



## 对流层电波传播研究与展望

赵振维, 林乐科

### Research and prospect of tropospheric radio wave propagation

ZHAO Zhenwei and LIN Leke

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12265/j.cjors.2023063>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 无线电气象学研究进展与展望(特邀文章)

Progress and prospect of radio meteorology research(Invited)

电波科学学报. 2020, 35(6): 801–812

#### 基于LoRa的无线电气象参数集成监测系统设计

Design of integrated radio meteorological parameter monitoring system based on LoRa

电波科学学报. 2020, 35(6): 943–948

#### 武汉大气波导出现特征及其对调频广播的影响

Characteristics of atmospheric ducts and its impacts on FM broadcasting in Wuhan

电波科学学报. 2020, 35(6): 856–867

#### 蒸发波导模型与微波超视距传播试验对比

Comparison of evaporation duct models and microwave transhorizon propagation experiment

电波科学学报. 2021, 36(1): 150–155, 162

#### 障碍物环境下电波传播的分区计算方法

Domain decomposition method for the wave propagation under the obstacle environment

电波科学学报. 2021, 36(1): 87–95

#### 基于全局透射边界条件的宽角抛物方程电波预测模型

Radio propagation prediction model based on wide-angle parabolic equation with non-local boundary condition

电波科学学报. 2019, 34(4): 473–478



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

赵振维, 林乐科. 对流层电波传播研究与展望[J]. 电波科学学报, 2023, 38(4): 591-609+656. DOI: 10.12265/j.cjors.2023063  
ZHAO Z W, LIN L K. Research and prospect of tropospheric radio wave propagation[J]. Chinese journal of radio science, 2023, 38(4): 591-609+656. (in Chinese). DOI: 10.12265/j.cjors.2023063

## 对流层电波传播研究与展望

赵振维\* 林乐科

(中国电波传播研究所 电波环境特性及模化技术重点实验室, 青岛 266107)

**摘要** 对流层电波传播特性是影响无线电系统性能的重要因素, 是电波传播研究的主要领域. 本文系统综述了近 60 年来中国电波传播研究所在无线电气象、地面无线电业务电波传播、空间无线电业务电波传播、电波传播效应对无线电系统影响评估等对流层电波传播不同方向开展的研究和取得的研究进展. 在此基础上, 最后给出了对对流层电波传播研究的展望.

**关键词** 对流层; 电波传播; 无线电气象; 大气折射; 雨衰减; 对流层散射; 大气吸收; 多径衰落; 湍流; 大气波导  
**中图分类号** TN911.23 **文献标志码** A **文章编号** 1005-0388(2023)04-0591-19  
**DOI** 10.12265/j.cjors.2023063

## Research and prospect of tropospheric radio wave propagation

ZHAO Zhenwei\* LIN Leke

(National Key Laboratory of Electromagnetic Environment, China Research  
Institute of Radiowave Propagation, Qingdao 266107, China)

**Abstract** The tropospheric propagation characteristics are important factors affecting the performance of radio systems, and are the main fields of radio wave propagation research. This paper systematically reviews the research and progress made by the China Research Institute of Radiowave Propagation in different directions of tropospheric radio wave propagation in the past 60 years, such as radio meteorology, radio wave propagation in terrestrial radio service and Earth-space radio service, and radio system impact assessment of radio wave propagation effects. On this basis, the prospect of radio wave propagation in the troposphere is given.

**Keywords** troposphere; radio wave propagation; radio meteorology; atmospheric refraction; rain attenuation; troposcatter; atmospheric absorption; multipath fading; turbulence; atmospheric duct

### 0 引言

电波传播特性是影响各类无线电系统性能的重要因素, 作为支撑无线电系统发展的重要技术基础, 电波传播研究和发展与无线电科学技术的发展密不可分. 从早期支持短波远距离通信的电离层传播研究到近年针对 5G、6G 移动通信高速率、大容量、低时延等需求开展的毫米波、太赫兹和光波电波传播的研究, 从支持无线电系统规划设计的电波传播统计预测到支持各类无线电系统使用和运行的电波传播的实时评估、短期预报与电波折射修正, 我国的电

波传播研究不断深入, 在无线电系统装备发展中发挥着越来越重要的作用.

我国的电波传播研究始于 20 世纪 30 年代, 1943 年建立的重庆电波观测站开始日常的电离层垂直探测, 并为“飞虎队”在缅甸对日作战短波通信提供电离层通信环境保障<sup>[1]</sup>. 新中国成立后, 为实现远距离微波超视距通信, 自 1957 年开始了对流层散射超视距传播实验和研究, 开创了我国对流层传播研究的先河. 1963 年国家整合电波传播研究力量, 成立了中国电波传播研究所(以下简称电波所), 针对不同频段无线电系统的发展, 开始了系统的电波环境观

收稿日期: 2023-03-01

资助项目: 国家自然科学基金(61971385)

通信作者: 赵振维 E-mail: zhaozw@crip.ac.cn

测、电波传播实验与研究工作. 自 20 世纪 70 年代我国恢复联合国席位后, 电波所牵头参与了国际电联电波传播研究组国内对口研究组的研究工作, 并将我国电波传播研究成果提交到国际电联, 制定和修订了一系列国际电联的电波传播标准.

对流层是指最接近地面的大气层部分, 地球两极对流层顶高为 8~10 km, 赤道附近及热带为 15~20 km, 中纬度地区平均为 10~12 km<sup>[2]</sup>. 对流层对无线电系统电波传播的影响主要分为晴空效应和水凝物效应. 晴空效应主要是由晴空温、湿、压等大气参数时空变化和大气中的湍流结构对无线电波造成的折射、散射、闪烁和散聚焦效应, 以及大气中水汽和氧气等气体分子对无线电波造成的吸收衰减. 水凝物效应主要是电波在与雨、雪、云和雾等水凝物相互作用时产生的散射、衰减和去极化等效应, 此外沙尘与气溶胶等传播效应与水凝物类似. 对流层电波传播对无线电系统的影响程度取决于系统的工作频率、传输方式、极化和仰角等系统参数. 随着频率的升高, 对流层环境对电波传播的影响越加显著, 如对微波频段几乎没有影响的云和雾现象, 会对毫米波、太赫兹波和光学频段无线电波产生重要影响. 由于绝大部分无线电系统的信号均须在在对流层传播或穿越对流层传播, 因此, 对流层电波传播研究是电波传播研究的主要领域之一.

本文系统回顾了电波所成立以来开展对流层电波传播研究所取得的主要成果, 主要章节安排如下: 第一部分介绍了无线电气象的研究情况, 包括无线电气象数据的统计、建模和数字地图研制, 无线电气

象参数的测量与遥感技术和无线电气象参数的预报技术等; 第二部分介绍了地面无线电系统对流层的电波传播特性研究情况, 包括无线电视距传播、超视距传播和地面移动信道传播特性研究等; 第三部分介绍了空间无线电系统对流层电波传播研究情况, 包括卫星固定链路的传播特性和卫星移动信道传播特性; 第四部分介绍了对流层电波传播对无线电系统的效应评估研究, 包括对测量精度影响与电波折射修正技术研究和对雷达、通信等系统影响评估技术研究; 最后给出了我们对对流层电波传播研究未来发展的展望.

同时, 在各部分也回顾了电波所在对流层电波传播不同方向的研究成果形成国际标准的情况.

### 1 无线电气象

影响对流层电波传播的环境因素与气象条件有关. 20 世纪 50 年代开展对流层散射传播实验的同时, 同步开展了实验区域气象数据的测量和收集工作, 电波所成立后, 成立了专门的无线电气象课题组, 开展我国无线电气象数据的系统收集和研

究. 无线电气象学是人们为了研究气象现象对无线电传播的影响规律而形成的一门交叉学科, 它主要研究对无线电波传播产生影响的大气环境参数的时空变化规律, 以及利用无线电波实现对云、雪、雨、雾和其他大气物理特性的遥感. 这些影响无线电波传播的大气参数随气象条件变化, 因此称为无线电气象参数. 无线电气象学通过研究无线电气象参数的变化规律, 为电波传播预测提供基础数据. 图 1 为主要无线电气象参数与对流层传播效应之间的关系<sup>[3]</sup>.

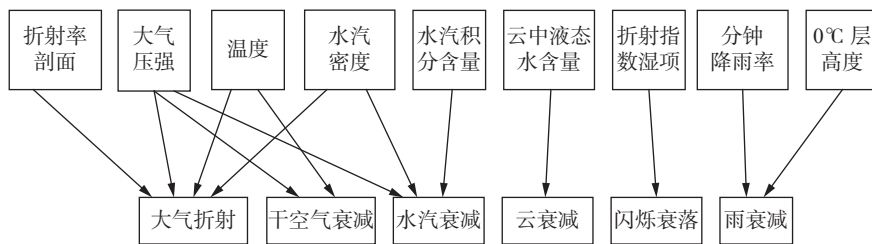


图 1 主要无线电气象参数与对流层传播效应对应关系<sup>[3]</sup>

Fig. 1 Correspondence between main radio meteorological parameters and tropospheric propagation effects<sup>[3]</sup>

#### 1.1 无线电气象参数统计特性研究

对流层电波传播预测是科学规划与设计无线电系统的必要环节, 是确定无线电系统链路可靠性指标的重要依据. 电波传播预测模式就是建立要预测的电波传播参量与链路参数(频率、极化、仰角和距离等)和无线电气象统计参数间的关系, 而无线电气象统计参数具有显著的地域差异性. 因此无线电气象的统计特性是实现对流层电波传播预测的基础,

获得无线电气象参数的统计特性需要依据长期的气象观测数据开展分析和统计研究, 并建立统计模型. 电波所自 20 世纪 60 年代以来, 对我国区域大气折射率、降雨率、雨顶高度、水汽含量、大气波导、沙尘等无线电气象数据开展了长期的统计和研究工作.

##### 1.1.1 晴空无线电气象参数

对流层折射率是晴空大气最基础的无线电气象参数, 利用气象站的地面观测数据和气象探空数据

即可转换得到地面的折射率和对流层折射率剖面数据<sup>[4]</sup>。20世纪60年代起,谢益溪对北京地区的大气折射特性和我国无线电气候的特点进行了研究<sup>[5-6]</sup>;张武良利用1957—1964年的气象数据对全国地面折射率的分布特性进行了研究,绘制了全国平均折射率等值线图,并按折射率的特点,将全国划分为9个气候区<sup>[7]</sup>。根据我国1970—1975年103个气象探空站数据,仇盛柏、林秀婉统计分析了我低空大气折射率梯度和水汽含量梯度特征,建立了全国分布模型和分区分布模型,并给出了我国地面折射率等参数的分布曲线<sup>[8]</sup>。仇盛柏、吴希德利用北京和长江中下游7个探空站的资料,得到了平均折射率随高度分布的指数模型,并获得了折射率梯度累计分布的幂指数模型<sup>[9]</sup>。陈祥明等通过比较认为Hopfield静力项模型和指数湿项模型能较好地反映实际的对流层折射率剖面,并利用历史探空数据改进了模型中的关键参数与地面气象参数的关系<sup>[10]</sup>。程显海等测量并研究了海上大气折射率的起伏特性<sup>[11]</sup>,郭相明等研究了海上大气折射率的相似性,以及湍流对大气折射率剖面的影响<sup>[12-13]</sup>。随着频率的升高,大气吸收衰减越来越大,并存在氧气和水汽等吸收峰,此时需考虑大气的复折射率。胡大璋、周兆先研究了大气复折射率随频率、压强等的变化,并给出了我国104个气象站低层大气复折射率的频率、时间和空间特性的计算结果<sup>[14]</sup>。

大气波导是在低层大气中使无线电波在某一高度上出现全反射的大气层结<sup>[15]</sup>,是一种特殊的折射率剖面结构。仇盛柏、刘成国、蔺发军等对大气波导进行了深入的统计和分析研究<sup>[16-20]</sup>。针对电波所在大气波导方面的研究,康士峰在本期期刊有关于大气波导的综述,所以本文不再详细介绍。

无线电气象参数的统计特性主要以等值线图和分区经验公式等形式表示,前期的研究成果大部分内容纳入了国军标《雷达电波折射与衰减手册》<sup>[21]</sup>。不论等值线图还是分区的经验模型,均无法反映无线电气象参数随空间的连续变化特征,并在不同分区的交界处产生电波传播预测结果的跳变,影响预测结果的可靠性。为了更准确地反映无线电气象参数的时空间统计分布,更方便、可靠地用于无线电系统设计和性能评估,借鉴数字地球的概念,21世纪初国际上开始采用不同时间概率的无线电气象参数数字地图取代原有的等值线图和经验模式<sup>[3]</sup>,其由于栅格数据本身隐含了地理位置信息,能够很好地反映环境参数空间连续分布,且可根据无线电台站位置确定无线电气象参数,提高了电波传播预测的可靠性。

21世纪初,电波所根据无线电气象参数数字地球化的趋势,结合我国卫星系统发展应用的需求,开展了我国无线电气象数据更系统的分析、统计和栅格化研究。刘玉梅、赵振维、林乐科等利用我国及周边地区1981—2000年20年1000余个地面气象站和100余个气象探空站的气象数据,经深入的数据处理、分析和统计研究,结合我国观测数据台站分布特点,建立了我国及周边地区地面折射率、折射率梯度、水汽积分含水量等多种无线电气象参数年平均、月平均和不同时间概率的数字地图<sup>[22-25]</sup>,并与ITU-R相关无线电气象参数数字地图的精度进行了比较,结果表明,基于我国及周边地区实测气象数据建立的无线电气象参数数字地图具有更高的精度。

近年来,郝晓静等利用全球892个探空观测站点2005—2014年10年的观测数据,建立了全球表面和悬空波导统计数字地图,新地图比ITU-R地图更精细地反映了大气波导的区域特征<sup>[26-27]</sup>。黄立峰等基于全球气象再分析同化数据进行了全球蒸发波导高度统计,形成了全球蒸发波导高度数字地图,其能够表征出蒸发波导高度的时空分布特征<sup>[28]</sup>。

### 1.1.2 降雨特性

降雨是影响10 GHz以上微波、毫米波系统性能的重要因素,降雨导致的信号衰减和去极化等传播效应与降雨的物理特性有关,包括降雨率、雨滴尺寸分布、下降速度等,而降雨传播特性的统计预测须采用雨顶高度和降雨率统计分布。自20世纪80年代起,电波所开始微波、毫米波降雨传播实验和理论研究,并开展了全国降雨率数据的收集和统计研究<sup>[29]</sup>,仇盛柏等收集了我56个气象台站10年降雨率数据,在此基础上得到了我国56个地区降雨率的年平均、月平均和最坏月累积分布,并在此基础上给出了0.01%时间我国降雨率累计分布的等值线图<sup>[30]</sup>。为深入研究降雨传播的机理,20世纪80年代起,电波所开展了雨滴尺寸、沉降速度参数的测量与研究。潘仲英利用照相法实测了雨滴尺寸分布、雨滴速度等,并和国际相关结果进行了对比分析<sup>[31]</sup>。80年代末,电波所引进了GBPP-100激光滴谱仪,对我国部分地区的雨滴尺寸分布、沉降速度等进行了测量,并开展了雨滴谱的建模研究<sup>[32-36]</sup>。测量地区有我国温带大陆性气候区(新乡)、温带海洋性气候区(青岛)和亚热带海洋性气候区(广州),赵振维给出了这3个区域的平均雨滴谱分布和一种计算雨滴末速度的经验公式<sup>[36]</sup>。测量数据和研究结果表明我国的雨滴尺寸分布较为接近,并与国际上常用雨滴尺寸分布有较好的一致性。林乐科等建立了Laws-Parsons雨滴尺寸分布的新解析模型,该解析模型可更好地用于40

GHz以上频段雨衰减预测<sup>[37]</sup>。

雨顶高度是用于预测星地链路雨衰减的关键参数,其通常用探空的0℃等温层高度近似。通过对我国31个无线电探空工作站1970—1979年10年探空数据的统计和分析,黄捷等给出了我国0℃等温层高度的全年平均及夏季(7、8、9月)平均特性<sup>[38]</sup>。刘玉梅、赵振维、林乐科等利用气象探空数据建立了我国雨顶高度数字地图<sup>[22-25]</sup>。林乐科等利用统计月平均降雨量在年平均降雨量中的比例作为月度权值,提出了一种年平均雨顶高度的加权算法,加权后的年平均雨顶高度与强降雨时的统计雨顶高度更为接近<sup>[39]</sup>。

雨衰减预测所需要的降雨数据是基于1 min积分时间降雨率统计得到的降雨率累积分布。但历史上从国内外气象部门得到的积分时间多为5 min、10 min,甚至更长积分时间的降雨数据,因此在实际使用中须将5 min及更长积分时间的降雨率累积分布转换为1 min积分时间降雨率累积分布。基于实际测量数据,仇盛柏等给出了我国海口、广州、南京、重庆、新乡、长春等6个城市10 min、5 min降雨率和1 min降雨率的换算公式<sup>[40-42]</sup>。林乐科等通过对数据的进一步分析和研究,提出了可适用于我国不同区域的统一不同积分时间降雨率的转换模式<sup>[43]</sup>,并根据我国56个地区的10 min降雨率累积分布数据,转换得到1 min累积分布数据。在此基础上,林乐科建立了我国降雨率累积分布数字地图<sup>[44]</sup>。此后,在对全球不同国家转换数据分析研究的基础上,赵振维、林乐科进一步建立了全球的统一转换模式<sup>[45]</sup>,这一模式曾形成了国际电联标准P.837-5建议书<sup>[46]</sup>。

降雨最坏月累积分布是无线电系统最坏月性能指标设计的重要数据,但国际上得到的大多数降雨数据是年平均累积分布数据,这就要求提供最坏月分布和年平均分布之间的转换模式。仇盛伯等根据中国56个台站的10年累积数据获得了各站的转换参数<sup>[30]</sup>。在此基础上,通过对转换数据的深入分析,赵振维、林乐科等将我国分为南方、北方、戈壁3个区域,建立了我国降雨率的分区转换模式又再通过对全球不同地区的转换模式进行深入研究,将全球分为热带亚热带和温带常湿区与温带、极区和戈壁两个区域,建立了全球适用的分区转换模式<sup>[47-48]</sup>。这一分区模式于2005年被纳入国际电联标准P.841-4建议书<sup>[49]</sup>,并一直保留到最新版本的建议书。

### 1.1.3 沙尘特性

20世纪90年代,电波所开展了沙尘、烟雾的毫米波传播实验和理论研究工作。为了分析沙尘暴对毫米波传播影响机理,赵振维测量了33.5 GHz和93 GHz的沙尘介电特性<sup>[50]</sup>。胡大璋测量了黄河滩区的沙尘粒径分布和形状<sup>[51]</sup>。董庆生系统讨论了我国塔克拉玛干沙漠等典型沙区的沙尘浓度、粒径分布、形状分布、介电特性等物理特性及其受环境因素的影响<sup>[52]</sup>。

## 1.2 无线电气象参数测量与遥感技术

气象观测也是无线电气象测量的重要手段,但通过无线电手段直接测量或遥感无线电气象参量,也为气象环境遥感提供了手段,由此产生了雷达气象学和GPS气象学等交叉学科。无线电气象参数的实时遥感还可为实时评估气象环境的变化对电波传播和无线电系统性能影响提供输入数据。

### 1.2.1 大气折射率的测量

微波折射率仪是测量大气折射率的高精度仪器,其通过大气折射率变化引起微波谐振腔的谐振频率变化测量折射率及其快速变化,其测量精度远高于气象测量。鲁崇德等人研制了我国第一代微波折射率仪<sup>[53]</sup>,徐海、潘中伟对无线电探空仪和微波折射率仪在相同的地区进行了对比测量,两种仪器的探测结果基本一致<sup>[54]</sup>。潘中伟等对利用微波折射率仪测量的大气湿度和测量精度进行了分析,结果表明测量精度与温度有关,温度为正时测量精度小于1%<sup>[55]</sup>。张培哲等利用微波折射率开展了蒸发波导的测量<sup>[56]</sup>。

### 1.2.2 微波辐射计反演大气折射率剖面

微波被动遥感是利用环境的自然微波辐射测量反演环境参数的遥感技术。结合精度电波折射修正应用,电波所是国内最早自主研发微波辐射计的单位之一,自20世纪80年代起研制了多种不同体制的微波辐射计<sup>[57-62]</sup>。李江漫等开展了微波辐射计自定标技术研究,提高了微波辐射计的自定标精度<sup>[61-62]</sup>。赵振维、林乐科、王波等发展了包括线性和非线性回归算法、神经网络算法、相关向量机算法等微波辐射计反演大气折射率剖面算法<sup>[63-66]</sup>。图2为电波所研制的多通道微波辐射计,图3为辐射计反演大气折射率剖面与气象探空结果的比较,可以看出,反演剖面与实测剖面有很好的-一致性。微波辐射计还可用于云含水量和降雨率的反演。



图 2 微波辐射计

Fig. 2 Microwave radiometer

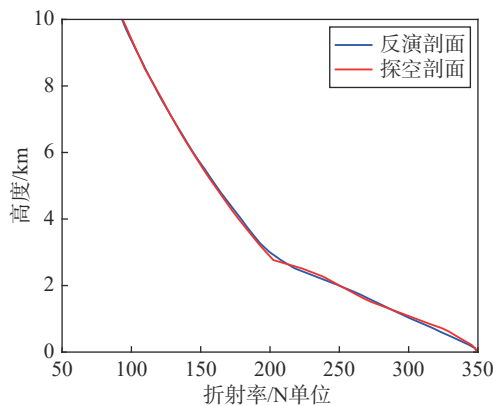


图 3 微波辐射计反演折射率剖面

Fig. 3 Retrieving refractivity profile by microwave radiometer

### 1.2.3 基于外辐射源的折射率剖面反演技术

全球卫星导航系统 (Global Navigation Satellite Systems, GNSS) 被广泛应用于水汽的反演, 并得到大量学者的研究, GNSS 信号成为用于大气遥感的重要外辐射源. 21 世纪初, 电波所开展了利用 GNSS 信号反演大气折射率剖面 and 大气波导的研究. 朱庆林等提出了基于 GNSS 高精度单点定位 (precision single point positioning, PPP) 方法和国际 GNSS 服务 (International GNSS Service, IGS) 超快速星历, 利用单站地基 GNSS 接收信号实现低高度角 ( $<5^\circ$ ) 对流层斜延迟的实时估算方法, 该方法获取的斜延迟误差小于 5%<sup>[67-68]</sup>. 林乐科等基于 GNSS 实时估算对流层斜延迟、斜延迟梯度和相关向量机算法, 提出了基于地基单站 GNSS 的对流层折射率剖面实时反演方法<sup>[69-71]</sup>. 在此基础上, 董翔等结合再分析数据提出了反演海上折射率剖面的方法<sup>[72]</sup>, 还结合历史探空数据建立了我国佳木斯、喀什、三亚地区的折射率剖面反演算法<sup>[73]</sup>. 针对大气波导的特殊折射率剖面结构, 王红光开展了地基 GNSS 反演大气波导的方法和实验研究, 实现了大气波导剖面的反演<sup>[74]</sup>. 王波等提出了利用 GNSS-R 信号反演大气波导方法, 并进行了实验验证<sup>[75-76]</sup>.

随着各种无线电系统的发展, 除 GNSS 信号外, 大量具有位置信息的无线电信号越来越多, 例如, 机载广播式自动相关监视 (automatic dependent surveillance-broadcast, ADS-B) 信号、船载船舶自动识别系统 (automatic identification system, AIS) 信号等. 近年来, 电波所利用 ADS-B 和 AIS 信号开展了电波传播和大气折射环境遥感的研究, 王倩南等开展了基于机载 ADS-B 信号的地空电波传播实验及大气折射环境对其传播影响的分析, 结果表明了 ADS-B 信号传播与无线电气象的相关性<sup>[77]</sup>.

### 1.2.4 雨和雾物理特性反演

自 20 世纪 80 年代起, 结合毫米波传播特性研究, 电波所开展了雨和雾的遥感技术研究. 胡大璋、黄捷开展了多频率雨衰减反演路径平均雨滴尺寸分布的方法研究, 获得了路径平均雨滴尺寸分布<sup>[78]</sup>. 张威使用气象雷达开展了青岛地区降水空间结构的定量观测与研究<sup>[79]</sup>. 赵振维等利用青岛、广州和新乡地区实测的雨滴尺寸分布, 建立了这些地区常规气象雷达和多参数气象雷达测雨算法模型, 这些可分别应用于我国温带、亚热带海洋性气候区和温带大陆性气候区的雷达测雨<sup>[80]</sup>. 赵振维、吴振森提出了一种利用毫米波衰减和能见度确定雾滴谱特征的方法<sup>[81]</sup>. 赵振维等建立了平流雾和辐射雾的雷达反射因子与雾的能见度和含水量的关系式<sup>[82]</sup>.

### 1.2.5 无线电气象参数的短期预报

通信、广播、雷达、导航、测控和遥感等无数无线电系统已融入人们日常生活、科研生产、宇宙探索、军事活动等人类活动各个领域. 大气波导、降雨等对无线信号产生的超视距传播和信号严重衰落, 将严重影响相关无线电业务的使用, 预报气象变化对无线电系统的影响对重大社会和活动的任务规划、装备使用的效能评估、不同无线电业务的共存分析等具有越来越重要的作用. 电波所长期致力于跟踪气象科技的发展, 将气象预报技术用于电波传播的预报.

20 世纪 70 年代, 张汝源就利用天气形势图来预报海上超视距信号传播, 发现了传播路径上高气压区 (反气旋)、低气压区 (气旋)、锋面、降水等过程与超视距信号传播的相关性<sup>[83]</sup>. 2007 年张玉生等开展了利用海雾遥感和天气形势进行海上大气波导预报的研究, 发现大气波导结构的发生与天气形势的过渡和变化有关系<sup>[84]</sup>.

21 世纪以来, 电波所开始将 MM5、WRF 和 MM5V3 等数值模式用于无线电气象参数的数值预报. 张玉生、韩杰等开展了大气波导数值预报技术研究<sup>[85-87]</sup>, 研制了大气波导数值预报系统, 并实现了大

气波导业务化发布. 韩杰等利用深度学习开展了蒸发波导高度临近预报<sup>[88]</sup>. 张守宝等基于 WRF 模式开展了雨衰减短期预报方法的研究<sup>[89]</sup>. 基于数值天气预报模式还实现了折射率剖面、折射率梯度、大气结构常数等无线电气象参数的预报.

## 2 地面业务电波传播特性研究

地面业务是指无线电台站位于地面或对流层近地空间的无线电业务, 包括固定业务、移动业务、广播业务等, 其传播特性包括地面点对点视距传播和超视距传播、地面和地空移动信道传播.

### 2.1 无线电视距传播特性

地面点对点视距链路在微波中继等领域有广泛的应用, 其主要受大气衰减、绕射衰落、多径衰落、降雨衰减、去极化等传播特性的影响.

#### 2.1.1 视距晴空传播特性

视距晴空传播效应主要是由于大气折射率梯度的变化导致路径余隙、多径和无线电视距变化, 进而导致绕射衰落、多径衰落和无线电系统覆盖范围的变化, 同时须考虑大气吸收的影响.

自 20 世纪 60 年代末电波所开始进行微波视距链路传播实验和理论研究<sup>[90]</sup>, 并较早注意到相位的影响<sup>[91]</sup>. 郑汀慈开展了水上视距链路的传播实验, 取得了不同天线高度下传输损耗、衰落特性、去极化效应等实验数据<sup>[92]</sup>. 张明高在假定折射率梯度为幂指数型的条件下, 对微波视距电路由于绕射、地反射、层反射所引起的衰落进行了分析, 得出了一种信号累计分布的表达式<sup>[93]</sup>. 胡大璋根据我国的折射指数梯度分布测量结果, 对 K 型衰落进行了研究<sup>[94]</sup>. 张业荣、赵雄文、谢益溪等研究了频率选择性衰落模拟、实验以及与气象条件的关系, 分析了平衰落深度与频率选择性衰落等概率值之间的相关性<sup>[95-99]</sup>.

靳慧群等导出了交叉极化分辨率 (cross-polarization discrimination, XPD) 和同极化衰减 (co-polar attenuation, CPA) 的概率分布函数的解析表达式以及 XPD 和 CPA 等概率值之间的线性关系<sup>[100]</sup>. 谢益溪、赵雄文等开展了多径去极化现象实验, 并进行了 XPD 与 CPA 统计分布的计算机模拟研究<sup>[101-102]</sup>.

谢益溪、赵雄文等开展了视距链路的绕射实验、不同类型障碍物绕射场的理论分析和经验建模研究, 得到的经验模型表达式更简洁, 便于工程应用<sup>[103-108]</sup>.

王健、胡冉冉等开展了平原、山区、喀斯特地形以及南海地区的调频广播、海事通信、航空通信等不同业务的测试, 并针对 ITU 方法进行修正, 得到了区域精细化的预测结果<sup>[109-113]</sup>.

为了更好表征大气折射对无线电台站覆盖范围

的影响, 胡冉冉等分析了不同时间概率下我国近地面 65 m 和 1 km 大气折射率梯度的区域变化特征, 定义了一种无线电视距因子, 以表征无线电视距相对标准大气视距的变化, 分析得到了不同时间概率下我国区域无线电视距因子的时空分布<sup>[112, 114-115]</sup>, 并研究了折射率梯度与地面折射率的关系.

大气衰减是影响包括视距链路在内所有无线电系统性能的重要因素, 特别是对于毫米波以上频段无线电系统. 胡大璋研究了我国低层大气吸收衰减率随频率、地区、海拔高度、时间的变化特性<sup>[116]</sup>. 张明高在大气吸收特性深入研究的基础上, 提出了一种计算 0~350 GHz 大气吸收衰减率的简化模式<sup>[117]</sup>, 1999 年被纳入了 ITU-R P.676-4 建议书<sup>[118]</sup>. 李海英等将温度引入干空气等效高度, 将温度与湿度引入水汽等效高度, 提出了一种计算穿越对流层大气衰减的大气等效高度模式<sup>[119-120]</sup>, 提高了大气衰减预测精度, 该模式被纳入了国际电联 ITU-R P.676-12 建议书<sup>[121]</sup>. 卢昌胜等<sup>[122]</sup>利用 HITRAN (high-resolution transmission molecular absorption database) 谱线数据开展了太赫兹波段大气吸收的研究.

#### 2.1.2 视距非晴空传播特性

随着频率的升高, 特别是毫米波以上频段, 降雨、云雾、沙尘等大气非晴空传播效应的影响越来越严重, 特别是降雨传播一直是全球电波传播的热点, 也是电波所 20 世纪 80 年代以来的重要研究方向.

粒子散射特性是研究降雨和云雾等传播特性的基础. 潘仲英利用 Mie 理论对雨滴的散射特性进行了计算, 并将理论计算的雨衰减与实验数据进行了对比<sup>[31]</sup>. 胡大璋针对冰雹、盐雾等的毫米波散射计算, 给出了双层同心球散射的解析解<sup>[123]</sup>. 张在峰分析了毫米波段干雪粒和湿雪粒的电磁散射特性<sup>[124]</sup>. 为了解决大尺寸球形粒子递推算法发散的问题, 赵振维等给出了一种计算大尺寸圆球 Mie 系数的简单方法, 可用于计算任意大尺寸有耗球的 Mie 散射计算<sup>[125]</sup>, 林乐科等将 Mie 散射不同递推方法进行了对比, 进一步证明了该方法的有效性<sup>[126]</sup>.

20 世纪 80 年代初, 电波所开展建立了 12、25.3 和 33.5 GHz 地面实验电路用于积累雨衰减数据, 新乡统计数据被纳入了 ITU-R 数据库. 董庆生和赵振维等分别对青岛地区和广州地区雨衰减的实测结果进行了分析和研究<sup>[127-128]</sup>. 付耀宗和章秀麓等分别建立了雨衰减预报模式, 并分析了国内外不同模式的预测精度<sup>[129-130]</sup>. 赵振维等建立了雨衰减率解析模式, 可以替代大量频率的列表参数<sup>[131]</sup>, 此模式提交 ITU-R 后, 促进了 ITU-R P.838 建议书的修订.

2005 年赵振维等提出了一种视距雨衰减预报模

式,有效提高了预测精度<sup>[132-133]</sup>,在ITU-R被称为中国2005模式,该模式于2012年被ITU采纳,形成了ITU-R P.530-14建议书,并沿用至今<sup>[134]</sup>.传统雨衰减模式均通过预测0.01%时间雨衰减转换到其他概率的雨衰减.21世纪以来,全概率预测方法(直接利用降雨统计数据预测同概率雨衰减)成为雨衰减研究的趋势,赵振维等<sup>[135]</sup>基于指数雨胞分布建立了一种视距雨衰减模式,进一步改进了预测精度.2013年赵振维等<sup>[136]</sup>提出了利用降雨率调整因子替代传统的路径调整因子,并用于地面和地空同形式的雨衰减预测.卢昌胜等建立了基于降雨调整因子的雨衰减预测方法<sup>[137]</sup>.在5G移动通信短距离毫米波雨衰减预测时,人们发现短距离雨衰减实测值远大于理论值,张鑫、赵振维等分析了短距离雨衰减数据,认为湿天线效应是主要原因,建立了湿天线衰减与降雨率的关系,并据此建立了包括湿天线衰减的雨衰减预测模式<sup>[138-139]</sup>.在持续改进过程中,先后产生了中国2008、中国2012、中国2017等模式,推动了ITU-R模式的进一步改进.

黄捷、胡大璋研究了不同频率雨衰减的转换方法,提出了一种经验转换模式<sup>[140]</sup>.赵振维基于雨致交叉极化理论的二阶小变量近似,建立了一种预测雨致交叉极化经验模式<sup>[141]</sup>,并研究了30~90 GHz差分衰减与交叉极化鉴别度之间的关系<sup>[142]</sup>.

雾是影响毫米波以上频段无线电系统性能的重要因素,20世纪90年代起电波所开展了雾衰减的测量和理论研究.沈广德等开展了海雾对8 mm和3 mm波衰减和闪烁的测量与分析<sup>[143-144]</sup>.赵振维等提出了一种计算1~1 000 GHz云雾衰减的经验模式,较其他模式具有更好的计算精度<sup>[145]</sup>.赵振维等还研究了雾对10.6  $\mu\text{m}$ 红外波的衰减,提出了计算10.6  $\mu\text{m}$ 红外波段辐射雾和平流雾衰减的经验公式<sup>[146]</sup>.对云雾的毫米波和红外衰减特性及云雾的雷达后向散射特性进行了系统的研究和分析,赵振维等提出了一种频率和温度适用范围更宽、计算精度更好的云雾衰减经验模式<sup>[147]</sup>,研究得到了云雾衰减和雷达反射因子与云雾含水量或能见度的经验关系,提出了两种用于云雾滴谱特征遥感的理论方法<sup>[81]</sup>.

电波所还多次开展了沙尘环境毫米波通信实验.董庆生等介绍了在黄河岸边开展的实验概况和实验结果分析<sup>[148]</sup>.董庆生、赵振维<sup>[149]</sup>利用风洞模拟进行了沙尘暴毫米波传播实验.

近年来,针对MIMO视距通信的应用,考虑传播环境变化对相位的影响.张蕊等分析了不同大气折射条件对于MIMO视距链路相位的影响,并利用气象数值预报的大气波导实现对相位扰动的预测,以

辅助支持对通信系统性能的影响评估<sup>[150]</sup>.

## 2.2 超视距传播特性研究

对流层散射是实现超视距通信的重要手段,且是恒定存在的超视距传播机理.大气波导是一种反常的大气结构,其发生时可显著增强超视距信号的强度和传播距离,在传播预测时一并考虑两者的影响.对流层散射通信系统常用的频段为100 MHz~10 GHz,其单跳通信距离一般为300 km,最远可超过1 000 km,其容许的带宽为数百千赫至几兆赫兹<sup>[151]</sup>.是除卫星通信外,实现超视距宽带传输的主要手段.

### 2.2.1 实验研究

为解决超视距大容量通信问题,1957年起我国开展了一系列对流层散射传播实验研究<sup>[1]</sup>.首先在华北地区设立了4个几乎位于同一大圆路径上的测试站,其中一个站发射VHF和UHF两个频段的信号,其余3个站同时接收.各接收站距发射站分别约为100、200、300 km.1960年以后,为了研究天线高架对对流层散射传播信号的影响,在3 km高的五台山顶和大圆距离为250、410 km的平地设立了收发站.为了研究海上超视距电路的传播特性,在上海至青岛之间537 km的电路路上,用VHF和UHF两个频段同时进行了测量.20世纪70年代初期,在长达892 km的电路路上开展了2.1 GHz对流层超视距传播实验.除传播损耗和衰落特性测试外,还进行了各种分集接收实验<sup>[152-153]</sup>,利用长期的数据积累获得了各种对流层超视距传播的统计数据,为理论和建模研究奠定了数据基础.

### 2.2.2 理论与建模研究

自20世纪50年代起,我国开展了大量对流层散射传播理论和建模研究.吕保维从湍流理论出发,推导了散射截面的通用表达式<sup>[154]</sup>.吴德炎研究了散射信号的衰落特性,得出了衰落深度、衰落频率和衰落持续期的经验模式<sup>[155]</sup>.熊皓对层反射在对流层远距传播中的作用做了探索<sup>[156]</sup>.沙踪在8条测试电路测试结果的基础上,得到一种预测传输损耗中值的半经验模式<sup>[53]</sup>.张明高对对流层传播机制进行了综合研究,基于考虑湍流和层反射的广义散射理论模型,导出了广义散射截面<sup>[151]</sup>,并利用全球对流层散射传播数据,建立了全球适用的对流层传输预测方法.该方法将全球分为8个气候区,分别给出了预测模式中对对应的气候参数,该方法形成了ITU-R.P.617-1建议<sup>[157]</sup>,是我国最早形成的国际电信标准之一.

为解决不同气候区交界区域预测结果的跳变导致无法预测同一气候区内散射特性存在的显著差异问题,2015年,李磊等基于全球地表折射率和折射率

梯度数字地图建立了新的对流层超视距传播预测方法<sup>[158-159]</sup>,新方法实现了不同区域的连续预测,提高了预测精度;还结合小时间概率大气波导超视距传播损耗预测,给出了包含对流层散射和大气波导的路径损耗的预测方法.同时,李磊等还建立了最坏月对流层散射损耗与年平均损耗的转换模式,用于替代原 ITU-R P.617 建议书中不同气候区最坏月与年平均传输损耗差值图<sup>[160]</sup>.这些新的预测方法于 2017 年形成了 ITU-R P.617-4 建议书<sup>[161]</sup>.2019 年,张利军等导出了地球表面到公共散射体最低点高度的解析表达式,并给出了低仰角、对称链路近似的适用条件<sup>[162]</sup>,进一步修订形成了 ITU-R P.617-5 建议书<sup>[163]</sup>.此外,张利军等还提出了一种预测高仰角对流层散射损耗的改进方法,提高了预测精度<sup>[164]</sup>.

除了统计建模外,张利军等研究了对流层散射传播偏移损耗的理论计算方法<sup>[165]</sup>.李磊等利用宽角抛物方程研究了对流层散射的数值算法,给出了确定算法最大传播角和最大计算高度的方法<sup>[166]</sup>.赵强等利用射线追踪对对流层散射信道进行了研究<sup>[167]</sup>,并建立了对流层散射传输损耗与大气折射率结构常数的关系<sup>[168]</sup>.

### 2.3 地面移动信道传播特性研究

为满足移动通信技术的发展需求,20 世纪 80 年代起,电波所在广州首先开展了移动通信电波传播实验,获取了接收信号的衰落特性,以及信号强度随距离和天线高度的变化数据<sup>[169]</sup>.章秀麓和牛振清根据北京、广州、郑州等地的 450 MHz 和 900 MHz 测试数据,给出了快慢衰落统计特性<sup>[170-171]</sup>.张明高利用我国移动传播实验数据,检验了已有预测方法在我国城市和郊区的适用性<sup>[172]</sup>,对 ITU-R P.529 模式的距离因子进行了指数修正,并将模式适用范围从 20 km 拓展到 100 km,改进后的模式形成了 ITU-R P.529-2 建议<sup>[173]</sup>.

针对 4G/5G 移动通信的发展,张雅彬等开展了利用三维射线追踪技术对城市微小区进行电波传播的仿真模拟工作<sup>[174-175]</sup>.侯春枝等研究了墙面粗糙度对毫米波传播的影响<sup>[176-177]</sup>.电波所于 2016 年建立了毫米波段 MIMO 信道测试系统,持续开展了城市小区、商场、会议室、办公区、火车站、体育馆等多种室内外场景移动信道的测量,部分测试结果提交国际电联<sup>[178-179]</sup>.刘永胜、侯春枝等研究了采用高增益天线旋转测试替代全向天线的方法,同时在会议室进行了 65.5 GHz 频段的信道测量<sup>[180-181]</sup>.张蕊等将 ITU-RP.1238 建议书中传播模型的列表参数,根据视距和非视距传播条件,按 6 GHz 以下和 6 GHz 以上频段进行分类,建立了室内视距和非视距传播的平均

模式<sup>[182]</sup>.张蕊等利用侧向绕射分析了地物杂散损耗,并提出了一种确定性杂散损耗预测方法<sup>[183-184]</sup>.

## 3 空间无线电系统电波传播研究

空间无线电系统主要指卫星搭载的无线电系统及其地面应用系统.空间无线电系统电波传播分为地-空固定链路和移动链路电波传播特性,赵振维等编著的《卫星系统电波传播》系统总结了相关电波传播预测方法<sup>[2]</sup>.

### 3.1 地-空固定链路传播特性研究

对于同步卫星和地球站间的地面-空间固定链路,其路径穿越整个对流层大气,对流层中的气象过程会对不同频段的卫星信号产生不同影响.电波所自 20 世纪 80 年代开始,利用相关卫星信标开展了地-空传播实验和理论研究工作.董庆生等分析了星地路径降雪的传播效应,分析表明降雪事件引起的路径衰减通常包含两部分的衰减效应:一部分为由路径上空的降雪引起的信号衰减;另一部分为天线口面上的积雪层引起的信号衰减,天线口面积雪除直接引起信号衰减外,积雪导致的天线方向图变化也是引起信号衰减的重要因素<sup>[185-186]</sup>.仇盛柏利用我国 65 个台站的降雨数据分析了 12 GHz 卫星的雨衰减特性<sup>[187]</sup>.沈广德、黄捷研究了 C 波段地空链路大气闪烁与地面气温的相关性,与中纬度地区电离层闪烁衰落随频率变化的对比分析表明,C 波段对流层闪烁已成为闪烁的重要原因<sup>[188]</sup>.

降雨衰减是 10 GHz 以上频段地空传播首要的考虑因素,在前述建立地面雨衰减预测模式的同时,赵振维、张鑫、卢昌胜等持续对地空雨衰减模式进行了改进,并提交国际电联,先后产生了中国 2005、中国 2008、中国 2012、中国 2018 等模式<sup>[189-194]</sup>,其中中国 2018 模式为考虑了湿天线效应的雨衰减模式.赵振维等分析了 ITU-R 雨衰模式和近 20 年提交 ITU-R 各国模式的预测性能,对比分析结果表明,除中国 2018 模式外,其他模式均存在不合理的奇异性,而中国 2018 模式在消除所有奇异性的同时,还具有最好的预报精度<sup>[195]</sup>.

交叉极化效应是影响卫星通信系统极化正交信道性能的关键因素.林乐科等建立了基于二阶小变量近似的雨致交叉极化鉴别度的预测模式,该模式较 ITU-R 模式预测精度有所提高<sup>[196]</sup>.

雨衰减的动态特性是卫星系统抗衰落措施的重要依据.赵振维等基于海口站测量的雨衰减数据,建立了一种雨衰落斜率预测模式,其在该地区具有最好的预测精度<sup>[197]</sup>.吕兆峰等利用灰色理论开展了雨衰减时间序列的短期预报方法研究<sup>[198]</sup>.张守宝等基

于 WRF 气象数值模式实现了地空雨衰减的短期预报<sup>[89]</sup>。

针对红外波段 20~275 THz 地-空传播预测,张鑫等建立了预测 Mie 散射衰减的经验模式<sup>[199]</sup>,该模式形成了 ITU-R P.1622-1 建议书<sup>[200]</sup>。

### 3.2 卫星移动传播特性研究

卫星移动业务包括卫星移动通信、卫星导航、卫星移动广播等众多重要场景。卫星移动传播又分为卫星航空移动、海事移动和陆地移动的电波传播。卫星移动电波传播除考虑与固定业务相同的雨衰减、云雾衰减和大气吸收等传播效应外,还须重点考虑海面地形地物的影响。

20 世纪 90 年代,针对海事卫星的通信需求,张明高研究了海面镜反射衰减和漫反射平均功率的计算方法,提出了粗糙和非粗糙海面多径衰落预测方法,同时提出了平静海面镜反射效应的抑制技术<sup>[200-201]</sup>,并形成了 ITU-R P.680-2 建议书<sup>[202]</sup>。针对陆地移动卫星业务中路边树林遮蔽效应,电波所利用直升机和车载设备模拟卫星移动通信,在华北地区开展了大量的路边树林遮蔽效应模拟实验。张明高、康士峰根据测量数据的统计分析,对已有模式进行了改进,提高了预测精度<sup>[203]</sup>。余运超等利用气象卫星信标开展了遮蔽环境衰落实验,实验表明实测遮蔽数据符合对数正态分布<sup>[204]</sup>。

针对不同标准所涉及到衰落深度表述不一致的问题,张蕊等通过对衰落深度的分析,给出了衰落深度的定义<sup>[205]</sup>,并给出了衰落深度的计算方法,其被修订形成了 ITU-R P.680-4 和 P.682-4 建议书<sup>[206-207]</sup>。

## 4 对流层对无线电系统影响评估技术

无线电系统除系统设计须利用电波传播统计预测结果,评估系统的整体性能,如设备余量、通信可通率、系统的平均作用距离等外,还须评估电波传播效应对其使用的战术性能影响,如定位精度等,并对其进行补偿和修正,以保障装备技术指标的实现。

### 4.1 对测量精度的影响与电波折射修正技术研究

大气折射效应对无线电外测系统的角度、距离、速度测量精度具有重要影响。评估和修正大气折射误差,对于高精度无线电测速定位系统、天文测量、大地测绘、GNSS 等系统都是至关重要的。江长荫、张明高编写的《雷达电波传播折射与衰减手册》<sup>[21]</sup>和黄捷主编的《电波折射误差修正》<sup>[208]</sup>,系统地总结了折射修正方面的技术成果。

自 20 世纪 60 年代开始,随着我国航天测控高精度定轨的需求,电波所开始进行电波折射修正的研究<sup>[208-209]</sup>。随着测量精度要求的不断提高,除考虑大气

折射的垂直梯度外,还须考虑大气水平不均匀性造成的折射误差。颜德贵分析了对流层水平不均匀性对大气折射的影响,发现在山区这种影响更加显著<sup>[210]</sup>。江长荫研究了低仰角无线电定位测速的大气层电波传播误差<sup>[211]</sup>。江长荫、黄捷利用差分方法导出了任意大气层折射误差修正公式,实现了雷达测速和定位的折射误差修正<sup>[212]</sup>。张瑜研究了考虑水平变化和时间变化的大气折射指数模型,提高了修正精度<sup>[213]</sup>。程显海研究了利用微波辐射计亮温直接进行大气折射修正的方法<sup>[214]</sup>。林乐科等基于参考标准大气研究给出了预测星地链路仰角误差的经验模式<sup>[215]</sup>。江长荫、黄捷等研究了大气折射误差的残差模型<sup>[216-217]</sup>。

黄捷、杨志强等对对流层折射误差简化模式开展了研究<sup>[218-219]</sup>。孙方等分析了大气折射引起的卫星测控系统速度误差,给出了仰角误差修正量的简易算法<sup>[220]</sup>。贾瑞进分析了大气折射误差修正精度的实验结果<sup>[221]</sup>。针对机载和星载雷达的俯视图测量,江长荫、王被德研究了机载与星载雷达的俯视图大气折射修正<sup>[222]</sup>。吴希德等研究了低层大气折射对俯视图雷达临界俯角的影响<sup>[223]</sup>。刘玉梅等研究了光学测量系统大气射误差修正方法<sup>[224]</sup>。

近年来,随着雷达、测控等装备对定位、定轨精度要求的不断提高,电波所将基于非合作源的大气折射率剖面反演与电波折射修正相结合,研制了多型电波折射修正设备,嵌入雷达和测控等系统使用,实现了对装备定位误差的实时修正,在雷达探测和航天测控等领域得到了广泛应用。

### 4.2 对雷达、通信等系统影响评估技术研究

对流层造成的雷达、通信系统信号衰减、折射等严重影响系统的使用性能,评估对流层环境的影响对装备的合理使用和故障诊断具有重要应用价值。孙方等研究了大气折射对 Geo-SAR 卫星成像的影响<sup>[225]</sup>。赵振维等研究了湿海雾对雷达后向散射特性的影响<sup>[226]</sup>。周兆先、胡大璋分析了 3 mm 波在沙尘中的衰减对通信误码率的影响<sup>[227]</sup>。张蕊等研究了雨衰减对雷达最大作用距离以及雷达接收信号信噪比与信杂比的影响<sup>[228]</sup>。赵振维等分析了电波环境对战场装备使用的影响<sup>[229]</sup>。闫仲钰等评估南海海域蒸发波导环境对雷达探测距离的影响<sup>[230]</sup>。刘勇等<sup>[231]</sup>评估了渤海海域蒸发波导环境对雷达盲区分布。

近年来,电波所正在结合对流层电波环境的数值预报来分析评估和预测对雷达、通信等系统的影响,特别是评估预报降雨、大气波导等气象过程可能对系统造成的中断、超视距干扰等严重影响,相关预报信息在“电波助手”公众号进行了发布<sup>[232]</sup>。

## 5 研究展望

随着无线电系统的快速发展,频谱资源越来越紧张,电波传播已成为提高用频效率、不同系统共存分析的重要手段。同时,大量不同频段的无线电系统的广泛使用为电波传播研究提供了丰富的信号资源,气象数值预报、大数据、人工智能等交叉学科的发展也为对流层电波传播研究注入了新的发展机遇:

1) 发展高分辨率无线电气象参数的数字地图技术,深化对无线电气象时空变化特征的研究;

2) 发展外辐射源的对流层电波传播实验技术,积累不同应用场景的电波传播数据,提升电波传播建模能力;

3) 发展基于外辐射源的无线电气象环境遥感技术,提高对电波传播环境的实时感知能力;

4) 发展基于传播环境时空重构的电波传播虚拟实验技术和高可信电波传播数值算法;

5) 发展大规模射频电波传播高性能计算技术,提升对大规模无线电系统体系性能的评估;

6) 发展无线电气象参数和电波传播的数值短期预报技术,提高对气象环境对无线电装备影响的评估预报能力;

7) 发展对流层无线电气象和电波传播的智能短期预报技术,提高对气象环境对无线电装备影响的智能评估能力。

**致谢** 电波所走过了一个甲子的时光,几代电波人为对流层电波传播开拓和发展做出了大量无私的奉献。本文中文献作者只是他们中的少数代表,一些人已离开这个世界,一些人已离开电波所开辟新的事业,一个个熟悉和陌生的名字,奠定了对流层电波传播的根基。谨以此文纪念电波所成立60周年,并对对流层电波传播事业做出贡献的电波人表示感谢和敬意,对未能收集和遗漏的文献作者表示歉意。感谢陈祥明、李建儒、胡冉冉等同志为本文准备了部分素材,感谢曹冉、邱子桢等同志协助查阅文献、收集资料。

## 参考文献

- [1] 沙踪. 电波传播研究70年[J]. 电波科学学报, 2007(增刊): 1-11.
- [2] 赵振维, 林乐科, 卢昌胜, 等. 卫星系统电波传播[M]. 北京: 国防工业出版社, 2020.
- [3] Rec. ITU-R P. 1144-10, Guide to the application of the propagation methods of Radiocommunication Study Group 3[S], 2019.
- [4] Rec. ITU-R P. 453-14, The radio refractive index: its formula and refractivity data [S], 2019.
- [5] 谢益溪. 北京地区对流层折射的研究[R]. 中国电波传播研究所报告, 1964.
- [6] 谢益溪. 大气折射及其对定位的影响[R]. 中国电波传播研究所报告, 1976.
- [7] 张武良. 全国地面折射指数的研究[R]. 中国电波传播研究所报告, 1978.
- [8] 仇盛柏, 林秀婉. 中国低空大气折射率和水汽含量分布模型[J]. 电波科学学报, 1989, 4(5): 177-182.
- [9] 仇盛柏, 吴希德. 北京和长江中下游典型地区低空大气折射率的分布特性[R]. 中国电波传播研究所报告, 1978.
- [10] 陈祥明, 赵振维, 林乐科, 等. 对流层折射率剖面模型研究[J]. 电波科学学报, 2007, 22(增刊): 178-181.
- [11] 程显海, 孙方, 赵振维. 海上实测大气折射率起伏特性研究[J]. 电波科学学报, 2010, 25(3): 513-518.  
CHENG X H, SUN F, ZHAO Z W. Fluctuation characteristics of measured atmospheric refractive index over the sea[J]. Chinese journal of radio science, 2010, 25(3): 513-518. (in Chinese)
- [12] 郭相明, 康士峰, 赵栋梁, 等. 海上大气折射率的相似性研究[J]. 海洋预报, 2017, 34(3): 71-76.  
GUO X M, KANG S F, ZHAO D L, et al. Study on the similarity of ocean atmospheric refractivity[J]. Marine forecasts, 2017, 34(3): 71-76. (in Chinese)
- [13] 郭相明, 王红光, 孙方, 等. 湍流影响下的近海面大气折射率剖面[J]. 微波学报, 2014, 30(3): 54-58.  
GUO X M, WANG H G, SUN F, et al. Marine atmospheric surface layer radio refractivity profile considering turbulence[J]. Journal of microwaves, 2014, 30(3): 54-58. (in Chinese)
- [14] 胡大璋, 周兆先. 低于1 000 GHz电磁波的大气复折射率[J]. 红外与毫米波学报, 1994, 13(4): 279-284.  
HU D Z, ZHOU Z X. The atmospheric complex refractive index at frequency up to 1000 GHz[J]. Journal of infrared and millimeter waves, 1994, 13(4): 279-284. (in Chinese)
- [15] 谢益溪, 拉菲涅特 J, 蒙 J P, 等. 电波传播——超短波·微波·毫米波[M]. 北京: 电子工业出版社, 1990.
- [16] 刘成国. 蒸发波导环境特性和传播特性及其应用研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2003.  
LIU C G. Research on evaporation duct propagation and its applications[D]. Xi'an: Xidian University, 2003. (in Chinese)
- [17] 刘成国, 潘中伟, 郭丽. 中国低空大气波导出现概率和波导特征量的统计分析[J]. 电波科学学报, 1996, 11(2): 60-66.  
LIU C G, PAN Z W, GUO L. Statistical analysis of occurrence and characteristics of atmospheric ducts in

- China[J]. Chinese journal of radio science, 1996, 11(2): 60-66. (in Chinese)
- [18] 仇盛柏. 对流层无线电波导[J]. 电波科学学报, 1992, 7(1): 16-20.
- QIU S B. Tropospheric radio duct[J]. Chinese journal of radio science, 1992, 7(1): 16-20. (in Chinese)
- [19] 蔺发军, 刘成国, 成思, 等. 海上大气波导的统计分析[J]. 电波科学学报, 2005, 20(1): 64-68.
- LIN F J, LIU C G, CHENG S, et al. Statistical analysis of atmospheric duct[J]. Chinese journal of radio science, 2005, 20(1): 64-68. (in Chinese)
- [20] 蔺发军, 王红光, 林乐科, 等. 风向对蒸发波导环境特性影响的研究[J]. 电波科学学报, 2007, 22(3): 410-413.
- LIN F J, WANG H G, LIN L K, et al. Influence of wind direction on characteristics of evaporation duct[J]. Chinese journal of radio science, 2007, 22(3): 410-413. (in Chinese)
- [21] GJB/Z 87-97. 雷达电波传播折射与衰减手册[S], 1997.
- [22] 刘玉梅, 赵振维, 林乐科. 电波环境特性栅格数据及其在卫星系统传播设计中的应用[C]// 卫星应用发展战略研讨会, 2003: 388-391.
- [23] 刘玉梅, 赵振维, 林乐科. 中国电波环境数字地图研究[J]. 电波科学学报, 2004, 19(增刊): 190-192.
- [24] ZHAO Z W, LIU Y M, LIN L K. Study on radiometeorological grid data in China[C]// The Third CNES Workshop on Earth-space Propagation, France, 2006.
- [25] LIN L K, ZHAO Z W, KANG S F, et al. Recent progress of research on tropospheric propagation in China [C]// Eu-CAP2009: 1542-1546.
- [26] HAO X J, LI Q L, GUO L X, et al. Digital maps of atmospheric refractivity and atmospheric ducts based on a meteorological observation datasets[J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 2022, 70(4): 2873-2883.
- [27] HAO X J, LI Q L, LIN L K. Proposed modification to recommendation ITU-R P. 453-14: global digital maps of surface and elevated ducts[C]. ITU-R Doc. 3J/118, 2021.
- [28] HUANG L F, WANG H G, ZHANG S B, et al. Proposed modification to recommendation ITU-R P. 453-14: Global digital map of evaporation duct[C]. ITU-R Doc. 3J/213, 2022.
- [29] 张明高. 毫米波/亚毫米波传播研究进展[J]. 电波科学学报, 1991, 6(1): 6-10.
- [30] 仇盛柏, 林秀婉, 丘勇才, 等. 中国无线电气候区划分和降雨率分布图集[R]. 中国电波传播研究所技术报告, 1987.
- [31] 潘仲英. 雨滴尺寸分布测定与毫米波雨衰减计算[J]. 电波与天线, 1983(3): 16-83.
- [32] 仇盛柏. 激光雨滴谱仪的测量原理和测试结果[R]. 电子部第二十二研究所技术报告, 1986.
- [33] 胡大璋. 青岛地区雨滴尺寸分布模型[C]//第五届全国毫米波、亚毫米波会议, 青岛, 1991: 243-246.
- [34] 赵振维. 广州地区雨滴尺寸分布模型及雨衰减预报[J]. 电波科学学报, 1995, 10(4): 33-37.
- [35] 仇盛柏, 陈京华. 广州雨滴尺寸分布[J]. 电波科学学报, 1995, 10(4): 73-77.
- QIU S B, CHEN J H. The Distributions of raindrop sizes in Guangzhou[J]. Chinese journal of radio science, 1995, 10(4): 73-77. (in Chinese)
- [36] 赵振维. 水凝物的传播特性和遥感研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2001.
- ZHAO Z W. Study on radiowave propagation characteristics and remote sensing of hydrometeors[D]. Xi'an: Xidian University, 2001. (in Chinese)
- [37] LIN L K, ZHANG X, ZHAO Z W, et al. Study on analytical model of discrete raindrop size distribution[C]// The 13th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory(ISAPE2021), Zhuhai, Dec. 1-4, 2021.
- [38] 黄捷, 胡大璋, 仇盛柏. 中国部分地区0℃等温层高度的统计特性[J]. 电波科学学报, 1993, 8(1): 57-64.
- HUANG J, HU D Z, QIU S B. Statistic characteristics of the 0℃ isotherm height over some regions in China[J]. Chinese journal of radio science, 1993, 8(1): 57-64. (in Chinese)
- [39] LIN L K, ZHANG S B, ZHANG X, et al. Weighted mean annual rain height applied to rain attenuation prediction on earth-space links[J]. International journal of antennas and propagation, 2022: 4162415. DOI: 10.1155/2022/4162415
- [40] 仇盛柏, 林秀婉. 我国部分地区10 min降雨率和1 min降雨率的换算公式[J]. 电波科学学报, 1991, 6(1): 136-139.
- [41] 仇盛柏, 陈京华. 我国典型地区不同积分时间降雨率的换算公式[J]. 电波科学学报, 1997, 12(1): 112-117.
- QIU S B, CHEN J H. The conversion formulae of rainfall rate distributions with different integration times at the typical regions in China[J]. Chinese journal of radio science, 1997, 12(1): 112-117. (in Chinese)
- [42] 仇盛柏. 我国分钟降雨率分布[J]. 通信学报, 1996, 17(3): 78-83.
- QIU S B. The distributions of 1-min rainfall rate in China[J]. Journal on communications, 1996, 17(3): 78-83. (in Chinese)
- [43] 林乐科, 赵振维, 刘玉梅. 我国不同积分时间降雨率的统一转换模式[J]. 电波科学学报, 2002, 17(6): 641-645.
- LIN L K, ZHAO Z W, LIU Y M. A general conversion model of China rainfall rate distributions with different integration times[J]. Chinese journal of radio science, 2002, 17(6): 641-645. (in Chinese)
- [44] 林乐科. 对流层环境对地空传播特性影响研究[D]. 北京:

- 中国电子科技集团公司电子科学研究院, 2004.
- LIN L K. Influence of troposphere on radio propagation on Earth-Space paths[D]. Beijing: China Academic of Electronics and Information Technology, 2004. (in Chinese)
- [45] ZHAO Z W, LIN L K. Proposed modification to recommendation ITU-R P. 837-4: characteristics of precipitation for propagation modeling[C]. ITU-R Doc. 3J-134, 2006.
- [46] Rec. ITU-R P. 837-5, Characteristics of precipitation for propagation modelling[S], 2007.
- [47] ZHAO Z W, LIN L K, LIU Y M. ITU-R Doc. 3J/9-E, Proposed amendment to Recommendation ITU-R P. 841-3: Conversion of annual statistics to worst-month statistics[C], 2003.
- [48] 林乐科, 赵振维, 刘玉梅. 降雨率的最坏月分区转换模式研究[J]. 通信学报, 2004, 25(8): 135-138.
- LIN L K, ZHAO Z W, LIU Y M. Study on conversion model of annual statistics to worst-month statistics of rain rate[J]. Journal of communications, 2004, 25(8): 135-138. (in Chinese)
- [49] Rec. ITU-R P. 841-4, Conversion of annual statistics to worst-month statistics [S], 2005.
- [50] ZHAO Z W. The measurements of the complex dielectric constant of sand and dust particle at 33.5 and 93 GHz[C]// ISRP'93, 1993.
- [51] 胡大璋. 黄河滩沙尘粒径分布及形状的测量[J]. 电波科学学报, 1993, 8(4): 15-25.
- HU D Z. Measurements of diameter distribution and shape of sand at the beach of the Yellow River[J]. Chinese journal of radio science, 1993, 8(4): 15-25. (in Chinese)
- [52] 董庆生. 我国典型沙区中沙尘的物理特性[J]. 电波科学学报, 1997, 12(1): 15-25.
- DONG Q S. Physical characteristics of the sand and dust in different deserts of China[J]. Chinese journal of radio science, 1997, 12(1): 15-25. (in Chinese)
- [53] 沙踪. 我国电波传播研究的若干进展[J]. 电波与天线, 1980(1): 3-11.
- [54] 徐海, 潘中伟. 对流层折射率指数的初步测量[R]. 中国电波传播研究所报告, 1978.
- [55] 潘中伟, 张瑜, 高霞, 等. 微波折射率仪测量空气湿度的原理及误差分析[J]. 电波科学学报, 1992, 7(2): 73-77.
- [56] 张培哲, 张若苏, 樊爱云, 等. 微波折射率仪在探测海面蒸发波导的应用[J]. 无线电工程, 2010, 40(5): 13-15.
- ZHANG P Z, ZHANG R S, FAN A Y, et al. Application of microwave refractometer in detection of evaporation duct over the sea[J]. Radio engineering, 2010, 40(5): 13-15. (in Chinese)
- [57] 程显海, 徐海, 张忠治, 等. 微波辐射计进行大气折射误差修正的方案设想[R]. 中国电波传播研究所报告, 1991.
- [58] 程显海, 刑小星, 徐海, 等. 微波辐射计在电波折射修正中的应用[J]. 微波学报, 1995, 11(1): 61-65.
- CHENG X H, XING X X, XU H, et al. Application of microwave radiometer in the radiowave refractive modification[J]. Journal of microwaves, 1995, 11(1): 61-65. (in Chinese)
- [59] 李兰, 程显海, 林秀婉. 双频辐射计在对流层电波折射修正中的应用[J]. 电波科学学报, 1993, 8(3): 18-23.
- LI L, CHENG X H, LIN X W. The application of dual-frequency radiometer in the correction of tropospheric refractive error[J]. Journal of microwaves, 1993, 8(3): 18-23. (in Chinese)
- [60] 刘佐兴, 程显海, 张志国, 等. 噪声相加比较式微波辐射计体制研究[J]. 微波学报, 2010(S1): 611-614.
- [61] 李江漫, 郭立新, 林乐科, 等. 地基微波辐射计自定标的改进算法[J]. 西安电子科技大学学报(自然科学版), 2014, 41(4): 77-82.
- LI J M, GUO L X, LIN L K, et al. Improved algorithm of self-calibration technology by the ground-based microwave radiometer[J]. Journal of Xidian University(Natural Science), 2014, 41(4): 77-82. (in Chinese)
- [62] LI J M, GUO L X, LIN L K, et al. A new method of tipping calibration for microwave radiometer in cloudy atmosphere[J]. IEEE transactions on geoscience and remote sensing, 2014, 52(9): 5506-5513.
- [63] 赵振维, 王宁. 微波辐射计反演大气折射率剖面技术研究[J]. 电波科学学报, 2010, 25(1): 132-137.
- ZHAO Z W, WANG N. Technology for retrieving atmospheric refractivity profiles using radiometer[J]. Chinese journal of radio science, 2010, 25(1): 132-137. (in Chinese)
- [64] 林乐科, 张业荣, 赵振维, 等. 微波辐射计探测大气剖面的相关向量机算法[J]. 电波科学学报, 2009, 24(1): 90-94.
- LIN L K, ZHANG Y R, ZHAO Z W, et al. Retrieving atmosphere profiles by microwave radiometer based on RVM[J]. Chinese journal of radio science, 2009, 24(1): 90-94. (in Chinese)
- [65] 林乐科, 沈广德, 赵振维, 等. 8 mm大气辐射特性的测量与分析[J]. 电波科学学报, 2000, 15(4): 462-466.
- LIN L K, SHEN G D, ZHAO Z W, et al. Measurement and analysis of atmospheric radiant characteristic at 8 mm[J]. Chinese journal of radio science, 2000, 15(4): 462-466. (in Chinese)
- [66] 王波, 赵振维, 董庆生. 双通道微波辐射计反演大气剖面的改进算法[J]. 电波科学学报, 2007, 22(6): 982-985.
- WANG B, ZHAO Z W, DONG Q S. Improved method to retrieve atmosphere profiles using microwave radiometer's measurements[J]. Chinese journal of radio science, 2007, 22(6): 982-985. (in Chinese)

- [67] ZHU Q L, ZHAO Z W, LIN L K. Real time estimation of slant path tropospheric delay at very low elevation based on singular ground-based global positioning system station[J]. *IET radar, sonar & navigation*, 2013, 7(7): 808-814.
- [68] 朱庆林. 基于单站地基GNSS的电波折射参数估计[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2010.  
ZHU Q L. Estimation of electromagnetic wave refraction parameters by singular ground-based GNSS[D]. Xi'an: Xidian University, 2010. (in Chinese)
- [69] LIN L K, ZHAO Z W, ZHANG Y R, et al. Tropospheric refractivity profiling based on refractivity profile model using single ground-based global positioning system[J]. *IET radar, sonar & navigation*, 2011, 5(1): 7-11.
- [70] LIN L K, ZHAO Z W, ZHU Q L, et al. Profiling tropospheric refractivity in real time, based on a relevance vector machine and single ground-based GPS receiver[J]. *International journal of remote sensing*, 2012, 33(13): 4044-4058.
- [71] 林乐科. 利用GNSS信号的地基大气折射率剖面反演技术研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2011.  
LIN L K. Research on ground-based atmospheric refractivity profile inversion technique using GNSS signals[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2011. (in Chinese)
- [72] DONG X, YANG L, ZHU Q L, et al. A method of retrieving tropospheric refractivity above ocean surface using GNSS[C]// The 12th International symposium on antennas, propagation and EM theory(ISAPE2018), Dec. 3-6, Hangzhou, 2018.
- [73] DONG X, SUN F, ZHU Q L, et al. Tropospheric refractivity profile estimation by GNSS measurement at China big-triangle points[J]. *Atmosphere*, 2021, 12: 1468. DOI: [10.3390/atmos12111468](https://doi.org/10.3390/atmos12111468)
- [74] 王红光. 地基GNSS掩星反演对流层大气波导的方法和实验研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2013.  
WANG H G. Method and experiment of tropospheric ducts inversion using ground-based GNSS occultation[D]. Xi'an: Xidian University, 2013. (in Chinese)
- [75] 王波. 基于雷达杂波和GNSS的大气波导反演方法与实验[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2011.  
WANG B. Method and experiment of atmospheric ducts estimation using radar clutter and GNSS[D]. Xi'an: Xidian University, 2011. (in Chinese)
- [76] WANG B, WU Z S, ZHAO Z W, et al. A passive technique to monitor evaporation duct height using coastal GNSS-R[J]. *IEEE geoscience and remote sensing letters*, 2011, 8(4): 587-591.
- [77] 王倩南, 赵振维, 朱庆林, 等. 基于机载ADS-B信号地空传播试验数据分析[J]. *电波科学学报*, 2018, 33(1): 85-92.
- WANG Q N, ZHAO Z W, ZHU Q L, et al. Experimental data analysis for ground-air propagation with airborne ADS-B signal[J]. *Chinese journal of radio science*, 2018, 33(1): 85-92. (in Chinese)
- [78] 胡大璋, 黄捷. 多频率雨衰减反演路径平均雨滴尺寸分布[C]// 第四届全国毫米波亚毫米波学术交流会, 1988, 北京: 353-359.
- [79] 张威. 一九八七年雨季青岛降水空间结构定量观测[C]// 第四届全国毫米波亚毫米波学术交流会, 北京: 1988: 359-362.
- [80] 赵振维, 吴振森, 沈广德. 利用雨滴尺寸分布数据确定雷达测雨参数[J]. *电子学报*, 2000, 28(3): 109-111.  
ZHAO Z W, WU Z S, SHEN G D. Determination of radar parameters for measuring rainfall based on raindrop size distribution data[J]. *Acta electronica sinica*, 2000, 28(3): 109-111. (in Chinese)
- [81] 赵振维, 吴振森. 确定雾滴谱特征的方法和雾的红外辐射衰减特性[J]. *西安电子科技大学学报*, 2002, 29(2): 253-256.  
ZHAO Z W, WU Z S. Method for determining fog drop size distribution and fog attenuation at infrared wavelength[J]. *Journal of Xidian University*, 2002, 29(2): 253-256. (in Chinese)
- [82] 赵振维, 林乐科, 董庆生, 等. 雾的雷达后向散射特性研究[J]. *电波科学学报*, 2001, 17(4): 498-502.  
ZHAO Z W, LIN L K, DONG Q S, et al. Radar backscattering characteristics of fog[J]. *Chinese journal of radio science*, 2001, 17(4): 498-502. (in Chinese)
- [83] 张汝源. 海上超短波全年反常传播预报[R]. 中国电波传播研究所报告, 1970.
- [84] 张玉生, 赵振维, 康士峰, 等. 利用海雾遥感和天气形势进行海上大气波导的预报研究[J]. *电波科学学报*, 2007, 22(增刊): 171-173.
- [85] 张玉生, 康士峰, 赵振维, 等. 大气波导与气象物理量场相关性的模拟分析[J]. *电波科学学报*, 2009, 24(4): 742-747.  
ZHANG Y S, KANG S F, ZHAO Z W, et al. A simulation analysis of relativity of atmospheric duct and atmospheric parameter fields[J]. *Chinese journal of radio science*, 2009, 24(4): 742-747. (in Chinese)
- [86] 张玉生, 韩杰, 郭相明, 等. 基于湿位涡场的悬空波导预报研究[J]. *电波科学学报*, 2011, 26(3): 610-614.  
ZHANG Y S, HAN J, GUO X M, et al. Elevated duct forecast based on moist potential vorticity fields[J]. *Chinese journal of radio science*, 2011, 26(3): 610-614. (in Chinese)
- [87] 韩杰, 张玉生, 康士峰, 等. 利用MM5V3模式模拟大气波

- 导产生的准确率分析[J]. 海洋预报, 2012, 29(2): 68-72.
- HAN J, ZHANG Y S, KANG S F, et al. Accuracy analysis of atmospheric duct simulation with the MM5V3 model[J]. Marine forecasts, 2012, 29(2): 68-72. (in Chinese)
- [ 88 ] HAN J, WU J J, ZHU Q L, et al. Evaporation duct height nowcasting in China's Yellow Sea based on deep learning[J]. *Remote sensing*, 2021, 13: 1577. DOI: [10.3390/rs13081577](https://doi.org/10.3390/rs13081577)
- [ 89 ] 张守宝, 王景伟, 吕兆峰, 等. 一种基于WRF模式的雨衰减短期预报方法初探[J]. 电波科学学报, 2017, 32(1): 28-31.
- ZHANG S B, WANG J W, LYU Z F, et al. Short-term prediction method of rain attenuation based on WRF model[J]. Chinese journal of radio science, 2017, 32(1): 28-31. (in Chinese)
- [ 90 ] 李竹星. 154-II 期微波基线传输对电波工作的任务书[R]. 中国电波传播研究所报告, 1968.
- [ 91 ] 705组. 近地面微波视距电路的相位稳定性问题[R]. 中国电波传播研究所报告, 1970.
- [ 92 ] 郑汀慈. 水面路径微波视距传播测试报告[R]. 中国电波传播研究所报告, 1976.
- [ 93 ] 张明高. 视距微波衰落研究[R]. 中国电波传播研究所报告, 1976.
- [ 94 ] 胡大璋. 微波视距传播路径K型衰落的研究[R]. 中国电波传播研究所报告, 1978.
- [ 95 ] 张业荣, 谢益溪. 频率选择性衰落的计算机随机模拟[J]. 通信学报, 1991(5): 30-36.
- ZHANG Y R, XIE Y X. The computer random simulation of frequency selective fading on microwave line-of-sight links[J]. Journal on communications, 1991(5): 30-36. (in Chinese)
- [ 96 ] 张业荣, 赵雄文, 谢益溪, 等. 频率选择性衰落的实验研究[J]. 通信学报, 1994(6): 1-8.
- ZHANG Y R, ZHAO X W, XIE Y X, et al. The experimental study of frequency selective fading[J]. Journal on communications, 1994(6): 1-8. (in Chinese)
- [ 97 ] 赵雄文, 谢益溪, 张业荣. 频率选择性衰落与气象条件的关系[J]. 电波科学学报, 1995, 10(4): 61-65.
- ZHAO X W, XIE Y X, ZHANG Y R. The relations between frequency selective fading and the change of atmospheric conditions[J]. Chinese journal of radio science, 1995, 10(4): 61-65. (in Chinese)
- [ 98 ] 赵雄文, 谢益溪, 张业荣, 等. 我国频率选择性衰落与多径去极化研究的进展[J]. 通信学报, 1996(3): 8-14.
- ZHAO X W, XIE Y X, ZHANG Y R, et al. The progress on the study of frequency selective fading and depolarization due to multipath propagation in China[J]. Journal on communications, 1996(3): 8-14. (in Chinese)
- [ 99 ] 谢益溪, 赵雄文. 多径色散与平衰落之相关特性[J]. 通信学报, 1997(10): 44-47.
- XIE Y X, ZHAO X W. Correlationship between multipath dispersion and flat fading[J]. Journal of China institute of communications, 1997(10): 44-47. (in Chinese)
- [ 100 ] 靳慧群, 沙踪, 谢益溪. 多径去极化和衰落的概率分布[J]. 电波科学学报, 1986, 1(1): 46-56.
- [ 101 ] 谢益溪, 郭长顺. 多径传播去极化现象的实验研究[J]. 电子学报, 1987(1): 16-23.
- [ 102 ] 赵雄文, 谢益溪, 郭长顺. XPD与CPA统计分布的计算机模拟研究[J]. 电子学报, 1996(9): 5-9.
- ZHAO X W, XIE Y X, GUO C S. The study of XPD and CPA statistical distribution by computer simulation[J]. *Acta electronica sinica*, 1996(9): 5-9. (in Chinese)
- [ 103 ] 谢益溪, 郭长顺. 地面微波视距电路上的绕射传播实验[J]. 通信学报, 1988(6): 7-14.
- XIE Y X, GUO C S. Experiments of diffraction propagation on terrestrial microwave line-of-sight paths[J]. Journal of China Institute of Communications, 1988(6): 7-14. (in Chinese)
- [ 104 ] 赵雄文, 谢益溪. 计及地面反射且考虑大气折射和地球凸起影响时的双刃峰绕射场[J]. 电波科学学报, 1994, 9(1): 22-30.
- ZHAO X W, XIE Y X. The double knife-edge diffraction field with the effects of ground reflection, atmospheric refraction and the earth's convexity[J]. Chinese journal of radio science, 1994, 9(1): 22-30. (in Chinese)
- [ 105 ] 赵雄文, 谢益溪. 劈形与平顶直边障碍物的绕射场[J]. 电波科学学报, 1994, 9(3): 1-5.
- [ 106 ] ZHAO X W, XIE Y X. The evidence of lossy wedge diffraction coefficient in theory[J]. Journal of electronics, 1994(4): 339-347.
- [ 107 ] 赵雄文, 谢益溪. 平顶斜边障碍物的绕射场[J]. 电子学报, 1995(6): 80-83.
- ZHAO X W, XIE Y X. Diffraction over a flat-topped terrain obstacle with bevel edge[J]. *Acta electronica sinica*, 1995(6): 80-83. (in Chinese)
- [ 108 ] 赵雄文, 谢益溪. 劈形与刃峰绕射场的远区一致性[J]. 电波科学学报, 1995, 10(3): 46-49.
- ZHAO X W, XIE Y X. An uniform expression of wedge and knife-edge diffraction fields[J]. Chinese journal of radio science, 1995, 10(3): 46-49. (in Chinese)
- [ 109 ] 杨铖, 王健, 由希华, 等. ITU-R P. 1546方法在中国陆地典型区域适用性研究[J]. 电波科学学报, 2019, 34(3): 295-301.
- YANG C, WANG J, YOU X H, et al. Applicability of ITU-R P. 1546 recommendation in typical terrestrial areas of China[J]. Chinese journal of radio science, 2019, 34(3): 295-301. (in Chinese)
- [ 110 ] 陈彪, 王健, 杨宏民, 等. 调频广播传播预测方法分析与

- 本地应用研究[J]. 电波科学学报, 2013, 28(2): 378-384.
- CHEN B, WANG J, YANG H M, et al. Analysis and local application research on propagation prediction method for analogue FM broadcasting[J]. Chinese journal of radio science, 2013, 28(2): 378-384. (in Chinese)
- [111] SONG L B, CHEN X F, WANG J, et al. Research on propagation prediction model localization over the tropical maritime environment[C]// International conference on Signal and Information Processing, Networking, 2017.
- [112] 胡冉冉. 对流层折射的时空变化特征及其对无线电作用距离的影响[D]. 北京: 中国电子科技集团公司电子科学研究院, 2019.
- HU R R. Spatial and temporal characteristics of tropospheric refraction and its influence on radio interaction distance[D]. Beijing: China Academic of Electronics and Information Technology, 2019. (in Chinese)
- [113] WANG J, SHI Y F, YANG C, et al. Research on fading characteristics of ultrahigh frequency signals in Karst landform around radio quiet zone of FAST[J]. Radio science, 2020, 55. DOI:10.1029/2019RS007048
- [114] 胡冉冉, 赵振维, 孙树计, 等. 大气折射对我国近地面无线电视距的影响分析[J]. 电波科学学报, 2018, 33(1): 14-20.
- HU R R, ZHAO Z W, SUN S J, et al. Effects of the atmospheric refraction on radio line-of-sight distance near the ground in China[J]. Chinese journal of radio science, 2018, 33(1): 14-20. (in Chinese)
- [115] 胡冉冉, 赵振维, 林乐科, 等. 近地面1 km高度处折射率梯度与地面气象参数统计关系研究[J]. 电波科学学报, 2020, 35(6): 896-901.
- HU R R, ZHAO Z W, LIN L K, et al. The statistical relationship between refractivity gradient in the lowest 1 km near the ground and ground meteorological parameters[J]. Chinese journal of radio science, 2020, 35(6): 896-901. (in Chinese)
- [116] 胡大璋. 低层大气中氧气吸收的研究[J]. 电波科学学报, 1996, 11(3): 27-32.
- HU D Z. Study of oxygen absorption in lower atmosphere[J]. Chinese journal of radio science, 1996, 11(3): 27-32. (in Chinese)
- [117] ZHANG M G. Proposed further modification to the simplified models for specific gaseous attenuation[C]. ITU-R Doc. 3J/35, 1997.
- [118] Rec. ITU-R P. 676-4, Attenuation by atmospheric gases[S/OL], 1999[2023-03-01]. <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.676-4-19991ol-S/en>.
- [119] LI H Y, WU Z S, ZHAO Z W, et al. Modified model of equivalent height for predicting atmospheric attenuation at frequencies below 350 GHz[J]. IET microwaves, antennas & propagation, 2018, 12(8): 420-427.
- [120] LI H Y, LIN L K, ZHAO Z W, et al. Proposed modification to recommendation ITU-R P. 676-11- Attenuation by atmospheric gases[C]. ITU-R Doc. 3J/246, 2019.
- [121] Rec. ITU-R P. 676-12, attenuation by atmospheric gases[S/OL], 2019[2023-03-01]. <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.676-12-201908-S/en>
- [122] 卢昌胜, 吴振森, 李海英, 等. 基于HITRAN的太赫兹波大气吸收特性[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2013, 11(3): 346-349.
- LU C S, WU Z S, LI H Y, et al. Atmospheric absorption characteristics of Terahertz-wave based on HITRAN[J]. Journal of terahertz science and electronic information technology, 2013, 11(3): 346-349. (in Chinese)
- [123] 胡大璋. 并矢格林函数法解双层同心球散射[J]. 电波与天线, 1981(4): 1-16.
- [124] 张在峰. 毫米波段雪的电磁散射及对雷达性能的影响[J]. 电波科学学报, 1999, 14(2): 178-185.
- ZHANG Z F. Electromagnetic scattering of snows and their effects on radar performance in MM wave band[J]. Chinese journal of radio science, 1999, 14(2): 178-185. (in Chinese)
- [125] 赵振维, 吴振森, 薛谦忠. 大尺寸有耗球电磁散射算法[J]. 电波科学学报, 1999, 14(4): 422-425.
- ZHAO Z W, WU Z S, XUE Q Z. An algorithm for electromagnetic scattering of large absorptive homogeneous sphere[J]. Chinese journal of radio science, 1999, 14(4): 422-425. (in Chinese)
- [126] 林乐科, 赵振维, 张鑫. Mie散射中递推方法的比较[J]. 装备环境工程, 2021, 18(7): 75-78.
- LIN L K, ZHAO Z W, ZHANG X. Comparison of the recursion formula in calculation of Mie scattering[J]. Equipment environmental engineering, 2021, 18(7): 75-78. (in Chinese)
- [127] 董庆生. 33.5 GHz、72 GHz 和 93 GHz 的降雨衰减特性[J]. 电波科学学报, 1993, 8(3): 52-58.
- DONG Q S. Rain attenuation characteristics at 33.5, 72 and 93 GHz[J]. Chinese journal of radio science, 1993, 8(3): 52-58. (in Chinese)
- [128] 赵振维, 黄捷, 董庆生, 等. 广州地区 33.5 GHz 和 93 GHz 降雨传播特性测量[J]. 电波科学学报, 1994, 9(2): 52-59.
- ZHAO Z W, HUANG J, DONG Q S, et al. The measurement of rain-induced propagation characteristics at 33.5 GHz and 93 GHz in Guangzhou[J]. Chinese journal of radio science, 1994, 9(2): 52-59. (in Chinese)
- [129] 付耀宗. 雨衰减统计预测[R]. 中国电波传播研究所报告, 1985.
- [130] 章秀麓, 张明高. 雨衰减统计预测模式比较及研究[J].

- 电波科学学报, 1987(Z1): 40-49.
- [131] ZHAO Z W, ZHANG M G, WU Z S. Analytic specific attenuation model for rain for use in prediction methods[J]. *International journal of infrared and millimeter waves*, 2001, 22(1): 113-120.
- [132] ZHAO Z W, LIN L K, WU C Y. Proposed modification to recommendation ITU-R P. 530-10: an improved model of rain attenuation prediction along terrestrial line-of-sight path[C]. ITU-R Doc. 3J/96 and 3M/107, 2005.
- [133] 赵振维, 吴春雨, 林乐科, 等. 视距链路的雨衰减预报模式研究[J]. *电波科学学报*, 2006, 21(5): 656-658.  
ZHAO Z W, WU C Y, LIN L K, et al. A new prediction model of rain attenuation of terrestrial line-of-sight systems[J]. *Chinese journal of radio science*, 2006, 21(5): 656-658. (in Chinese)
- [134] Rec. ITU-R P. 530-14, propagation data and prediction methods required for the design of terrestrial line-of-sight systems[S/OL], 2012[2023-03-01]. <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.530-14-201202-S/en>
- [135] 赵振维, 卢昌胜, 林乐科. 基于雨胞分布的视距链路雨衰减预报模型[J]. *电波科学学报*, 2009, 24(4): 627-631.  
ZHAO Z W, LU C S, LIN L K. Prediction model of rain attenuation based on the EXCELL rain cell model for the terrestrial line-of-sight systems[J]. *Chinese journal of radio science*, 2009, 24(4): 627-631. (in Chinese)
- [136] 赵振维, 卢昌胜, 林乐科, 等. 雨衰减预测中的降雨率调整因子概念[J]. *电波科学学报*, 2013, 28(1): 33-38.  
ZHAO Z W, LU C S, LIN L K, et al. The conception of rainfall rate adjustment factor for the rain attenuation prediction[J]. *Chinese journal of radio science*, 2013, 28(1): 33-38. (in Chinese)
- [137] 卢昌胜, 赵振维, 林乐科, 等. 一种地面视距链路雨衰减预测模式[J]. *电波科学学报*, 2013, 28(2): 272-277.  
LU C S, ZHAO Z W, LIN L K, et al. A prediction model of rain attenuation for the terrestrial line-of-sight links[J]. *Chinese journal of radio science*, 2013, 28(2): 272-277. (in Chinese)
- [138] ZHAO Z W, LIN L K, ZHANG X, et al. Proposed revision to recommendation ITU-R P. 530-16-analysis of wet antenna effect and rain attenuation prediction modelling[C]. ITU-R Doc. 3M/178, 2017.
- [139] 张鑫, 赵振维, 林乐科, 等. 5G毫米波短距离链路雨衰减特性分析[J]. *电波科学学报*, 2017, 32(5): 507-512.  
ZHANG X, ZHAO Z W, LIN L K, et al. Rain attenuation characterization on 5G millimeter wave links with short distances[J]. *Chinese journal of radio science*, 2017, 32(5): 507-512. (in Chinese)
- [140] 黄捷, 胡大璋. 一种新的降雨衰减频率换算的经验模式[J]. *电波科学学报*, 1991, 6(1-2): 152.
- [141] 赵振维. 雨致交叉极化理论的二阶小变量近似及交叉极化预测[J]. *电波科学学报*, 1990, 5(3): 52-58.  
ZHAO Z W. The two-order small argument approximation of rain-induced xpd theory and xpd prediction[J]. *Chinese journal of radio science*, 1990, 5(3): 52-58. (in Chinese)
- [142] 赵振维. 利用雨致差分衰减研究毫米波交叉极化[J]. *电波科学学报*, 1991(Z1): 153-156.
- [143] 沈广德, 赵振维, 林乐科, 等. 海雾对8 mm的衰减和闪烁研究[J]. *电波科学学报*, 1999, 14(1): 66-70.  
SHEN G D, ZHAO Z W, LIN L K, et al. Sea fog attenuation and scintillation at 33.5 GHz[J]. *Chinese journal of radio science*, 1999, 14(1): 66-70. (in Chinese)
- [144] 沈广德, 赵振维, 林乐科, 等. 海雾对3毫米波传播特性的影响研究[J]. *红外与毫米波学报*, 2000, 19(6): 478-480.  
SHEN G D, ZHAO Z W, LIN L K, et al. Sea fog effects on radiowave propagation at 3 mm wavelength[J]. *Journal of infrared and millimeter waves*, 2000, 19(6): 478-480. (in Chinese)
- [145] 赵振维, 吴振森, 沈广德, 等. 一种计算云雾毫米波衰减的经验公式[J]. *电波科学学报*, 2000, 15(3): 300-303.  
ZHAO Z W, WU Z S, SHEN G D, et al. An empirical expression for estimating attenuation due to clouds and fog at millimeter wavelengths[J]. *Chinese journal of radio science*, 2000, 15(3): 300-303. (in Chinese)
- [146] ZHAO Z W, WU Z S. Millimeter-wave attenuation due to fog and clouds[J]. *International journal of infrared and millimeter waves*, 2000, 21(10): 1607-1616.
- [147] 赵振维, 吴振森, 沈广德, 等. 雾对10.6  $\mu\text{m}$ 红外辐射的衰减特性研究[J]. *红外与毫米波学报*, 2002, 21(2): 95-98.  
ZHAO Z W, WU Z S, SHEN G D, et al. Attenuation due to fog for 10.6  $\mu\text{m}$  wavelength[J]. *Journal of infrared and millimeter waves*, 2002, 21(2): 95-98. (in Chinese)
- [148] 董庆生, 胡大璋, 赵家启, 等. 沙尘和烟雾中毫米波传播特性的实验研究[J]. *电波科学学报*, 1993, 8(1): 71-79.  
DONG Q S, HU D Z, ZHAO J Q, et al. MM wave propagation experiment in sand-dust storm and smoke[J]. *Chinese journal of radio science*, 1993, 8(1): 71-79. (in Chinese)
- [149] 董庆生, 赵振维. 模拟沙尘暴中的毫米波传播[C]//第五届全国电波传播学术会议, 北京, 1995: 30.
- [150] ZHANG R, ZHANG S B, ZHAO Z W, et al. Phase turbulence prediction method for line-of-sight multiple-input-multiple-output links caused by atmospheric environment[J]. *IEEE antennas and wireless propagation letters*, 2022. DOI:10.1109/LAWP.2022.3183439
- [151] 张明高. 对流层散射传播[M]. 北京: 电子工业出版社, 2004.
- [152] 陈明英. 多山电路对流层散射传播测试结果[C]//第一次

- 全国电波传播专业学术会议论文集, 1964.
- [153] 陈瑞先, 蒋泽明, 杨广才, 等. 海上超短波远距离传播的特性[C]//第一次全国电波传播专业学术会议论文集, 1964.
- [154] 吕保维. 超短波、微波前向散射传播理论[J]. 电信科学, 1958(2-3).
- [155] 吴德炎. 对流层电波远距离传播的衰落特性研究[C]//第一次全国电波传播专业学术会议论文集, 1964.
- [156] 熊皓. 层状不均匀性的反射在超短波对流层远距离传播中的作用[C]//第一次全国电波传播专业学术会议论文集, 1964.
- [157] Rec. ITU-R P. 617-1, Propagation prediction techniques and data required for the design of trans-horizon radio-relay systems[S/OL], 1992[2023-03-01]. <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.617-1-199203-S/en>
- [158] LI L, ZHAO Z W, LIN L K, et al. A model for transhorizon propagation prediction due to troposcatter and atmosphere duct[C], ITU-R Doc. 3M/212, 2015.
- [159] LI L, WU Z S, LIN L K, et al. Study on the prediction of troposcatter transmission loss[J]. *IEEE transactions on antennas and propagation*, 2016, 64(3): 1071-1079.
- [160] 李磊, 赵振维, 吴振森, 等. 对流层最坏月转换模式研究[J]. 通信学报, 2016, 37(5): 81-87.  
LI L, ZHAO Z W, WU Z S, et al. Conversion model of annual statistics to worst-month statistics of troposcatter[J]. *Journal on communications*, 2016, 37(5): 81-87. (in Chinese)
- [161] Rec. ITU-R P. 617-4, Propagation prediction techniques and data required for the design of trans-horizon radio-relay systems[S], 2017. <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.617-4-201712-S/en>
- [162] ZHANG L J, LIN L K, ZHAO Z W, et al. Proposed draft revision of Recommendation ITU-R P. 617-4: a modified formula for troposcatter transmission loss distribution[C]. ITU-R Doc. 3M/392, 2019.
- [163] Rec. ITU-R P. 617-5, Propagation prediction techniques and data required for the design of trans-horizon radio-relay systems[S/OL], 2019[2023-03-01]. <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.617-5-201908-I/en>
- [164] 张利军, 张蕊, 赵振维, 等. 高仰角对流层散射传播损耗的改进预测方法[J]. 电波科学学报, 2017, 32(4): 449-454.  
ZHANG L J, ZHANG R, ZHAO Z W, et al. An improved prediction method of the troposcatter propagation loss with high elevation[J]. *Chinese journal of radio science*, 2017, 32(4): 449-454. (in Chinese)
- [165] 张利军, 张蕊, 赵振维. 对流层散射传播中的偏移损耗分析[J]. 电子与信息学报, 2015, 37(6): 1502-1506.  
ZHANG L J, ZHANG R, ZHAO Z W. Analysis of rotational loss in troposcatter propagation[J]. *Journal of electronics & information technology*, 2015, 37(6): 1502-1506. (in Chinese)
- [166] LI L, LIN L K, WU Z S, et al. Study on the maximum calculation height and the maximum propagation angle of the troposcatter wide-angle parabolic equation method[J]. *IET microwaves, antennas and propagation*, 2016, 10(6): 686-691.
- [167] 赵强, 张蕊, 林乐科, 等. 基于射线追踪算法的对流层散射信道特性研究[C]//第十五届全国电波传播年会, 2019, 合肥.
- [168] 赵强, 张蕊, 林乐科, 等. 对流层散射传输损耗与大气折射率结构常数相关性研究[J]. 电子学报, 2020, 48(3): 518-523.  
ZHAO Q, ZHANG R, LIN L K, et al. Research on the correlation of troposcatter transmission loss and structure constant of the refractive index[J]. *Acta electronica sinica*, 2020, 48(3): 518-523. (in Chinese)
- [169] 牛振清, 岳元俊, 李强, 等. 广州市移动通信电波传播实验结果分析[C]//1986年电波传播学术年会, 1986, 180-184.
- [170] 章秀麓, 牛振清. 450MHz移动通信场强特性[J]. 电波科学学报, 1989(Z1): 86-90.
- [171] 章秀麓. 北京市区移动通信场强特性[J]. 电波科学学报, 1989, 2(1): 22-29.
- [172] 张明高. ITU-R建议中几项电波传播技术模式[J]. *中国工程科学*, 2000, 7(2): 74-78.  
ZHANG M G. Study on several radio propagation models in ITU-R recommendations[J]. *Engineering science*, 2000, 7(2): 74-78. (in Chinese)
- [173] Rec. ITU-R P. 529-2, prediction methods for the terrestrial land mobile service in the VHF and UHF bands [S/OL], 1995[2023-03-01]. <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.529-2-199510-S/en>
- [174] 张雅彬, 张蕊, 徐彬, 等. 准三维射线追踪预测模型仿真和计算[J]. 电波科学学报, 2011, 26(Sup.): 389-391.  
ZHANG Y B, ZHANG R, XU B, et al. The quasi 3-D ray tracing model[J]. *Chinese journal of radio science*, 2011, 26(Sup.): 389-391. (in Chinese)
- [175] 张雅彬, 吴健, 郭立新, 等. 城市微小区准三维射线追踪模型的计算和仿真[J]. 电波科学学报, 2012, 27(5): 954-959.  
ZHANG Y B, WU J, GUO L X, et al. The quasi 3-D ray tracing model in microcellular environment[J]. *Chinese journal of radio science*, 2012, 27(5): 954-959. (in Chinese)
- [176] HOU C Z, WU Z S, WU J J, et al. Measurement and analysis of the scattering properties of cement surfaces of urban environment in the millimeter waveband[J]. *Transac-*

- tion on emerging telecommunications technologies, 2022, 33: e4251.
- [177] HOU C Z, WU Z S, WU J J, et al. Researching on the deterministic channel models for urban microcells considering diffraction effects[J]. *Energies*, 2021, 14(8): 2143.
- [178] ZHANG R, LIU Y S, GUO B L, et al. Proposed modification to annex 11 to working party 3  $\mu$  chairman's report [C]. ITU-R Doc. 3K/156 and 3M/180, 2017.
- [179] LIU Y S, ZHANG R, LIN L K, et al. Proposed supplements to ITU-R P. 1238-9: Large scale parameters and delay spread parameters in millimeter wave band[C]. ITU-R Doc. 3K/298, 2019.
- [180] 刘永胜, 侯春枝, 林乐科, 等. 5G毫米波频段不同天线形式信道参数测量及对比分析[J]. *电波科学学报*, 2021, 36(3): 422-429.  
LIU Y S, HOU C Z, LIN L K, et al. Measurement and comparative analysis of channel parameters of different antenna forms in 5G millimeter wave frequency band[J]. *Chinese journal of radio science*, 2021, 36(3): 422-429. (in Chinese)
- [181] 侯春枝, 刘永胜, 吴振森, 等. 65.5 GHz毫米波信道测量与分析[J]. *电波科学学报*, 2021, 36(4): 630-636.  
HOU C Z, LIU Y S, WU Z S, et al. Millimeter wave channel measurement and analysis in 65.5 GHz[J]. *Chinese journal of radio science*, 2021, 36(4): 630-636. (in Chinese)
- [182] ZHANG R, LIU Y S, LIN L K, et al. Proposed modification to recommendation ITU-R P. 1238-9: an alternative method for indoor transmission loss prediction[C]. ITU-R Doc. 3K/247, 2018.
- [183] ZHANG R, LIN L K, GUO B L, et al. Information document of Recommendation ITU-R P. 452-16: The suggestions of propagation modelling for IMT sharing and compatibility studies[C]. ITU-R Doc. 3K/37 and 3M/77, 2016.
- [184] ZHANG R, LIU Y S, LIN L K, et al. Working document towards a draft revision of recommendations ITU-R P. 2108-0 and P. 452-16: a path-specific method for clutter loss prediction considering the lateral diffraction[C]. ITU-R Doc. 3M/258, 2017.
- [185] 董庆生, 王玉瑞, 孙利国. 降雪对卫星通信电路的影响[J]. *电波科学学报*, 1986, 1(2): 94-96.  
DONG Q S, WANG Y R, SUN L G. Effects of snowfall on a satellite communication path[J]. *Chinese journal of radio science*, 1986, 1(2): 94-96. (in Chinese)
- [186] 董庆生. 地空路径上的降雪衰减[J]. *电波科学学报*, 1990, 5(2): 51-55.
- [187] 仇盛柏. 中国12 GHz广播通信卫星雨衰减分布[C]//1993年全国微波会议论文集(下册): 648-651.
- [188] 沈广德, 黄捷. C波段大气闪烁特性研究[J]. *电波科学学报*, 1994, 9(1): 48-52.  
SHEN G D, HUANG J. A study on atmosphere scintillation characteristics at C-Band[J]. *Chinese journal of radio science*, 1994, 9(1): 48-52. (in Chinese)
- [189] ZHAO Z W, LIN L K, WU C Y. Proposed modification to recommendation ITU-R P. 618-8: an improved model of rain attenuation prediction along Earth-space path[C]. ITU-R Doc. 3J/97 and 3M/108, 2005.
- [190] ZHAO Z W, LU C S, LIN L K. Modelling and prediction methods of rain attenuation statistics[C]. ITU-R Doc. 3J/20 and 3M/25, 2008.
- [191] ZHAO Z W, LU C S, LIN L K. Modification to rainfall rate adjustment factor for modelling and prediction methods of rain attenuation statistics[C]. ITU-R Doc. 3J/16 and 3M/31, 2012.
- [192] 赵振维, 卢昌胜, 林乐科, 等. 地空链路雨衰减预测模式研究[J]. *电波科学学报*, 2013, 28(3): 412-419.  
ZHAO Z W, LU C S, LIN L K, et al. Prediction model of rain attenuation for the earth space link[J]. *Chinese journal of radio science*, 2013, 28(3): 412-419. (in Chinese)
- [193] ZHANG X, ZHAO Z W, LIN L K, et al. Proposed revision to recommendation ITU-R P. 618-13: a new rain attenuation model considering wet antenna effect[C]. ITU-R Doc. 3J/193 & 3M/318, 2018.
- [194] LU C S, ZHAO Z W, WU Z S, et al. A new rain attenuation prediction model for the Earth-space links[J]. *IEEE transactions on antenna & propagation*, 2018, 66(10): 5432-5442.
- [195] ZHAO Z W, ZHANG X, LU C S, et al. Analysis of rain attenuation models and proposed modifications to Recommendation ITU-R P. 618-13[C]. ITU-R Doc. 3J/117 & 3M/212, 2021.
- [196] 林乐科, 赵振维, 董庆生, 等. 地空路径水凝物交叉极化特性研究[J]. *电波科学学报*, 2006, 21(1): 49-52.  
LIN L K, ZHAO Z W, DONG Q S, et al. Study on hydro-meteor-induced cross-polarization along earth-space path[J]. *Chinese journal of radio science*, 2006, 21(1): 49-52. (in Chinese)
- [197] 赵振维, 张鑫, 林乐科, 等. 海口地区雨衰落斜率统计分析[J]. *电波科学学报*, 2012, 27(5): 906-912.  
ZHAO Z W, ZANG X, LIN L K, et al. Statistical analysis on rain fade slope at Haikou[J]. *Chinese journal of radio science*, 2012, 27(5): 906-912. (in Chinese)
- [198] 吕兆峰, 林乐科, 张鑫, 等. 基于灰色系统理论的雨衰减短期预报方法研究[J]. *微波学报*, 2016, 32(5): 80-83.  
LYU Z F, LIN L K, ZHANG X, et al. Short-term prediction of rain attenuation based on gray system theory[J]. *Journal of microwaves*, 2016, 32(5): 80-83. (in Chinese)
- [199] ZHANG X, ZHAO Z W, LIN L K, et al. A new Mie scat-

- tering attenuation predicting method and Proposed modification to Recommendation ITU-R P. 1622[C]. ITU-R Doc. 3J/109 & 3M/126, 2022
- [ 200 ] Rec. ITU-R P. 1622-1, Prediction methods required for the design of Earth-space systems operating between 20 THz and 375 THz[S/OL], 2022. <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.1622-1-202208-I/en>
- [ 201 ] 张明高, 朱建兴. 地空路径海面多径衰落研究[C]// 第五届全国电波传播学术会议论文集, 1995: 5-8.
- [ 202 ] Rec. ITU-R P. 680-2, propagation data required for the design of Earth-space maritime mobile telecommunication systems[S], 1997. <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.680-2-199708-S/en>
- [ 203 ] 张明高, 康士峰. LMSS遮蔽衰落预测模式进一步分析与改进[J]. 电波科学学报, 1996, 11(4): 14-19.  
ZHANG M G, KANG S F. Further analyses and improvements of prediction models for shadowing attenuation in LMSS[J]. Chinese journal of radio science, 1996, 11(4): 14-19. (in Chinese)
- [ 204 ] 余运超, 郝文辉, 孙宏林, 等. UHF、L频段陆地卫星移动通信业务遮蔽环境衰落研究[J]. 电波科学学报, 2000, 15(4): 446-449.  
YU Y C, HAO W H, SUN H L, et al. Roadside tree attenuation measurements at UHF and L for land mobile satellite systems[J]. Chinese journal of radio science, 2000, 15(4): 446-449. (in Chinese)
- [ 205 ] ZHANG R, LIN L K, ZHAO Z W, et al. Proposed modifications to recommendation ITU-R P. 310-10, P. 680-3 and P. 682-3: discussion about definition of fade depth[C]. ITU-R Doc. 3J/212&3M/345, 2022.
- [ 206 ] Rec. ITU-R P. 680-4, Propagation data required for the design of Earth-space maritime mobile telecommunication systems[S/OL], 2022[2023-03-01]. <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.680-4-202208-I/en>.
- [ 207 ] Rec. ITU-R P. 682-4, Propagation data required for the design of Earth-space aeronautical mobile telecommunication systems[S/OL], 2022[2023-03-01]. <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.682-4-202208-I/en>
- [ 208 ] 黄捷. 电波大气折射误差修正[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999.
- [ 209 ] 东风四号折射修正方案[R]. 中国电波传播研究所报告, 1967.
- [ 210 ] 颜德贵. 对流层电波折射修正[R]. 中国电波传播研究所报告, 1978.
- [ 211 ] 江长荫. 低仰角无线电定位测速的大气层电波传播误差[J]. 电波与天线, 1982(1): 1-62.
- [ 212 ] 江长荫, 黄捷. 任意大气层折射误差的实用修正方法[J]. 电子学报, 1999(3): 45-48.
- JIANG C Y, HUANG J. Practical method of corrections for refraction errors in arbitrary atmosphere[J]. *Acta electronica sinica*, 1999(3): 45-48. (in Chinese)
- [ 213 ] 张瑜. 大气时变特性对电波折射修正精度影响的实验研究[J]. 电子科学学刊, 1999, 21(4): 573-576.  
ZHANG Y. The experimental study on the effect of time variation of atmosphere on the precision of radiowave refractive correction[J]. *Journal of electronics*, 1999, 21(4): 573-576. (in Chinese)
- [ 214 ] 程显海. 大气折射的高精度方法研究[R]. 中国电波传播研究所报告, 1998.
- [ 215 ] LIN L K, CHEN X M, HU R R, et al. The refraction correction of elevation angle for the mean annual global reference atmosphere[J]. *International journal of antennas and propagation*, 2020: 2438515.
- [ 216 ] 江长荫, 朱炬波. 大气折射误差的残差模型[J]. 电子学报, 1999, 27(6): 27-32.  
JIANG C Y, ZHU J B. Residual error models for atmospheric refraction errors[J]. *Acta electronica sinica*, 1999, 27(6): 27-32. (in Chinese)
- [ 217 ] 黄捷. 大气折射修正残差初研[J]. 第十研究院学报, 1979(1): 35-48.
- [ 218 ] 黄捷. 无线电大气折射修正公式的简化[C]// 1986年电波传播学术年会论文摘要集: 139-141.
- [ 219 ] 杨志强, 陈祥明, 赵振维. 对流层电波折射误差修正经验模型研究[J]. 电波科学学报, 2008, 23(3): 580-584.  
YANG Z Q, CHEN X M, ZHAO Z W. Empirical model for radio wave refractive error correction of troposphere[J]. *Chinese journal of radio science*, 2008, 23(3): 580-584. (in Chinese)
- [ 220 ] 孙方, 朱庆林, 刘琨, 等. 大气折射引起的卫星测控系统速度误差分析[J]. 电波科学学报, 2022, 37(5): 810-816.  
SUN F, ZHU Q L, LIU Q, et al. Analysis of velocity error of satellite TT&C system caused by atmospheric refraction[J]. *Chinese journal of radio science*, 2022, 37(5): 810-816. (in Chinese)
- [ 221 ] 贾瑞进. 大气折射误差修正精度的实验研究[C]// 1986年电波传播学术年会论文摘要集, 1986: 141-147.
- [ 222 ] 江长荫, 王被德. 机载与星载雷达的电波传播大气折射修正[J]. 中国科学(E辑), 2001, 31(1): 19-27.
- [ 223 ] 吴希德, 罗贤云, 康士峰. 低层大气折射对下视雷达临界俯角的影响[J]. 电波科学学报, 2000, 15(4): 459-461.  
WU X D, LUO X Y, KANG S F. The influence of critical angle on down-looking radar by lower atmospheric refraction[J]. *Chinese journal of radio science*, 2000, 15(4): 459-461. (in Chinese)

- [13] MCDONALD M K, CERUTTI-MAORI D. Coherent radar processing in sea clutter environments, part 2: adaptive normalized matched filter versus adaptive matched filter performance[J]. *IEEE transactions on aerospace and electronic systems*, 2016, 52(4): 1818-1833.
- [14] MCDONALD M K, CERUTTI-MAORI D. Clairvoyant radar sea clutter covariance matrix modelling[J]. *IET radar, sonar navigation*, 2017, 11(1): 154-160.
- [15] TITI G, MARSHALL D F. The ARPA/NAVY Mountain-top Program: adaptive signal processing for airborne early warning radar[C]// Proceedings of 1996 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing Conference Proceedings, 1996.
- [16] WAN J, LUO F, ZHANG Y S, et al. Research on sea clutter model of emulating aircraft motion based on shore-based multichannel radar[J]. *International journal of remote sensing*, 2022, 43(6): 2227-2243.
- [17] 王永良, 彭应宁. 空时自适应信号处理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2001.  
WANG Y L, PENG Y N. Space-time adaptive processing [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2001. (in Chinese)
- [18] WARD J. Space-time adaptive processing for airborne radar[R]. Lincoln Laboratory, 1994.

### 作者简介

**万晋通** (1990—), 男, 甘肃人, 中国电波传播研究所硕士, 研究方向为海杂波数据处理、海杂波空时二维特性研究. Email: wanjt.crip.ac.cn

**李清亮** (1963—), 男, 河南人, 中国电波传播研究所研究员, 中国电子科技集团公司首席科学家, 博士, 长期从事电波传播理论及应用技术研究, 先后担任某重大工程副总设计师, 973项目技术首席和863计划重大课题组长, 在目标及其环境特性、电离层扰动与传播特性等方面取得多项研究成果, 获国家科技进步一等奖, 享受国务院政府特殊津贴. E-mail: qlianglicrip@sina.cn

**张玉石** (1978—), 男, 辽宁人, 中国电波传播研究所, 博士, 中国电波传播研究所研究员, 集团专家, 研究方向为地海杂波测试系统与方法、地海杂波特性与建模等方面的研究. E-mail: zhangyus.crip.ac.cn

### (上接第609页)

- [224] 刘玉梅, 陈祥明, 赵振维, 等. 高精度折光修正系统射线描述快速算法[J]. *电波科学学报*, 2015, 30(4): 749-753.  
LIU Y M, CHEN X M, ZHAO Z W, et al. High-precision fast ray-tracing algorithm used in optical wave refraction error correction[J]. *Chinese journal of radio science*, 2015, 30(4): 749-753. (in Chinese)
- [225] 孙方, 朱庆林, 陈春, 等. 大气折射对Geo-SAR卫星成像的影响[C]// 第27届中国飞行器测控学术会议, 广州, 2014.
- [226] 赵振维, 林乐科, 董庆生, 等. 雾的雷达后向散射特性研究[J]. *电波科学学报*, 2001, 16(4): 498-502.  
ZHAO Z W, LIN L K, DONG Q S, et al. Radar backscattering characteristics of fog[J]. *Chinese journal of radio science*, 2001, 16(4): 498-502. (in Chinese)
- [227] 周兆先, 胡大璋. 战场沙尘环境中三毫米波通信的研究[J]. *电波科学学报*, 1994, 9(4): 57-63.
- [228] 张蕊, 赵振维, 林乐科. 降雨对雷达探测性能的影响[J]. *现代雷达*, 2007(1): 51-54.  
ZHANG R, ZHAO Z W, LIN L K. Influences of rain on radar's detection performance[J]. *Modern radar*, 2007(1): 51-54. (in Chinese)
- [229] 赵振维, 林乐科, 孙树计, 等. 电波环境信息在信息化战场的作用与定位[C]//2012军事电子信息学术会议论文集, 2012, 成都: 1155-1159.
- [230] 闫仲钰, 张利军, 王红光, 等. 蒸发波导测量与雷达探测性能分析[J]. *雷达科学与技术*, 2017, 15(3): 301-311.
- [231] 刘勇, 张利军, 王红光, 等. 视距内蒸发波导对海环境下雷达探测盲区影响分析[J]. *长春理工大学学报(自然科学版)*, 2019, 42(5): 45-51.
- [232] 中国电波传播研究所. “电波助手”公众号[Z/OL].

### 作者简介

**赵振维** (1965—), 男, 河北人, 中国电波传播研究所研究员, 博士, ITU-R SG3 研究组副主席, 中国电科首席科学家, 长期从事电波传播研究和电波传播国际标准制修订工作. E-mail: zhaozw@crip.ac.cn

**林乐科** (1972—), 男, 山东人, 中国电波传播研究所研究员, 博士, ITU-R WP3M 工作组副主席, 长期从事电波传播研究和电波传播国际标准制修订工作. E-mail: llk22s@163.com