

• 本书获得国家高技术发展计划“资源环境领域机载气象雷达云雨探测系统”专题资助

Richard J. Doviak
Dušan S. Zrnić

著

李 忱 高玉春

译

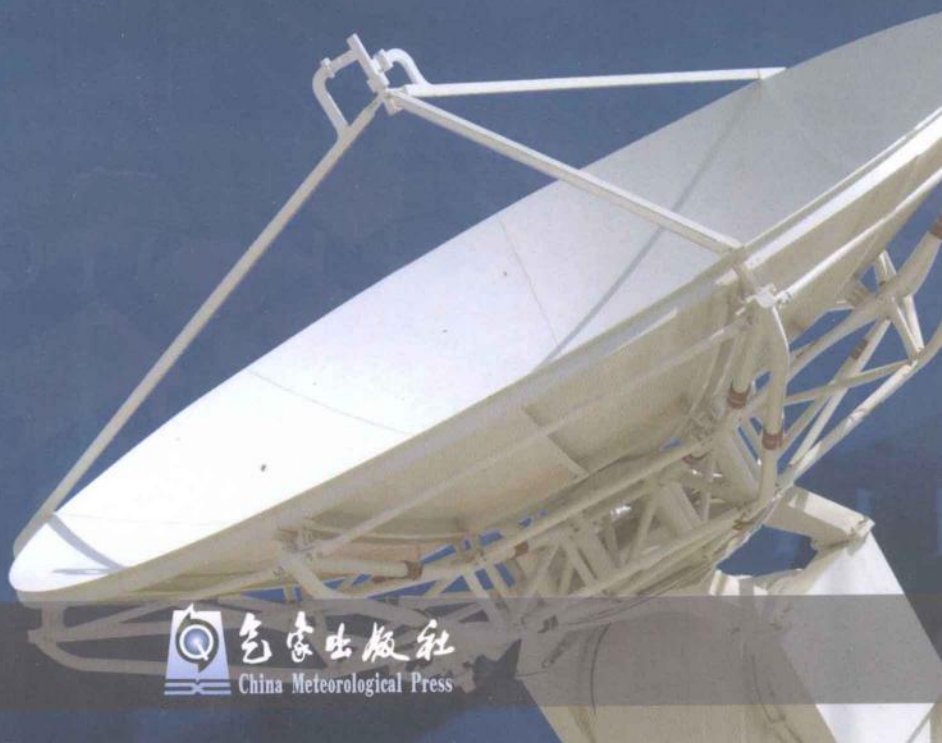
张 越 葛文忠

校

多普勒雷达与气象观测

(第二版)

Doppler Radar and Weather Observations
(Second Edition)



气象出版社
China Meteorological Press

多普勒雷达与气象观测

(第二版)

Doppler Radar and Weather Observations
(Second Edition)

Richard J. Doviak Dušan S. Zrnić 著

李 忱 高玉春 译
张 越 葛文忠 校

 **气象出版社**
China Meteorological Press

内容简介

本书详细介绍了多普勒雷达的基本原理,特别注重气象参数的定量测量。书中主要内容包括电磁波与传播、气象信号与多普勒谱、气象信号处理、降水与湍流的测量以及风、风暴及晴空观测。书中给出了各种天气现象的雷达图像和照片。

此外,书中还说明了多普勒雷达数据和图像与气象目标之间的关系。这些气象目标包括龙卷风、微下击暴流、波、湍流、大气密度、气流、飓风和闪电等。

本书可供从事大气科学及相关学科的研究人员和高等院校的高年级本科生和研究生参考。

图书在版编目(CIP)数据

多普勒雷达与气象观测/(美)多维克(Dovik, R. J.), (美)查尼克(Zrnica, D. S.)著;
李忱等译. —北京:气象出版社, 2013. 10

书名原文: Doppler Radar and Weather Observations

ISBN 978-7-5029-5827-5

I. ①多… II. ①多… ②查… ③李… III. ①多普勒气象雷达-应用-气象观测-研究
IV. ①P41

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 246067 号

北京市版权局著作权合同登记:图字 01-2013-4272

Duopule Leida yu Qixiang Guance(Di Er Ban)

多普勒雷达与气象观测(第二版)

出版发行:气象出版社

地 址:北京市海淀区中关村南大街 46 号

总 编 室:010-68407112

网 址:<http://www.cma.gov.cn>

责任编辑:李太宇

封面设计:博雅思企划

责任校对:赵 媛

印 刷:北京中新伟业印刷有限公司

开 本:787 mm×1092 mm 1/16

字 数:670 千字

版 次:2013 年 11 月第 1 版

定 价:90.00 元

邮政编码:100081

发 行 部:010-68409198

E-mail: qxcbs@cma.gov.cn

终 审:周诗健

责任技编:吴庭芳

印 张:27.5

彩 插:2

印 次:2013 年 11 月第 1 次印刷

序 言

随着我国经济和社会的快速发展,突发性、灾害性天气对社会经济和人民生活的影响日益加剧,由此造成的人员伤亡和财产损失也越来越严重。多普勒气象雷达作为人类在气象观测活动中又一种新型的探测手段,目前在许多国家得到了广泛应用。它不但延伸了人们有限的目视空间,拓展了更为广阔的大气探测空间能力,同时它还能够穿透乌云与黑夜,了解强风暴、台风等灾害性天气系统内部与热力和动力有关的精细化结构,并为定量估算区域降水强度分布等提供重要信息。由多普勒天气雷达回波信息形成的基本物理量所产生的一些产品与算法,是目前制作临近天气预报最有效的手段。

有关气象雷达和雷达气象的书籍已出版有多种版本。但是能从雷达气象和气象雷达的基础理论分析、工程设计原则到形成实际应用产品等方面,能以直观易懂方式做全面、系统论述的中外文献或著作却极少见。为使广大科研工作者、大学生以及相关的气象业务人员能够全面、深入了解多普勒气象雷达探测系统及其应用,著名雷达气象学家 Doviak, R. J. 和 Zrníc, D. S. 合著了《多普勒雷达与气象观测》一书,该书于 1993 年出版了第二版,此后多次重印。

该书对多普勒气象雷达探测气象目标有关的基础理论知识作了简明扼要介绍;对雷达探测气象目标特性的原理,采取将雷达各分系统与气象目标特点相结合的方式,进行了有针对性的介绍;对如何从气象目标的回波中提取所需的信息,进行了较全面、详细和深入的分析;对使用回波信息进一步反演成气象产品的主要算法也作了较仔细的阐述;对带有噪声和地杂波以及存在速度与距离模糊的气象回波信息,如何正确进行取样、谱分析和预处理,以保证探测信息的质量和精度等方面,也进行了系统、深刻的论述。同时,本书还对当时正在不断发展的一些新型气象雷达,例如:双线偏振多普勒气象雷达、晴空风廓线雷达等探测气象目标的基本原理与技术也做了较为详细的介绍。

为了能使众多的气象雷达设计人员、雷达气象的应用、分析和研究人员以及科研单位、高等学校有关专业的师生,能够更好地了解、学习多普勒气象雷达的探测原理、技术与应用,中国气象局气象探测中心与中国电子科技集团公司第十四研究所共同合作翻译了本书。本书的翻译出版,将十分有助于正确掌握和使用好多普勒气象雷达系统,提高对气象雷达回波信息的开发与应用能力,做好对灾害性天气的监测与预警,为提升气象服务水平做出重要贡献。

本书由雷达专家、气象学家共同对原文从内容和文字上进行了仔细认真的翻译和审校,保证了译文在专业方面的正确性和文字叙述的通顺。参加本书的翻译人员有:李忱、高玉春、姚琪、刘一峰、何康、阚茜、张虹、冯华平、王强、刘新安、方能航、张芑菲、李茜等。全书的翻译由李忱研究员统稿,张越研究员、葛文忠教授审校。特别感谢张芑菲和高玉春为本书的出版所做的努力。

本书的出版,将为多普勒气象雷达系统相关部分的开发应用提供很好的参考和借鉴,使我国研制生产的多普勒天气系统在测量精度和实际应用方面更能满足客观需求,发挥更大的社会效益。为此,我向参加翻译、校对、出版本书的专家表示深深的谢意!

张培昌

2013年2月

中文版前言

对于中国的雷达气象学家和学生能够得到我们的《多普勒雷达与气象观测》第二版的翻译本,我们感到非常高兴。中文版的出版适逢本书第二版发行二十周年。此版已经包含了 1993 年出版以来的修订、内容扩充、勘误及补遗。勘误和补遗定期在(美国)国家强风暴实验室(NSSL)的网站 <http://www.nssl.noaa.gov> 上更新和发布。在“Quick Links”菜单下选择 <http://www.nssl.noaa.gov/publications>,打开此网页选择“Recent Books”找到此书和列出的对第三及第四次印刷的勘误。第二版的原稿已经不再印刷了,但是多佛出版社在 2006 年重印了平装本,保证了学生和学术界对此书的持续需求。尽管天气雷达技术在发展,新的实践在进行,但是多普勒雷达和偏振雷达的基础知识还是超越了这些变化。我们希望本书揭示的基础知识能够对中国读者有用,并激励中国学生在这个我们奉献终身的领域内取得进步。我们十分感谢使此书成为中文版的出版社、编辑和翻译人员。

作者

2012 年 10 月

多佛版前言

《多普勒雷达与气象观测》第二版首先在学术出版社出版。(美国)多佛出版社的再版和该书的第三次印刷和第四次印刷是相同的。在多普勒天气雷达的理论和应用方面,这本书的第一版和第二版一直受到学术界和专业使用者的重视。这里重印的第二版增加了偏振探测的实际应用内容。在这个方面,我们给出理解这一新技术的基本原理,在 Bringi 和 Chandrasekhar 的著作《偏振多普勒天气雷达原理和应用》(剑桥大学出版社,2001)中介绍了 20 世纪末期对雷达偏振探测的详细研究结果。本书第二版第三次和第四次印刷的勘误表在(美国)国家强风暴实验室网站 <http://www.nssl.noaa.gov> 上定期更新。请点击链接其上 Scientific Publications, Recent Books 和 Errata 2nd edition, 3rd 和 4th printings。网站上还登载了对本书内容的补充、澄清或拓展,以及(美国)学术出版社版本的彩色插页,因为多佛版只有黑白色图片。

作者

第二版前言

自本书第一版发行以来,雷达气象学又有了许多发展。(美国)国家气象局、联邦航空管理局(FAA)和空军气象局已经开始在全国范围内联合部署一个多普勒气象雷达(WSR-88D)网来取代原来的非相参系统。同时,FAA 为了更好地管理近 50 个机场的飞行航线,正在引进终端多普勒气象雷达(TDWR)来监视危险天气。(美国)国家海洋与大气管理局(NOAA)刚刚部署了一个由 30 部风廓线雷达组成的示范网络,用以提高对中尺度天气现象的理解和短期预报。我们还见证了机载、星载雷达和激光雷达的新技术发展,以及可以测量温度垂直廓线的无线电一声探测系统(RASS)的问世。本书的修订版希望成为这些系统的使用者和开发者的参考书。在本书每一个章节的最后还增加了习题,这就使本书更适合雷达气象学的研究生课程教学。

与前一版一样,我们从执教俄克拉何马州立大学的雷达气象学课程中受益匪浅。而且,我们被特别授权在乔治·华盛顿大学组织的短期课程中讲课,并将本书的材料提供给麻省理工学院林肯实验室及区域观测和预报局的 NOAA 项目。依据这些交流互动以及同事们建设性的批评,我们对新版书中进行了重要的修订,并澄清了大量内容。

除了增加习题外,新版书还在第 1 章中增加了雷达简史,并补充了偏振测量和数据处理的几个章节,RASS 一节也作了更新,还有一节关于风廓线雷达内容。另外,第 9 到第 11 章补充和更新了由 WSR-88D 观测到的新图片。这些图片来自于 R. L. Alberty 博士管理的 NOAA 雷达支持机构^①。V. Mazur 博士提供了新的雷电处理方法的素材,J. M. Schneider 博士和 Mei Xu 对第 10 章中有关行星边界层中湍流测量的内容提供了帮助。

作者

^① 该机构现在名称为雷达运行中心。

第一版前言

能远距离观测对人类产生危险的龙卷雷暴的内部运动状态是一件令人激动的事情。当多普勒雷达技术快速推广时,我们很幸运地及时将此技术应用于雷达气象学领域。廉价的数字电路使早期雷达理论很容易实现,由雷达工程师和气象学家开发的多普勒天气雷达技术很快在国家海洋与大气管理局(NOAA)的下一代雷达(NEXRAD)项目中得以应用。国家气象局(NWS)正计划用一个多普勒气象雷达网来取代现有老化的雷达系统。可以提供龙卷风和其它危险天气的预警技术还在继续发展中。多普勒天气雷达已经在一些预警风暴灾害的电视台中占有重要位置。

本书在很大程度上是以俄克拉何马州立大学的两位作者的雷达气象学课程讲义为基础。第 11 章有相当多的内容来自于 R. J. Doviak 早年在宾夕法尼亚州立大学执教的随机介质中波传播这一研究生课程。本书材料还被用于由技术服务公司向全国所提供的为期一周的雷达气象学课程中。我们在国家强风暴实验室中所获得的机会至关重要,特别是对于开发和应用远程测量强雷暴的多普勒雷达所必须的跨学科研究。这些研究建立了全面、详细的雷达设计,数字信号处理技术以及气象观测解释的理论和实践方法。

本书不同于其他书籍,是以加强雷达理论与观测和测量为目的,以便提高学生对多普勒雷达原理的理解,同样还为专业工程师和气象学者提供适时的讨论题。因此我们介绍了多普勒雷达观测到的龙卷涡旋,飓风以及闪电等。为了更好地将雷达观测与肉眼观测相联系,本书还提供了雷达数据与物理现象的关联照片,如:阵风锋,下击暴流和龙卷风。

虽然我们的重点是气象学,但这里所发展和讨论的理论和技术的也可应用于其他地球物理学学科。在具有离散目标随机分布的媒质中波的传输和散射特征,或是在用连续时空随机变化来描述其折射性质的媒质中波的传输和散射特征,同样可用于无风暴大气或海洋中,在这些地方波和湍流可以产生内在的物理现象,这可由工具(如:飞机,船只和火箭)穿过媒质或故意扰动媒质来研究其性质。那些通常对检测和跟踪交通工具更感兴趣以及将风暴看作是讨厌的杂波的雷达专家们,应该认识到书中描述的对天气现象的观测以及其性质的表征,对将目标回波最大化和将天气干扰最小化为目的的设计研究同样是很很有用的。

作者

符号表

以下是常用符号

a_e	有效地球半径
A_e	天线有效口径面积
B_n	噪声带宽
B_6	接收机—滤波器带宽, 6 dB 宽度
c	真空中的光速, 3×10^8 m/s
C_n^2	折射率结构参数
D_a	天线直径
D_e	等效球体雨滴直径
D_0	中值体积直径
E	电场强度
$E[x]$	随机变量“ x ”的期望值; 也记作 $\langle x \rangle$
f	频率
f_d	多普勒频移
f_N	奈奎斯特(Nyquist)频率
$f^2(\theta, \phi)$	方向图的归一化单程功率增益
g	重力常数(9.81 m/s)
g_t, g_r	发射和接收天线的功率增益
g_s	系统增益
$I(\mathbf{r}, \mathbf{r}_1)$	权函数
$I(t)$	复信号的同相分量
k	比衰减(m^{-1})
k	玻尔兹曼常数 [1.38×10^{-23} (J/K)]
k	电磁波数($2\pi/\lambda$)
k_c	由于云所造成的比衰减(m^{-1})
k_g	由于空气所造成的比衰减(m^{-1})
k_r	r 方向的风切变
k_θ	θ 方向的风切变

k_ϕ	ϕ 方向的风切变
K	比衰减(dB/km)
K	大气结构的波数($2\pi/\Lambda$)
K_{DP}	比差分相位(deg/km)
K_r	由于雨所造成的比衰减(dB/km)
K_s	由于雪所造成的比衰减(dB/km)
l	因为散射和吸收引起的单程传播损耗
$\ln$	自然对数
$\log$	以 10 为底的对数
l_r	有限带宽接收机损耗因子
L_r	$10\log l_r$ (dB)
m	水的复折射率
M	沿样本时间轴的信号样本(或样本对)数
M	液水含量
M_1	独立样本数
n	大气折射率
N	折射模数 $= (n-1) \times 10^6$
N	白噪声功率
N_s	地面折射模数($N_s=313$)
$N(D)$	滴谱
P_r	接收信号功率
P_t	峰值发射功率
P_w	水汽的分压
$P(\tau_s)$	瞬时天气信号功率
Q_w	总含水量
$Q(t)$	复信号的正交相位分量
r	至散射体距离
r_a	无模糊距离
r_t	涡旋半径
r_6	分辨体积的 6 dB 距离宽度
r_0	至分辨体积 V_6 中心的矢量距离
R	降雨强度
R_d	干空气的气体常数($287.04 \text{ m}^2/(\text{s}^2 \cdot \text{K})$)

$R(T_s)$	$V(nT_s)$ 的自相关函数
S	信号功率
$S_n(f)$	归一化功率频谱密度
SNR	信噪比
T	绝对温度(K)
T_s	脉冲重复时间(PRT)或采样时间间隔
T_v	虚温
v	速度
v_a	不模糊速度
v_r	速度的径向分量(多普勒速度)
V_6	分辨体积
$V(kT_s)$	第 k 个复数信号样本
w	垂直速度
w_i	末速(终速)
$W(r)$	距离加权函数
$\hat{x}$	$E[x]$ 的 M 样本估计
$\bar{x}$	x 的空间平均
Z	反射率因子
Z_e	等效反射率因子
Z_{DR}	差分反射率
α	天线旋转速度
δ	风向
ϵ	涡旋耗散率
η	反射率(单位体积截面积)
η_0	377Ω 空间阻抗
θ	天顶角(图 3.1);与圆对称波束轴的夹角;势能
θ_e	仰角
θ_i	半功率点之间的单程波束宽度
λ	电磁波波长
Λ	大气质量的结构波长(湍流)
γ	空气质量密度
ρ	迟滞空间中的距离
$\rho_{hv}(0)$	水平和垂直偏振回波信号的相关系数

ρ_w	水密度
σ_a	吸收截面[积]
σ_b	后向散射截面[积]
σ_d	由于水凝物不同落速所产生的频谱宽度
σ_e	消光截面[积]或衰减截面[积]
σ_o	由于水凝物方向变化和/或振动所产生的频谱宽度
σ_s	切变产生的频谱宽度
σ_t	湍流产生的频谱宽度
σ_v	多普勒速度频谱宽度
σ_a	天线旋转频谱宽度
σ_θ^2	双程方向图的二阶中心矩
τ	脉冲宽度
τ_s	距离时间延迟
ϕ	方位
ϕ_a	有效方向图宽度
ϕ_{DP}	差分相位
ω	角频率
ω_d	多普勒频移(rad/s)

目 录

序言

中文版前言

多佛版前言

第二版前言

第一版前言

符号表	(I)
第 1 章 绪 论	(1)
1.1 历史背景	(1)
1.2 本书内容安排	(5)
第 2 章 电磁波与电磁波传播	(7)
2.1 波	(7)
2.2 传播路径	(9)
习题	(18)
第 3 章 雷达及其工作环境	(20)
3.1 多普勒雷达(发射方面)	(20)
3.2 散射截面	(23)
3.3 衰减	(25)
3.4 多普勒雷达(接收方面)	(30)
3.5 实际应用中的考虑事项	(36)
3.6 模糊	(40)
习题	(42)
第 4 章 气象信号	(44)
4.1 气象信号采样	(44)
4.2 功率采样	(46)
4.3 信号统计	(47)
4.4 气象雷达方程	(49)
4.5 分布散射粒子的信噪比(SNR)	(56)
4.6 沿距离时间采样的相关性	(57)
习题	(58)
第 5 章 气象信号的多普勒频谱	(60)
5.1 气象信号的谱分析	(60)
5.2 气象信号频谱及其与反射率和径向速度场的关系	(73)

5.3 速度谱宽	(79)
习题	(81)
第6章 天气信号处理	(84)
6.1 谱矩	(84)
6.2 接收机中的天气信号	(84)
6.3 信号功率估计	(86)
6.4 平均频率估计器	(90)
6.5 谱宽估计器	(93)
6.6 最小方差约束	(97)
6.7 数据性能	(98)
6.8 相参偏振雷达的信号处理	(100)
6.9 结束语	(108)
习题	(109)
第7章 天气观测中需要考虑的因素	(111)
7.1 距离模糊	(111)
7.2 速度模糊	(113)
7.3 信号相参性	(113)
7.4 缓解模糊影响的技术	(115)
7.5 减少采集时间的方法	(123)
7.6 脉冲压缩	(126)
7.7 人为因素	(128)
7.8 扫描天线的有效方向图	(132)
7.9 天线副瓣	(134)
7.10 杂波	(137)
习题	(141)
第8章 降水测量	(143)
8.1 水滴大小分布	(143)
8.2 粒子下降末速度	(147)
8.3 降雨强度,反射率和液水含量	(149)
8.4 单参数降水测量	(152)
8.5 多参数降水测量	(161)
8.6 从多普勒频谱得到水凝物分布	(187)
习题	(194)
第9章 风、风暴及相关现象的观测	(196)
9.1 雷暴结构	(196)
9.2 双部多普勒雷达测量风场	(202)
9.3 单多普勒雷达测风场	(211)
9.4 强风暴	(230)
9.5 中尺度气旋和龙卷	(233)

9.6	下曳气流和出流	(246)
9.7	浮力波	(255)
9.8	大尺度天气系统	(261)
9.9	闪电	(267)
	习题	(269)
第 10 章	湍流测量	(272)
10.1	湍流统计理论	(272)
10.2	点速度和平均速度的空间谱	(280)
10.3	多普勒谱宽和涡旋耗散率	(290)
10.4	强雷暴中的多普勒谱宽	(291)
	习题	(300)
第 11 章	晴空大气观测	(302)
11.1	反射、折射和散射: 相参性	(302)
11.2	非均匀和湍流介质中波方程的表述	(303)
11.3	非均匀性散射场的解	(306)
11.4	小体积散射	(309)
11.5	共同体积的散射	(321)
11.6	折射率非均匀散射体的特征	(329)
11.7	晴空反射率观测	(338)
11.8	晴空中风、波、湍流的观测	(341)
11.9	其他晴空观测	(353)
	习题	(354)
附录 A	对流层中射线的几何关系	(356)
A.1	球分层介质中射线路径的积分	(356)
A.2	一个散射体的视在距离和仰角与其真实高度和大圆距离的关系	(357)
附录 B	作为样本时间函数的信号样本之间的相关性	(358)
附录 C	来自空间分辨体积回波的相关性	(360)
C.1	信号样本相关性与距离差 $c\delta\tau_s/2$ 的关系	(360)
C.2	来自方位间隔的分辨体积的信号的相关性	(361)
附录 D	波方程的几何光学近似	(364)
附录 E	格林 (Green) 函数的推导	(365)
参考文献		(367)
主题词索引		(393)

第1章 绪论

微波具有穿透云雨的特性,使得天气雷达在遥感探测大气方面拥有无可挑战的地位。虽然星载的可见光或者红外线照相机也能够探测和跟踪大气风暴,但是风暴的内部结构和风暴云层内部隐蔽的危险现象却是感光型照相机所无法探测和揭示的,而微波雷达恰恰可以做到。在强降雨云区,可见光辐射传播几米就会被完全吸收,这就使激光雷达(使用可见光辐射或者近可见光辐射的雷达)不能工作,所以无论是晴空还是云遮蔽的强降雨区,多普勒雷达是唯一可以检测风的运动轨迹并测量径向速度的遥感设备。这种独一无二的能力使得多普勒雷达成为研究风暴的风场、水场及其形成环境的优选手段。脉冲多普勒雷达技术已富有成效地应用于实时绘制强风暴内部的风场和雨场,显示早期龙卷气旋的发展、微下击暴流和其他风暴灾害。这种观测让天气预报员能够更好地提供预警信息,也让研究者能够更深入地了解风暴的生命周期和动力学。

1.1 历史背景

“雷达”(radar)这个术语是由美国海军的 S. M. Taylor 和 F. R. Furth 首先提出来的,并在 1940 年 11 月成为“无线电探测和测距(radio detecting and ranging)”设备的正式字首缩写。1943 年,二战盟国一致使用这个缩写词,之后便被国际社会所采纳。“无线电”(radio)这个词是可应用从波长 20 km 到波长分之一毫米的电磁波辐射的通用术语(波长 20 km 时频率为 15000 Hz——Hz“赫兹”是一个频率的单位,表示一秒内周期循环的次数,名称是为了纪念 Heinrich Hertz,他在 1886—1889 年实验证明 James Clerk Maxwell 提出的电磁波除波长外其他方面与可见光是完全一样的理论)。

文献中最早提到雷达概念的可能是 Nikola Tesla,他在 1900 年的 *Century Magazine* (1900 年 6 月,60 卷第 208 页)的文章中写到:“当我们提高声音并听到回声时,我们就知道声音一定是在某个距离上遇到了墙体,或者不同物质的界面,声波一定是从那个地点被反射回来的。与声波一样,电磁波也会发生反射……我们就可以判定目标的相对位置和移动路线,比如海面行船的相对距离或速度……”

第一次记录在案的通过无线电进行目标探测的验证是 Christian Hulsmeyer 在德国和英国发布的专利,此专利是一个通过电磁波来进行远处金属目标探测的方法。1904 年 5 月 18 日,他的设备在德国科隆市 Hohenzollern 桥进行了第一次公开演示,他用一束波长大约 40 到 50 cm 的无线电波(连续波)探测到了河上的船只(Swords,1986)。

尽管早在 1904 年就可以通过无线电“探测”到目标,但是直到发明了脉冲调制发射机和宽带接收机以后,脉冲“测距”技术的实现才成为可能。20 世纪最初的几年里,脉冲调制发射机和脉冲接收机的基本设计原理就已经为人们所知(例如在一战期间潜艇脉冲声呐探测技术得到了蓬勃发展),但是要把这些原理运用到实际设计无线电装备中,首先需要在产生高频电磁