2-5

5.1　引言 ……2-5

5.2　无线电波的空气折射率 ……2-5

5.3　对流层折射对雷达的影响 ……2-7

5.4　直线或等效地球半径模型 ……2-9

5.5　改进的等效地球半径模型 ……2-11

5.6　指数模型 ……2-13

5.7　衰减 ……2-14

5.8　大气的气体衰减 ……2-14

5.9　气体吸收范围的估计值 ……2-16

5.10　无线电波全程的总吸收 ……2-18

5.11　单一球形粒子的衰减和散射 ……2-19

5.12　体散射 ……2-20

5.13　云的衰减 ……2-20

5.14　雨的衰减 ……2-21

5.15　雹的衰减 ……2-25

5.16　雾的衰减 ……2-25

5.17　气象的雷达回波 ……2-26

5.18　杂粒散射的雷达方程 ……2-26

5.19　云和雾的检测 ……2-28

5.20　降雨检测 ……2-28

5.21　冰雹的检测 ……2-29

5.22　雪的检测 ……2-29

5.23　仙波 ……2-29

5.24　气候与雷达设计的考虑 ……2-32

参考文献 ……2-33

第六章　地面回波（25） ……2-37

6.1　引论 ……2-37

6.1.1　理论和实验重要性的比较 ……2-38

6.1.2　缺乏足够的散射数据 ……2-38

6.2　影响地面回波的参数 ……2-39

6.3　理论模型及其局限性 ……2-40

6.3.1　地面的描述 ……2-40

6.3.2　简化的模型 ……2-41

6.3.3　小平面模型 ……2-41

6.3.4　克希霍夫-惠更斯模型 ……2-42

6.3.5　球面和柱面突起 ……2-44

6.3.6　其它模型 ……2-44

6.4　地面回波的衰减 ……2-44

❶ 为了便于查对原文，在每章题目后的圆括弧内用阿拉伯数字注明了相应的原书章次。——译注

6.4.1 衰减速率计算 ……2-46
6.4.2 检波的影响 ……2-48
6.4.3 动目标表面 ……2-49
6.5 地面回波测量技术 ……2-49
6.5.1 连续波系统 ……2-49
6.5.2 距离测量系统 ……2-51
6.5.3 测量精度所要求的独立抽样 ……2-52
6.5.4 连续波-多卜勒散射仪 ……2-52
6.5.5 接近垂直入射的问题 ……2-53
6.5.6 实验室系统 ……2-54
6.5.7 由形象测得散射系数 ……2-55
6.5.8 双基地测量 ……2-55
6.6 散射系数数据 ……2-56
6.6.1 随角度和频率的变化关系 ……2-58
6.6.2 极化效应 ……2-62
6.6.3 双基地观测 ……2-62
6.7 雷达高度计和地面回波 ……2-65
6.7.1 脉冲系统的性能 ……2-66
6.7.2 调频雷达高度计 ……2-67
6.7.3 树木、冰和雪 ……2-67
6.8 形象雷达说明 ……2-67
6.8.1 形象雷达在地质学中的应用 ……2-67
6.8.2 用形象雷达观察植物 ……2-68
6.8.3 居民区测绘 ……2-68
6.8.4 冰的测绘 ……2-71
参考文献 ……2-71
第七章 海面回波 (26) ……2-74
7.1 引言 ……2-74
7.2 入射余角 ……2-77
7.3 海面状态和风 ……2-78
7.4 极化 ……2-83
7.5 频率 ……2-85
7.6 其它因素 ……2-87
7.6.1 雨 ……2-87
7.6.2 污物 ……2-87
7.6.3 脉冲宽度 ……2-87
7.6.4 虚警 ……2-87
7.6.5 遮擋 ……2-87
7.6.6 波动 ……2-87
7.6.7 多卜勒效应 ……2-88
7.7 海面回波理论 ……2-89
7.8 对设计的影响 ……2-92
7.8.1 杂波条件下的作用距离方程 ……2-92
7.8.2 极化的选擇 ……2-94
7.8.3 临界角和目标的可检测性 ……2-95
7.8.4 杂波滤波器 ……2-95
7.8.5 频率去相关 ……2-96
7.8.6 σ^0 的选擇 ……2-96

参考文献 ……2-97
第八章 目标的雷达截面积(27) ……2-99
8.1 引言……2-99
8.2 雷达截面积的定义……2-99
8.3 雷达截面积的单位 ……2-100
8.4 极化散射矩阵 ……2-100
8.5 雷达截面积的测量方法 ……2-102
8.5.1 雷达靶場法 ……2-102
8.5.2 背景产生的误差 ……2-103
8.5.3 室外靶場法 ……2-104
8.5.4 现場雷达法：动态测量 ……2-104
8.5.5 雷达靶場法的设备 ……2-104
8.5.6 测量数据的估价 ……2-105
8.5.7 雷达截面积测量实例 ……2-105
8.5.8 测量的重复性 ……2-109
8.5.9 角反射器…… ……2-109
8.5.10 高分辨力测量 ……2-110
8.6 雷达截面积预计方法 ……2-112
8.6.1 描述雷达截面积的理论 ……2-113
8.6.2 应用于简单物体的理论 ……2-114
8.6.3 应用于复合体的理论 ……2-121
8.6.4 应用于再入体的理论 ……2-122
参考文献……2-126
第九章 目标噪声(28)……2-130
9.1 目标噪声引论 ……2-130
9.1.1 幅度噪声（衰落）……2-130
9.1.2 角噪声（闪燦）……2-130
9.1.3 极化调制 ……2-130
9.1.4 多卜勒调制 ……2-131
9.1.5 距离噪声 ……2-131
9.2 幅度噪声 ……2-131
9.2.1 低频幅度噪声 ……2-131
9.2.2 高频幅度噪声 ……2-133
9.2.3 幅度闪燦对雷达性能的影响 ……2-134
9.3 角噪声 ……2-135
9.4 极化调制 ……2-142
9.4.1 极化的定义 ……2-142
9.4.2 复杂目标的极化调制 ……2-142
9.5 由角闪烁和目标运动引起的多卜勒闪烁 ……2-143
9.6 距离噪声 ……2-147
9.7 多途径引起的跟踪误差 ……2-149
参考文献……2-150
第十章 电磁兼容性(29)……2-152
10.1 引言……2-152
10.2 干扰效应……2-152
10.3 电磁兼容性系统分析……2-154

需要全本请访问 www.ertongbook.com

10.3.1 干扰系统方程 ……2-154
10.4 系统性能 ……2-161
10.4.1 雷达作用距离的减少 ……2-161
10.4.2 平面位置显示器的性能降低 ……2-161
10.5 减弱干扰的设备和技术 ……2-162
10.5.1 滤波器 ……2-162
10.5.2 扇形匿影 ……2-164
10.5.3 脉冲匿影器 ……2-164
10.5.4 脉冲重复频率鉴别器 ……2-164
10.5.5 脉冲宽度鉴别器 ……2-164
10.5.6 可调能力 ……2-164
10.5.7 旁瓣抑制 ……2-164
10.5.8 旁瓣匿影 ……2-164
10.5.9 脉冲同步 ……2-165
10.5.10 脉冲整形 ……2-165
10.6 环境的考虑 ……2-168
10.7 高功率的影响 ……2-169
10.7.1 天线之间耦合的高功率影响 ……2-169
10.7.2 异常的检测 ……2-170
10.7.3 非天线耦合：射频对人体的伤害 ……2-170
10.7.4 非天线耦合：射频对原油、油类和润滑剂的伤害 ……2-171
10.7.5 非天线耦合：射频对军械武器的伤害 ……2-171
10.7.6 射频伤害的计算 ……2-171
10.7.7 X辐射对人体的伤害 ……2-171
参考文献 ……2-172

第五章　气候对雷达的影响

BRADFORD R. BEAN E. J. DUTTON B. D. WARNER

5.1 引　言

气候对雷达的影响可分为：（1）对流层对雷达射束的折射；（2）大气气体引起的衰减；（3）杂粒和云雾的衰减和散射；（4）晴空的反射。所有这些影响，在设计雷达系统的过程中，都必须加以考虑。

频率低于100千兆赫时，折射影响与频率无关，因此，大多数雷达系统的工作性能均受到折射的影响。但是对于近距离空载雷达，例如武器控制雷达，旁视测绘雷达和全天候雷达等，折射影响则不太重要。相反，对于远距离警戒雷达，如果它的主要任务之一是在低仰角时测定目标高度，则折射影响十分重要。

当工作频率高于10千兆赫时，雷达的性能开始受到大气衰减的影响。工作于这些频率的雷达一般用于近距离，只要频率不接近氧气或水气的吸收谱线，衰减问题就不很严重。

在10厘米或更短的波长时，开始出现杂粒散射和衰减的影响。虽然在十厘米波长时杂粒衰减一般可以忽略不计，但是在3厘米时，则会产生严重的衰减。美国环境科学服务管理部（ESSA）气象局使用的WSR-57气象雷达工作于10厘米波长，一般来说，这种雷达可以凭后向散射来测量降雨率，而相对地不受雨滴衰减的影响。10厘米波长对降水性的微粒很敏感，而对非降水性的微粒却不太灵敏，所以用10厘米雷达可以测出阵雨、雷暴雨、龙卷风和飓风，而不会跟晴天的云相混淆。

探测晴空的后向散射需要很灵敏的雷达系统。虽然这种回波的信号电平不足以高到影响大多数雷达的正常工作（这些信号对于研究大气层的科学工作者是很有价值的），但是却给大功率厘米波雷达的设计带来了杂乱回波问题。

本章就以上提出的气象影响作比较详细的讨论。

5.2 无线电波的空气折射率

通常，大气层使雷达的水平射束向下弯曲，弯曲度的大小约等于地球曲率的四分之一；这种向下弯曲是由于空气的折射率随高度变化而正常下降所引起的。

在折射率为 n 的介质中电磁波的速度 v 与在真空中的光速 c 之间的关系为：$v=c/n$，按照德尔和格兰兹托恩定律，光的折射率可由下式确定

$$n=1+k\rho \tag{1}$$

式中　ρ ＝介质密度；

　　k ＝介质常数。

对于大气层，方程（1）中右边第二项约为 300×10^{-6}，所以，实际上是用折射率 N 来表示：

$$N=(n-1)\cdot 10^6$$

对于无线电波的运用，这个光波的N方程由于水汽的极化性而必须加以修正[1]：

$$N=K_1\frac{P}{T}+K_2\frac{e}{T^2} \qquad (2)$$

式中 T＝温度（°K）；

P＝大气总压力（毫巴）；

e＝水汽的分压力（毫巴）。

史密斯和文特劳[2]对各国度量衡实验室测定的K_1和K_2值进行了分析之后，推荐采用下列数值：

$$K_1=77.6\,^\circ\mathrm{K}/\text{毫巴}$$

$$K_2=3.73\times 10^5(^\circ\mathrm{K})^2/\text{毫巴}$$

当频率在30千兆赫以下，和在通常的压力、温度与湿度范围内，这样求得的N的标准误差为0.5%。这两个所谓的史密斯-文特劳常数以后又为布多雷斯[3]的实验室测定所证实。方程（2）的详细推导可参见文献〔3～5〕；文献〔3〕特别介绍了K_1和K_2的实验测定过程。

使用方程（2）精确测定折射率时，必须首先精确地测定温度、气压和水汽压。如果假定N的公式是完全正确的，则可用下式求算N的增量变化跟温度、气压和水汽压增量变化的关系

$$dN=\frac{\partial N}{\partial T}dT+\frac{\partial N}{\partial e}de+\frac{\partial N}{\partial P}dP$$

以某个标准大气层为基准就可以求出上列偏导数，从而得到近似式：

$$\Delta N=a\Delta T+b\Delta e+c\Delta P$$

于是均方根误差为：

$$\Delta N=[(a\Delta T)^2+(b\Delta e)^2+(c\Delta P)^2]^{1/2}$$

这里假定P、T和e的误差是不相关的。表5-1是根据国际民航协会（ICAO）的标准大气层并假定相对湿度为60%时的在不同高度下的常数a、b、c的典型值。例如，设无线电探空仪观测中常见的误差：P为±2毫巴、T为±1°C、相对湿度为±5%，于是就可以得到海平面的均方根误差为4.1N单位，而由N中的常数的不确定性所引起的误差约为1.6N单位。但是目前确定N的梯度还必须使用无线电探空仪的数据，结果，整个准确度主要取决于气象探测仪器的误差，而不是N方程的常数误差，因此，在没有得到测量T和e的更好方法之前，就无需更精确地确定方程（2）中的各个常数。

表5-1 根据国际民航协会的标准大气层并假定相对湿度为60%时，表示式$\Delta N=a\Delta T+b\Delta e+c\Delta P$中的常数$a$、$b$、$c$的数值

高度（公里）	N	T(°C)	P(毫巴)	e(毫巴)	a(°K^{-1})	b(毫巴)$^{-1}$	c(毫巴)$^{-1}$
0	319	15.0	1,013	10.2	−1.27	4.50	0.27
1	277	8.2	893	6.5	−1.09	4.72	0.28
3	216	−4.5	701	2.6	−0.86	5.17	0.29
10	92	−50.3	262	0.04	−0.50	7.52	0.30
20	20	−56.5	55	0	−0.09	7.96	0.35
50	0.2	9.5	0.8	0	−0.0008	4.67	0.27

5.3 对流层折射对雷达的影响

如果无线电射线在没有大气层的自由空间里传播，它的路径将是一条直线。但是，射线通过地球大气层传播时，沿着它的轨道会遇到大气折射率的变化，使射线路径弯曲。图5-1为这种现象的几何图，它被用来定义有关变量。希腊字母τ表示两点之间射线路径的总折射角，通常称为射线的弯曲度。n表示无线电波的大气折射率，近地面的大气n值总是略大于1（例如，1.0003），随着高度的增加而趋近于1。这样，射线路径总是向下作弧形弯曲，如图5-1所示。因此，向下弯曲常被定义为正值。

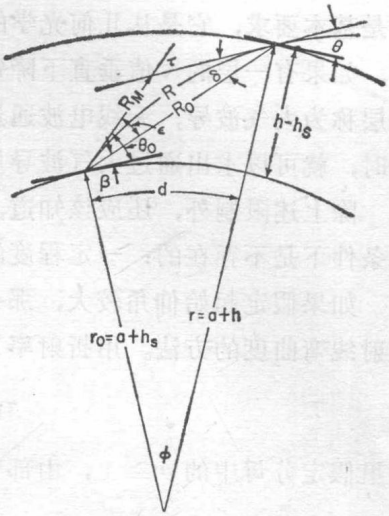


图5-1 无线电波折射的几何图

若假定折射率只跟一个光滑的圆球形的地表面以上的高度有关（即假定折射率结构是水平均匀的），那么无线电波射线的路径将服从斯奈尔极座标定律：

$$n_2 r_2 \cos\theta_2 = n_1 r_1 \cos\theta_1 \qquad (3)$$

方程（3）中假定折射率为n_1和n_2的两个无穷薄层与地面是同心的，其半径分别为r_1和r_2，雷达射线依次穿透这两层。射线与这两层之间的角度分别为θ_1和θ_2。该式所用的几何图示于图5-1。根据这种假设，τ可由下列积分求出：

$$\tau_{1,2} = -\int_{n_1}^{n_2} \cot\theta \frac{dn}{n} \qquad (4)$$

该积分式的详细推导见文献〔6〕。

仰角误差ε是雷达工程师的一个重要数据，因为它是雷达对一个目标指示的视在仰角θ_0与真实仰角之间的差值的度量。在上述相同假定条件下，ε可作为τ、n和θ的函数表示为：

$$\epsilon = \arctan\frac{\cos\tau - \sin\tau\,(\tan\theta) - n/n_s}{(n/n_s)\tan\theta_0 - \sin\tau - \cos\tau\tan\theta}$$

雷达所指示的目标视在距离R_e定义为n沿射线路径的积分函数：

$$R_e = \int_0^R n dR = \int_0^h \frac{n dh}{\sin\theta} \qquad (5)$$

但是，可能遇到的最大距离误差（R_e减去真距离）大约只有200米；所以，除了对于干涉仪和相位测量系统外，方程（5）的求算是不很重要的。

当不了解n与高度的函数关系时，就不能直接求算方程（4）中τ的积分。因而，许多设计者采取了另外两种不同的途径，即，在不完全知道n与高度的关系的条件下使用数值积分法和近似法来计算τ，和制出大气的n模型，以便计算平均的大气折射值。下面几节将要详细讨论这些方法。

必须记住，上面给出的方程式均应受射线轨迹的下列限制，即：

1. 在一个波长的距离内，折射率无明显的变化。
2. 在一个波长的距离内，相邻射线（最初是平行的）间距的变化必须很小。

如果折射率是不连续的（大气中实际上不会发生）第一条将被破坏，或折射率梯度 dn/dr 很大时，不仅将会破坏第一个条件，而且第二个条件也被破坏。满足第一条的条件是：

$$\frac{(dn/dh)/\text{公里}}{N} < 0.002 f_{\text{千赫}}$$

这里，折射率 N 定义为 $N=(n-1)\times 10^6$，$f_{\text{千赫}}$ 是以千赫为单位的载波频率[7]。第二个条件是基本要求，它是从几何光学的费马原理得来的。两条都被破坏的大气状况称为射线俘获，如果有一层的 N 值垂直下降每公里大于 157 N 单位时，就会出现这种状况。这种类型的层称为大气波导，无线电波通过该层的传输模式跟波导传输相似[8]。当考虑到折射率梯度时，就可以求出通过大气波导层时的这种波导式传输的截止频率[9]。

除上述限制外，还应该知道，为了使用方程（3）而作的水平均匀性假设，在实际大气条件下是不存在的；一定程度的水平不均匀性总是有的。

如果假定起始仰角较大，那么就可以在只知道射线路径终端的 n 值之条件下推导出确定射线弯曲度的方法。用折射率 N 表示，方程（4）就等于：

$$\tau_{1,2} = -\int_{N_1}^{N_2} \cot\theta \, dN \times 10^{-6}$$

这里假定分母中的 $n \cong 1$，由部分积分得：

$$\tau_{1,2} = -\int_{N_1}^{N_2} \cot\theta \, dN \times 10^{-6}$$

$$= -\left[N\cot\theta \times 10^{-6}\right]_{N1}^{N2} - \int_{\theta_1}^{\theta_2} \frac{N}{\sin^2\theta} d\theta \times 10^{-6} \qquad (6)$$

注意，当 θ 值在 0 与 90°之间时，比值 $N/\sin^2\theta$ 随着 θ 的增加而变小。如果点 1 取在地面上，那么 $\theta_1=\theta_0$，$N_1=N_s$。于是，当 $\theta_0=10°$，$N_2=0$ 和 $\theta_2=\pi/2$ 时，方程（6）的最后一项只占整个方程的 3.5%；当 N_2 和 θ_2 不变，而 $\theta_0=87$ 毫弧度（~5°）时，方程（6）的第二项仍然比较小（~10%）。因此，比较合理的假设是：当

$$\theta_0 \geqslant 87\text{毫弧度}(\sim 5°)\text{时，}$$

地面与任何一点 r 之间的弯曲度 $\tau_{1,2}$ 用下式表示是足够精确的：

$$\tau_{1,2} = -\left[N\cot\theta \times 10^{-6}\right]_{N_s}^{N_r}$$

或者

$$\tau_{1,2} = N_s \cot\theta_0 \times 10^{-6} - N_r \cot\theta_r \times 10^{-6} \qquad (7)$$

式中 $-N_r \cot\theta_r \times 10^{-6}$ 项差不多是不变的，并且在 θ_0 和 r 值给定时（当 $\theta_0 \geqslant 87$ 毫弧度），它小于第一项。这样，在 $\theta_0 \geqslant 87$ 毫弧度范围内，就可以把 $\tau_{1,2}$ 看成是 N_s 的线性函数。对于穿过整个大气层的弯曲度（到 $N_r=0$ 的那一点），在 $\theta_0 > 87$● 毫弧度时，方程（7）可简化为：

$$\tau = N_s \cot\theta_0 \times 10^{-6}$$

起始仰角小于 5°时，这种方法的固有误差超过 10%（接近地面的情况除外）。并且随着 θ_0 的减小而迅速增大。文献〔5〕就计算折射的其它几种方法做了许多讨论，并给出数字示例。

● 原文误为 $\theta_0 < 87$ 毫弧度，应改为 $\theta_0 > 87$ 毫弧度。——译注

5.4 直线或等效地球半径模型

说明无线电波受大气层折射影响的传统方法是假设一个等效地球半径，$a_e=ka$，这里 a 是地球的真实半径，k 是等效地球半径系数。这种方法[10]假定了有一个比实际地球适当大的地球，使无线电射线的弯曲包含在等效地球的弯曲内，这样，无线电射线就能在这个地球上画成直线，而不是真实地球上那样应画成弯曲射线，但仍具有两者应有的相对弯曲。采用这种方法解释大气层折射时，虽然所述的折射率高度分布不能真正代表大气层的平均折射率结构，但是大大简化了无线电波传播工程的许多实际问题。本节将讨论由等效地球半径模型所假定的折射率结构，及其与观测的大气折射率结构之间的差异。此外，将探讨等效地球半径近似法的应用限制，同时介绍一个物理上更真实的指数模型，以便在等效地球半径模型产生的误差太大时使用。

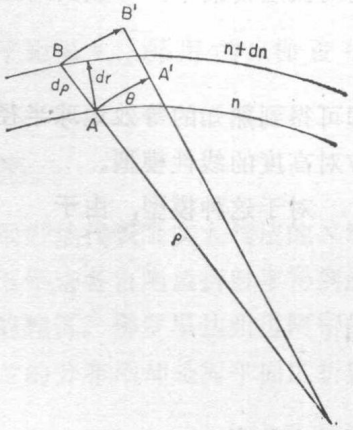


图5-2 推导等效地球半径模型大气层使用的微分几何图

首先对无线电射线弯曲与折射率梯度的关系式进行推导。图 5-2 中，一个波前沿着射线路径从 AB 向 $A'B'$ 移动。如果沿着 AA' 的相速为 v，沿着 BB' 的相速为 $v+dv$，那么，从角速度考虑，

$$\frac{v}{\rho}=\frac{v+dv}{\rho+d\rho}$$

或者

$$\frac{dv}{v}=\frac{d\rho}{\rho} \tag{8}$$

式中 ρ 是弧线 AA' 的曲率半径。这时，由于相速 v 是

$$v=\frac{c}{n}$$

式中 c 是光在真空中的速度，于是可得：

$$\frac{dv}{v}=-\frac{dn}{n} \tag{9}$$

合并（8）、（9）两式，得到熟知的方程：

$$\frac{1}{\rho}=-\frac{1}{n}\frac{dn}{d\rho}$$

如果射线路径与折射率为常数的面成 θ 角，那么

$$dr=d\rho\cos\theta$$

和

$$\frac{1}{\rho}=-\frac{1}{n}\frac{dn}{dr}\cos\theta$$

如果把等效地球的曲率定义为

$$\frac{1}{a_e}=\frac{1}{a}-\frac{1}{\rho}$$

需要全本请访问 www.ertongbook.com