



雷达技术丛书  
<http://www.phei.com.cn>

“十一五”国家重点图书出版规划项目

# 雷达环境与 电波传播特性

焦培南 张忠治 编著



电子工业出版社  
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

## 内 容 简 介

雷达系统需要在特定的环境中工作,而电波环境是雷达工作环境的重要组成部分。电波环境对雷达系统性能既有抑制作用,又有相辅作用。雷达系统的设计、研制、生产、试验和作战应用都要了解电波环境数据和实时状态。

本书是《雷达技术丛书》的基础分册之一,其技术是为雷达提供设计所需的大量环境数据,它具有公用性和通用性。本书共6章,主要介绍雷达工作环境条件及雷达电波在其中的传播规律;并给出各种雷达电波环境的描述参数、参数估算方法;各波段雷达电波在各种电波环境中的传播现象、这些现象对雷达性能的影响以及这些影响的描述、估算方法和修正方法。本书附有大量曲线、图表和数据可供实际设计中使用。

本书既可作为从事大气和高空环境、电波传播、雷达技术、雷达信号处理的研究人员、雷达设计师与雷达部队指挥员和官兵的学习用书,也可作为高等学校电子工程、雷达和通信、大气和高空环境、电波传播等专业的本科生及研究生的教学参考书。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。  
版权所有,侵权必究。

### 图书在版编目(CIP)数据

雷达环境与电波传播特性/焦培南,张忠治编著. —北京:电子工业出版社,2007.7  
(雷达技术丛书)

ISBN 978-7-121-04704-6

I. 雷… II. ①焦… ②张… III. 雷达—电波传播 IV. TN95

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第104962号

责任编辑:陈晓莉 特约编辑:毛联霞

印 刷:北京机工印刷厂

装 订:三河市鹏成印业有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编 100036

开 本:720×1000 1/16 印张:28.25 字数:504千字

印 次:2007年7月第1次印刷

印 数:4000册 定价:75.00元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。  
服务热线:(010)88258888。

## 出版说明

《雷达技术丛书》是由中国工程院王小谟院士和张光义院士倡导并担任主编、中国电子科技集团公司负责组织、电子工业出版社负责出版的一套大型设计性系列丛书。这套《雷达技术丛书》(以下简称《丛书》)共16册,是我国雷达界多个单位的知名专家学者集体智慧的结晶,是他们长期实践经验的总结,是一套理论与实践相结合的佳作。

这套《丛书》的内容十分丰富,概括地说包括了三个主要方面的内容:一是介绍了影响雷达性能的目标特性和环境特性,包括目标(含隐身目标)的频率特性、散射特性、极化特性和起伏特性,地杂波、海杂波和气象杂波特性,噪声与干扰特性,大气与电离层传播特性等;二是介绍了雷达各分系统的设计,包括面天线与阵列天线、微波网络与微波传输线、固态与电子管发射机、频率源与模数接收机、信号处理与数据处理的基本原理、技术指标、设计方法和性能测试,还介绍了雷达系统与分系统的结构设计与制造工艺,包括微组装与柔性制造工艺,可靠性、可维性、环境适应性设计及传动、架拆与运输规范的设计等;三是介绍了典型雷达系统的设计,包括各种二坐标与三坐标防空雷达、有源与无源相控阵雷达、机载预警与火控雷达、多普勒与相控阵制导雷达、脉冲与连续波精密跟踪测量雷达、合成孔径与逆合成孔径成像雷达、天波与地波超视距雷达等的基本原理、技术体制、战技性能、设计方法和联试与试飞等。

这套《丛书》的定义准确,原理清晰,语言简练,图文并茂,公式齐全,数据丰富,集设计性、实用性、新颖性于一体,是雷达科技工作者的设计指南,是雷达部队培训的良好教材,是高校电子工程专业及相关专业师生不可多得的教材和参考书。

《雷达技术丛书》编辑委员会编辑部

2004年12月29日

## 序

雷达在第二次世界大战中得到迅速发展，为适应战争需要，交战各方研制出从米波到微波的各种雷达装备。战后美国麻省理工学院辐射实验室集合各方面的专家，总结二战期间的经验，于1950年前后出版了雷达丛书共28本，大幅度推动了雷达技术的发展。我刚参加工作时，就从这套书中得益不少。随着雷达技术的进步，28本书的内容已趋陈旧。20世纪后期，美国Skolnik编写了雷达手册，其版本和内容不断更新，在雷达界有着较大的影响，但它仍不及麻省理工学院辐射实验室众多专家撰写的28本书的内容详尽。

我国的雷达事业，经过几代人40余年的努力，从无到有，从小到大，从弱到强，许多领域的技术已经进入了国际先进行列。总结这些成果，为我国今后的雷达事业发展做点贡献是我长期以来的一个心愿，在出版社的鼓励下，我和张光义院士倡导并担任主编，由中国电子科技集团公司负责组织编写了这套《雷达技术丛书》（以下简称《丛书》）。它是我国众多专家、学者长期从事雷达科研的经验总结，具有较好的系统性、新颖性和实用性。

雷达技术发展之快，使得传统的雷达观念、体系结构不断更新，在20世纪50年代的接收、发射、天线、显示典型的分机基础上，又发展到现在的雷达数据处理和信号处理分系统。本《丛书》就是按此体系进行了分册。随着微电子技术的发展，数字化还在不断前移，天线收发已经并继续不断引入了数字处理内容，信号和数据处理的界限越来越模糊，雷达体系正从流程型向网络型转变，由于目前其技术都尚未成熟，本《丛书》只在现有的体系中把这些新的内容进行了分别叙述。

《丛书》内容共分3个部分16分册：第一部分主要介绍雷达的目标特性和环境，第二部分介绍了雷达各组成部分的原理和设计，第三部分按典型应用雷达系统的分类对各雷达系统作了深入浅出的介绍。《丛书》各册著者不同，写作风格各异，但其内容的科学性和完整性是不容置疑的，通过对各分册结构和内容的审定，使各分册之间既具有较好的衔接性，又保持了各分册的独立性，读者可按需

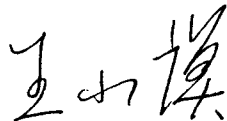
要读取其中一册或数册。希望此次出版的《丛书》能对从事雷达设计、制造的工程技术人员，雷达部队的干部、战士和高校电子工程专业及相关专业的师生有所帮助。

《丛书》是从事雷达技术领域各项工作专家们集体智慧的结晶，是他们长期工作成果的总结与展示，专家们既要完成繁重的科研任务，又要在百忙中抽出时间保质保量地完成书稿，工作十分辛苦，在此，我谨代表《丛书》编委会向各分册作者和审稿专家表示深深的敬意！

《丛书》的出版，得到了中国电子科技集团公司、电子科学研究院、南京电子技术研究所、华东电子工程研究所等各参与单位领导的大力支持，得到了电子工业出版社领导和参与编辑们的积极推动，得到了《丛书》编辑部各同志的热情帮助，借此机会，一并表示衷心的感谢！

中国工程院院士

中国电子科技集团公司科技委副主任

A handwritten signature in black ink, appearing to read '王树' (Wang Shu), written in a cursive style.

# 前 言

雷达系统是在一个特定的环境中工作的，而电波环境是雷达工作环境的重要组成部分。电波环境对雷达系统性能既有抑制作用，又有相辅作用。雷达系统的设计、研制、生产、试验和作战应用都要了解电波环境数据和状态。对电波环境状态和数据的深入研究和掌握，将可能减小电波环境对雷达系统的抑制作用，甚至于还会使电波环境成为雷达系统性能的倍增器；同时对电波环境精细结构的深入研究和掌握，是使雷达系统处于领先地位的重要条件之一。

本书是《雷达技术丛书》的基础分册之一，所涉及的内容与知识为雷达系统提供设计所需的大量电波环境数据，具有公用性和通用性。本书以电波环境为线索，既反映了电波环境和电波传播学科的发展新动向和新成果，又针对各种雷达的需求，集中而有效地提供设计所需的大量电波环境数据，形成了适合工程科技人员研究、雷达设计师使用的新写作体系。本书并注意到所用数据与当前电波传播和电波环境的国标、军标的衔接。本书理论阐述力求深入浅出，电波环境数据力求可靠全面、方便实用和本国化。

本书主要介绍雷达工作环境条件及雷达电波在其中的传播规律。雷达电波频率范围从短波到毫米波。雷达工作环境条件包括地（海）面、低层大气、电离层和深空间在内的空间环境以及噪声与干扰的电磁环境。同时给出各种环境的描述参数及参数的估算方法；各波段雷达电波在各种环境中的传播现象，这些电波传播现象对雷达性能的影响以及这些影响的描述、估算方法和修正方法。本书在每章后列出参考书和文献，并附有大量曲线、图表和数据可供设计参考和实用。

第 1 章为概论。主要介绍电波环境信息技术，雷达电波传播方式，雷达波段划分及特点，雷达方程的环境衰减因子。

第 2 章为地面、海面环境与雷达电波特性。地面、海面环境的电气特性及地物均会对短波及超短波以上波段雷达电波传播造成的不良影响。本章就重点介绍地面反射、绕射、衰减和多径特性的计算方法；地面、海面杂波，雨、飞鸟、昆虫杂波特性。

第 3 章为对流层环境与雷达电波特性。对流层的电气特性随时间和空间变

化，它对超短波以上波段地基和天基雷达的电波传播有重要的影响。本章重点介绍对流层的特性参数、数学模型及其预测方法；不同频段的雷达电波在对流层中传播的闪烁、反常传播、衰减、折射的计算方法以及折射效应的修正方法。

第 4 章为电离层环境与雷达电波特性。电离层是变化复杂的随机、色散、不均匀和各向异性介质，它对短波天波超视距雷达的电波传播和运作有重要影响，同时对通过电离层的 VHF 以上波段地基和天基雷达的电波传播也有不同程度的影响。本章重点介绍电离层环境的特性参数、数学模型及其预测计算方法；不同波段的雷达电波在电离层环境中传播的各种效应及其预测方法以及这些效应的修正方法。

第 5 章为雷达噪声与干扰环境。噪声和干扰对于雷达检测目标信号是一个门限因素。雷达噪声和干扰是随着频率、时间和空间位置而变化的。本章重点介绍频率在 1MHz~100GHz 的噪声电平。噪声和干扰源包括：大气层气体、地球表面、晴空、银河和天体的辐射、人为和大气无线电噪声以及无线电台干扰。

第 6 章为电波传播环境信息的实际运用。本章重点介绍在雷达设计和运作中，如何运用电波传播环境信息进行电波折射修正和衰减的计算，以及评估雷达工作性能。

本书由焦培南、张忠治策划。本书第 2 章由张忠治撰写，其他 5 章由焦培南撰写。本书引用了中国电波传播研究所历年研究成果和所里张明高院士、江长荫、黄捷研究员、张武良、权坤海高级工程师等人主持编著的《国家标准或著作以及国际电信联盟（ITU）》的有关推荐书与报告书的数据。刘成国教授、刘拥军博士、柳文博士、吴健、康士峰、王先义、凡俊梅等研究员为本书提供了很多近期研究成果。本书撰写过程得到王小谟、张光义和保铮等院士的指导，得到邱荣软高级工程师、刘宪兰、陈晓莉高级编辑的审改，得到中国电波所董庆生所长的大力支持。高艳玲在书稿的校订，陈惠君、鲁亚萍在书稿录入过程中做了大量工作。在此一一表示诚挚的感谢。

尽管我们试图努力献给读者一本好书，但由于我们水平的限制和经验不足，缺点一定不少，甚至还有错误，希望读者批评指正。

焦培南

2006 年 10 月



# 目 录

<b>第 1 章 概论</b> .....	(1)
1.1 引言 .....	(2)
1.1.1 日地空间 .....	(2)
1.1.2 雷达环境 .....	(3)
1.1.3 电波环境信息 .....	(4)
1.2 电波环境信息技术 .....	(5)
1.2.1 电波环境与雷达的关系 .....	(5)
1.2.2 电波环境信息技术学科概要 .....	(7)
1.2.3 电波环境信息技术的应用与发展 .....	(9)
1.3 雷达电波传播方式和雷达电波波段 .....	(14)
1.3.1 雷达电波传播方式 .....	(14)
1.3.2 雷达电波波段及其特性 .....	(16)
1.4 雷达环境对雷达性能的影响 .....	(21)
1.4.1 雷达环境各区域特征 .....	(21)
1.4.2 不同雷达环境对雷达电波传播的影响 .....	(23)
1.4.3 雷达方程中的传播损耗 .....	(27)
1.4.4 雷达电波传播的折射 .....	(29)
1.4.5 雷达干扰与噪声环境对雷达的影响 .....	(30)
1.4.6 杂波对雷达的影响 .....	(30)
1.4.7 其他效应对雷达的影响 .....	(30)
<b>第 2 章 地面、海面环境与雷达电波特性</b> .....	(31)
2.1 概述 .....	(32)
2.1.1 方向图传播因子 .....	(32)
2.1.2 后向散射系数 .....	(33)
2.1.3 几何角的关系 .....	(34)
2.2 地面、海面的媒质特性 .....	(35)
2.2.1 纯水的复介电常数 .....	(35)
2.2.2 冰的介电常数 .....	(36)
2.2.3 海水的介电常数 .....	(37)



2.2.4	土壤的介电常数	(39)
2.2.5	典型地面的电参数	(40)
2.3	地面、海面的传播衰减	(42)
2.3.1	地波传播衰减计算	(42)
2.3.2	均匀光滑球形地面衰减	(43)
2.3.3	粗糙海面附加传播衰减	(43)
2.4	地、海面反射	(77)
2.4.1	平面反射系数和透射系数	(77)
2.4.2	地、海面反射系数	(80)
2.4.3	Fresnel 椭球和反射 Fresnel 区	(80)
2.4.4	扩散因子	(91)
2.4.5	表面粗糙度对反射系数的影响	(92)
2.5	地面障碍绕射	(94)
2.5.1	光滑地球表面绕射	(95)
2.5.2	山脊绕射	(97)
2.5.3	圆顶形障碍的绕射计算	(98)
2.5.4	多重障碍绕射	(100)
2.6	多径干涉效应	(101)
2.6.1	产生机制	(101)
2.6.2	多径传播的天线方向图因子	(102)
2.6.3	多径效应引起的角度误差	(104)
2.7	植被树林的衰减	(106)
2.8	地海杂波理论模型	(107)
2.8.1	简单模型	(108)
2.8.2	粗糙面散射理论模型	(110)
2.8.3	杂波的起伏特性	(113)
2.9	地海杂波的测量技术	(117)
2.9.1	测试原理	(117)
2.9.2	测试技术	(119)
2.10	陆地表面杂波的测量数据	(125)
2.10.1	几种地形地物的散射特性和模型	(126)
2.10.2	陆地杂波统计特性	(133)
2.11	海面杂波	(138)
2.11.1	海面状态描述	(138)

2.11.2	海面杂波的一般特性 .....	(140)
2.11.3	海面杂波的统计特性与频谱 .....	(143)
2.11.4	影响海面杂波特性的其他因素 .....	(146)
2.11.5	短波段海面杂波特性的 .....	(146)
2.12	飞鸟昆虫和气象杂波 .....	(147)
2.12.1	飞鸟昆虫杂波 .....	(147)
2.12.2	气象杂波 .....	(148)
<b>第 3 章</b>	<b>对流层环境与雷达电波特性</b> .....	<b>(151)</b>
3.1	概述 .....	(152)
3.2	大气无线电气象参数与折射率 .....	(153)
3.2.1	大气折射率 $N$ 的变化 .....	(154)
3.2.2	对流层大气折射率模型 .....	(159)
3.2.3	雨强 .....	(167)
3.2.4	水汽密度分布 .....	(171)
3.3	大气波导 .....	(174)
3.3.1	大气波导的形成原因 .....	(174)
3.3.2	大气波导结构和特征 .....	(176)
3.3.3	大气波导出现率及特征量 .....	(177)
3.3.4	大气波导传播 .....	(185)
3.3.5	大气波导超视距探测修正 .....	(187)
3.3.6	大气波导预测 .....	(192)
3.4	对流层顶与中层环境 .....	(197)
3.4.1	对流层顶层与中层环境特征 .....	(197)
3.4.2	平流层风场 .....	(197)
3.5	对流层衰减 .....	(204)
3.5.1	大气气体吸收 .....	(204)
3.5.2	降水衰减 .....	(207)
3.5.3	云雾、沙尘衰减 .....	(212)
3.5.4	对流层波导传播损耗 .....	(213)
3.6	对流层闪烁 .....	(217)
3.7	大气折射误差修正 .....	(217)
3.7.1	大气折射基本概念 .....	(218)
3.7.2	大气折射误差及修正 .....	(222)

<b>第 4 章 电离层环境与雷达电波特性</b> .....	(245)
4.1 概述 .....	(246)
4.1.1 电离层 .....	(246)
4.1.2 电离层的电离源 .....	(248)
4.1.3 电离层的形成及其形态 .....	(251)
4.1.4 电离层的测量方法 .....	(260)
4.2 电离层环境参数估算 .....	(262)
4.2.1 E 层参数估算 <sup>[3]</sup> .....	(262)
4.2.2 F <sub>2</sub> 层参数估算 <sup>[11]</sup> .....	(264)
4.3 电离层电子浓度剖面模型 .....	(266)
4.3.1 模型种类 .....	(266)
4.3.2 中国典型电离层数据 .....	(272)
4.3.3 电离层折射指数 .....	(276)
4.4 电离层不均匀性与不规则变化 .....	(278)
4.4.1 Es 层(突发 E 层) .....	(278)
4.4.2 扩展 F 层 .....	(278)
4.4.3 电离层行波式扰动 .....	(279)
4.4.4 突然电离层骚扰 .....	(280)
4.4.5 电离层暴 .....	(281)
4.4.6 极盖吸收与极光吸收 .....	(281)
4.5 电离层传播信道特性 .....	(281)
4.5.1 电离层反射与折射 .....	(282)
4.5.2 电离层法拉第旋转 .....	(283)
4.5.3 电离层色散 .....	(284)
4.5.4 多普勒效应 .....	(285)
4.5.5 电离层传播时延 .....	(285)
4.6 电离层闪烁 .....	(287)
4.6.1 闪烁指数 .....	(287)
4.6.2 闪烁与频率、天顶角的关系 .....	(287)
4.6.3 闪烁瞬时分布函数及谱特征 .....	(288)
4.6.4 闪烁形态的全球分布 .....	(289)
4.6.5 中国、东亚地区电离层闪烁统计 .....	(289)
4.7 电离层返回散射传播 .....	(293)
4.7.1 传播机理与应用 .....	(293)

4.7.2	返回散射电离图 .....	(294)
4.7.3	最小时延线 .....	(297)
4.7.4	天波超视距雷达的坐标变换 .....	(301)
4.7.5	返回散射回波能量 .....	(304)
4.8	电离层传播衰减 .....	(308)
4.8.1	天波雷达路径传播衰减 <sup>[9]</sup> .....	(308)
4.8.2	穿过电离层的雷达电波传播衰减 .....	(315)
<b>第 5 章</b>	<b>雷达噪声与干扰环境</b> .....	<b>(319)</b>
5.1	概述 .....	(320)
5.1.1	无线电噪声干扰 .....	(320)
5.1.2	噪声强度及其相关术语 .....	(321)
5.2	噪声电平的频率关系 .....	(323)
5.2.1	0.1 Hz~10 kHz 频段噪声电平 .....	(324)
5.2.2	10 kHz~100 MHz 频段噪声电平 .....	(324)
5.2.3	100 MHz~100 GHz 频段噪声电平 .....	(325)
5.3	大气气体和地球表面的辐射噪声 .....	(326)
5.3.1	晴空大气亮温(噪声) .....	(326)
5.3.2	地球表面亮温(噪声) .....	(329)
5.4	地球以外的噪声源亮温 .....	(331)
5.4.1	银河系噪声 .....	(332)
5.4.2	天体辐射 .....	(337)
5.5	人为无线电噪声 .....	(337)
5.5.1	预期值 .....	(338)
5.5.2	场强与极化 .....	(340)
5.6	大气无线电噪声 .....	(341)
5.6.1	概述 .....	(341)
5.6.2	预期值 .....	(342)
5.6.3	中国大气噪声实际测量数据 .....	(394)
5.7	无线电干扰 .....	(399)
5.7.1	非蓄意电台干扰 .....	(399)
5.7.2	蓄意干扰 .....	(399)
<b>第 6 章</b>	<b>电波传播环境信息的实际运用</b> .....	<b>(401)</b>
6.1	电波折射修正的实际运用 .....	(402)
6.1.1	根据折射修正雷达垂直面作用范围图 .....	(402)

6.1.2	根据折射修正雷达测量值 .....	(416)
6.2	电波衰减的实际运用 .....	(419)
6.2.1	根据传播衰减修正雷达最大探测距离 .....	(420)
6.2.2	根据传播衰减计算目标回波功率密度 .....	(422)
6.2.3	短波地波超视距雷达传播衰减的计算 .....	(423)
6.2.4	短波天波超视距雷达传播衰减的计算 .....	(423)
6.2.5	超短波雷达传播衰减的计算 .....	(424)
6.2.6	微波、毫米波雷达传播衰减的计算 .....	(425)
6.3	电波传播环境中雷达性能评估 .....	(426)
6.3.1	概述 .....	(426)
6.3.2	抛物方程(PE)方法 <sup>[9,10]</sup> .....	(427)
6.3.3	传播环境中雷达性能评估 .....	(430)

# 第1章

## 概 论



本章是全书的开篇绪论。首先介绍电波环境概念及电波环境信息技术学科的概要,指出电波环境是环境的重要组成部分,电波环境与雷达系统的关系是一种互相依存的关系,特别是对雷达系统性能既有抑制作用,又有相辅作用,要使雷达性能达到最佳,必须使雷达工作参数与电波环境匹配。接着指出它的内容是“雷达技术丛书”的基础分册之一,是为各雷达技术分册内容提供设计所需的电波环境数据。之后,介绍雷达电波传播方式和雷达波段划分及各雷达波段的电波传播特性。最后,给出雷达环境的各种电波传播效应及其对雷达性能影响的概要。

## 1.1 引言

由于雷达工作环境处在地球大气的近地空间之中,这个区域是太阳控制的日地空间环境的一部分。这里对日地空间、雷达环境及雷达电波环境信息之间的关联和关系作一简要的概述。

### 1.1.1 日地空间

对雷达而言,最感兴趣的电波传播环境主要是离地面几千千米高度(或者高至同步卫星轨道  $3.57 \times 10^5$  km)以下的近地空间。但是研究和了解近地空间特性必须涉及日地空间环境的整体联系。日地空间是受太阳支配的,它包括了从太阳至地球的广大空域。

#### 1. 太阳

从天体物理的观点,太阳是一颗中等质量和亮度的恒星,是银河系中一千多亿颗恒星之一。太阳及其九大行星所构成的太阳系空间(直径约 120 亿千米),还不到银河系的一亿分之一。太阳以其巨大的引力、电磁辐射和粒子辐射三种形式的能量,支配着太阳系内行星的运动,为各行星和星际空间的生命和自然现象提供能源和施加影响。日地空间特性取决于太阳的能量辐射和各层区的各种动力学过程。

#### 2. 日地空间

太阳以约 27 个地球日为周期自转,而地球赤道面(垂直于自转轴)与黄道(地球绕太阳公转轨道)平面具有约  $23.44^\circ$  的固定偏角(即黄赤交角),同时地球自转轴又偏离地球极轴  $11.3^\circ$ 。因此,太阳表面不同区域和不同特性的扰动和辐射,特



别是太阳风和高能粒子辐射,使地球系统的输入及其引发的地球物理效应具有极为复杂的图像。日地空间各层次,包括太阳,太阳大气和行星际空间,地球磁层,热层与电离层,低层中性大气(平流层及对流层)及地球表面和内部,构成了相互联系的整体,常称为日地系统,如图 1.1 所示。

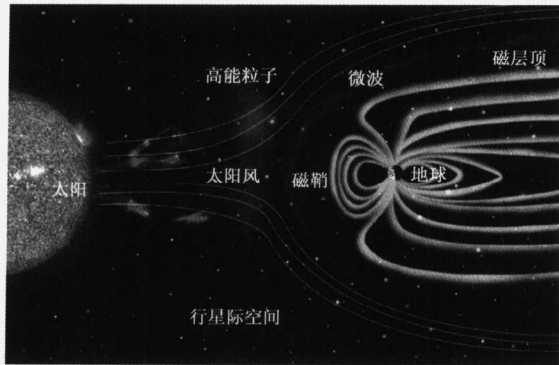


图 1.1 日地系统示意图

不同频率雷达电波通过地球附近的近地空间各层区均会受到不同程度的影响。从电波传播角度来讲,日地空间环境中的近地空间环境是雷达电波的主要传播环境,也是本书要研究的空域。

### 3. 日地关系

自人造地球卫星的应用,人类进入空间时代 40 多年来的研究和实践表明,由太阳扰动引发的“空间天气和气候”问题,有可能给空间和地面的技术系统,包括雷达系统,带来严重的威胁,甚至造成巨大影响和损失。太阳能量的输出和扰动变化对地球大气微量气体与气候过程有强大影响,从而可能影响地面气候和生物圈的生态环境。日地关系的本质就是反映日地空间能量及扰动对人类活动的影响,具体表现为“空间天气和气候”的变化。有人形象地说,“太阳打喷嚏,地球会感冒”。

#### 1.1.2 雷达环境

##### 1. 空间电波传播环境

人类生活在地球大气的底层,雷达设备亦多处在地面或高层大气之中,而雷达工作环境包括地面(下)至外层空间整个高层大气。因此,整个地球大气所发生的

各种自然现象和物理过程都直接和间接地影响雷达的工作性能。

整个地球高层大气可分为若干层。但根据大气不同的物理特征,可有完全不同的划分方法,常见的有下面几种。第一种是按大气热状态来划分:可分为对流层、平流层、中层、热层和外层(或逃逸层)。第二种是按大气成分来划分:可分为均匀层和非均匀层。第三种是按大气电离状态来划分:可分为非电离层和电离层(电离层又可分 D、E、F 层)。第四种是按特殊化学成分来划分:如臭氧层等。

我们采用按垂直高度分布介质区域的电气特性,及其对无线电波传播有显著不同影响的分法,即把整个雷达工作的高层大气环境分为地(海)面、对流层、平流层、中层、电离层(直到深空间)等区域。本书将逐一对其环境特性及电波传播特性进行研究。

## 2. 空间电磁环境

雷达实际工作环境包含空间电波环境和空间电磁环境。

空间电磁环境也是很复杂的。空间电磁环境包含自然界电磁辐射和人为干扰。自然界电磁辐射频谱在  $10^3 \sim 10^{24}$  Hz 范围,电磁辐射强度在  $10^{-11} \sim 10^{-33} \text{ Wm}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$  范围。对现代雷达频谱(3 MHz~300 GHz)范围而言,如自然界噪声 Fa 系数用  $\text{dB}(\geq K_{\text{tob}})$  数表示,大约在  $100 \sim -20 \text{ dB}(\geq K_{\text{tob}})$ ,而人为噪声的频率在 3~300 MHz 范围,噪声 Fa 系数在  $60 \sim 0 \text{ dB}(\geq K_{\text{tob}})$  范围。人为无线电干扰有电台干扰和有意的对抗干扰,对于前者多采用避开的办法,而对后者则采用抗干扰技术。

### 1.1.3 电波环境信息

#### 1. 信息内涵

雷达环境及传播特性是以电波环境信息为基础的。电波环境的信息主要是空间天气和气候的信息与空间电磁环境信息。具体地说,它包括了空间电波环境和空间电磁环境的形态,时间和空间的分布与变化,不同频率电波与之相互作用的效应、现象和规律。这些信息直接关系着空间和地面雷达系统的正常工作和寿命,而进一步利用这些信息改善雷达设计和指挥雷达工作,使雷达系统与电波环境更加匹配,工作性能发挥得更加超群。

#### 2. 信息的获取

电波环境是空间环境的一部分,既具有局域相对独立性又具有全球关联性。