

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2014.09.026

引用格式:李伟,杨森,戴慧玲.热带无线电波传播研究进展及核心影响因素分析[J].电讯技术,2014,54(9):1314-1320. [LI Wei, YANG Miao, DAI Hui-ling. Research Progress and Core Factor Analysis of Tropical Radio Wave Propagation[J]. Telecommunication Engineering, 2014, 54(9):1314-1320.]

热带无线电波传播研究进展及核心影响因素分析*

李伟**,杨森,戴慧玲

(国家无线电监测中心,北京 100037)

摘要:热带无线电波传播研究是近年来电波领域重要的研究分支之一。综述了国际电信联盟(ITU)和国际无线电科学联盟(USRI)关于热带无线电波传播的主要研究内容和进展情况,分析了与热带无线电波传播相关的核心影响因素,包括雨衰、对流层闪烁、大气波导、植被衰落、盐度等,最后,指出了关于热带无线电波传播需要进一步研究的方向。相关内容可为热带无线电波传播的深入研究提供参考。

关键词:无线电波传播;热带地区;预测方法;核心影响因素;对流层影响;雨衰

中图分类号:TN011 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2014)09-1314-07

Research Progress and Core Factor Analysis of Tropical Radio Wave Propagation

LI Wei, YANG Miao, DAI Hui-ling

(The State Radio Monitoring Center, Beijing 100037, China)

Abstract: Tropical radio wave propagation research is one of the important research branches of wave field in recent years. The main research contents and progresses of tropical radio wave propagation in International Telecommunication Union (ITU) and International Union of Radio Sciences (USRI) are summarized, and core factors associated with tropical radio wave propagation are analyzed, including rain attenuation, tropospheric scintillation, surface ducting, vegetation attenuation and salinity. Finally, several future research directions for tropical radio wave propagation are prospected. The research in this paper provides some reference for the profound research on tropical radio wave propagation.

Key words: radio wave propagation; tropical area; prediction method; core factor; troposphere influence; rain attenuation

1 引言

无线电频谱资源是国家经济发展和国防建设不可或缺的有限战略资源,是信息化建设的重要依托,它与土地、矿产、水、森林、能源等资源一样,是人类社会发展的物质基础。无线电波作为无线电频谱的

表现形式,在空中以交变的电磁场实现语音、数字、图像、视频等信息的快速传递^[1]。既然无线电频谱资源如此宝贵,因此作为基础性科学的无线电波传播理论具有十分重要的研究价值。

无线电波传播研究至今已有一百多年的历史,

* 收稿日期:2014-06-06;修回日期:2014-08-06 Received date:2014-06-06;Revised date:2014-08-06

基金项目:国家科技重大专项(2013ZX03003016)

Foundation Item: The National Science and Technology Major Project(2013ZX03003016)

** 通讯作者:liwei@srcc.org.cn Corresponding author:liwei@srcc.org.cn

从基础理论的研究到无线电通信业务或系统的应用研究都有所突破,主要成果大多来源于欧美国家^[2-3]。经典的电波传播理论表明^[4]:无线电波传播与自然环境息息相关。相比于欧美国家所在的非热带地区,热带地区的气候、地理环境比较特殊,表现为纬度低、温度高、海域广、地貌复杂、旱雨分明、季风显著。因此,在热带地区,无线电波和媒质的相互作用与非热带地区的差异性比较明显,非热带地区无线电波传播的相关理论模型不宜直接应用于热带地区。

此外,集中在热带地区的国家都是发展中国家、或落后的第三世界国家,如泰国、印度尼西亚、菲律宾等,研究经费不足、研究技术不发达等原因造成这些国家在无线电波传播研究领域发展滞后。早在 1996 年,欧洲委员会曾投资项目“Concerted Action in African Telecommunications Research”,与乌干达、坦桑尼亚、赞比亚 3 个发展中国家合作研究降雨对电波传播的影响,通过实地测试给出热带地区的传播数据,并应用于卫星链路计算、地空通信系统设计之中^[5]。2000 年,国际电信联盟(International Telecommunication Union, ITU)考虑到大多数热带地区国家尚无电波传播数据,8-1 号决议(Resolution 8-1)计划为热带地区发展中国家开展电波传播研究提供资金和资源上的援助^[6]。

近年来,随着 ITU、国际无线电科学联盟(International Union of Radio Sciences, USRI)等国际组织在电波传播领域不断地加大对热带地区的支持力度,热带电波传播研究有了长足的发展,具体研究内容包括热带无线电气象、电离层/对流层传播特性、热带植被衰减、热带海洋路径电波传播特性、具体业务和系统的传播预测模型等。本文总结和分析了热带电波传播研究现状,重点对 ITU 和 USRI 两大国际组织关于热带电波传播的研究进展进行了剖析;其次,从对流层影响和地面及其覆盖物两个角度全面探讨和仿真了与热带电波传播相关的核心影响因素;最后,归纳了热带电波传播研究所面临的挑战,并展望了其未来的发展方向。

2 国际组织关于热带无线电波传播的研究现状

ITU 和 URSI 作为研究电波传播的主要国际组织,关于电波传播的研究成果十分丰富,尤其对热带

地区的电波传播也有相关研究,对促进热带地区国家的无线电事业发展起到了举足轻重的作用。

2.1 ITU-R

ITU 无线电通信部门(ITU Radio-communication sector, ITU-R)负责协调内容广泛且日益扩展的无线电业务,并在国际层面进行无线电频谱和卫星轨道的管理。ITU 大量的工作是由各领域专家组成的研究组(Study Group, SG)完成的,每个研究组都有其侧重的研究方向,制定技术标准或指导原则(建议书)是研究组的主要工作内容。

其中,ITU-R 的第三研究组(SG3)主要研究无线电波在电离与非电离介质中的传播以及无线电噪声特性等内容,其目的是为了改善无线电通信系统性能。它主要分为 4 个工作组,详细情况如表 1 所示^[7]。SG3 中的输入文稿主要涉及传播基本要素的研究、无线环境的建模分析、不同环境和频率情况下的传播预测方法以及对现有建议书的修订等。

表 1 ITU-R SG3 介绍
Table 1 Introduction of ITU-R SG3

| 工作组 | 主要研究内容 | 子组及研究方向 |
|------|-------------|------------------------|
| WP3J | 电波传播的基本要素 | 3J-1:晴朗大气的影响 |
| | | 3J-2:云和冰雹等的影响 |
| | | 3J-3:全球参数地图和统计方面 |
| | | 3J-4:植被和障碍物衍射 |
| | | 3J-5:手册 |
| WP3K | 点对点传播 | |
| WP3L | 电离层传播和无线电噪声 | 3L1:电离层 |
| | | 3L2:低频、中频和电力线传输 |
| | | 3L3:跨越电离层 |
| WP3M | 点对点传播和地空传播 | 3M1:地面路径 |
| | | 3M2:地空路径 |
| | | 3M3:干扰路径 |
| | | 3M4:数据资料库(降雨气象,植被和建筑等) |

截止到目前,SG3 输出与热带电波传播相关的 P 系列建议书共 22 篇,占全部 P 系列建议书(79 篇)近三分之一。其中,关于热带地区电波传播特性的研究内容大致可分为两类:一是与热带地区相关的电波传播参数研究,参数研究分为地表(地面、水面)、对流层、电离层 3 类参数,主要涉及热带地区植被引起的附加衰减^[8]、地面干燥程度对地波传播的影响^[9]、地面类型(如海水、湿地、干地等)对地面电特性的影响^[10]、大气折射率与热带气候地理环境下的温度、压强和水蒸气压力的关系^[11]、热带地区雨衰、对流层的云量以及大气中水蒸气含水量对电波传播的影响^[12]、电离层干扰(E 层零散的散射、

跨赤道效应等)^[13];二是与热带地区相关的电波传播预测方法,具体内容见表 2。

表 2 与热带地区相关的电波传播预测方法
Table 2 Prediction method of radio wave propagation associated with tropical area

| 序号 | 研究内容 | 参考建议书 |
|----|---------------------------------|-----------|
| 1 | 水面上和在平坦的沿海陆地区域的干扰预测方法 | P. 452-14 |
| 2 | 表面大气波导的干扰机理研究 | P. 452-14 |
| 3 | 热带海洋区域的地波场强传播曲线 | P. 368-9 |
| 4 | 影响热带海洋区域地波场强的因素机理探究 | P. 368-9 |
| 5 | 地面视距系统的干扰传播效应研究 | P. 530-14 |
| 6 | 低纬度 E 层传播场强的估算方法研究 | P. 534-5 |
| 7 | 热带低纬度区域的超视距无线电传播机理研究 | P. 617-2 |
| 8 | 地球—空间电信系统中地空/空地链路的传播参数预测研究 | P. 618-10 |
| 9 | 电离层效应对地球—空间电信系统的影响机理研究 | P. 679-3 |
| 10 | 热带海洋区域空地链路的传播参数预测研究 | P. 680-3 |
| 11 | 植被效应对地空陆地移动通信系统的电波传播影响分析 | P. 681-7 |
| 12 | 热带地区地空路径上的雨衰时间系列合成方法的研究 | P. 1853-1 |
| 13 | 热带地区地空路径上对流层闪烁时间系列合成方法的研究 | P. 1853-1 |
| 14 | 卫星与地球表面上的两点之间的联合差分雨衰统计值的预测方法 | P. 1815-1 |
| 15 | 30 MHz ~ 3 GHz 频率共用影响的电离层干扰机制研究 | P. 844-1 |
| 16 | 预测方法中使用的雨衰模型的研究 | P. 838-3 |

2.2 URSI

URSI 是国际无线电科学领域的非政府性学术组织,也是国际科学联合会理事会的成员之一。它鼓励国际合作研究无线电波技术科学,建模计算无线电全频谱各类参数的精确值,包括计量方法、计量设备、电信和电磁波等。URSI 下设 10 个委员会,与电波传播相关的主要为 F 委员会“遥感和波的传播”和 G 委员会“电离层无线电和传播”^[14]。F 委员会的主要研究内容是行星大气、表面和子表面的电波传播和遥感技术,其主要工作有非电离环境的全频段研究,包括行星、中性大气和表面的电波传播、行星表面(陆地、海洋和冰)和子表面与电波的相互作用、影响波动现象的环境特点。G 委员会的

主要研究内容是在电离层无线电与传播,并对空间和地面的无线电系统提供广泛认知,其主要工作有全球形态学和电离层建模、电离层时空变量的研究、穿过电离层的电波传播理论与实践等。

热带地区电波传播较为特殊,主要表现在两个方面:一是热带地区特殊的大气环境,即低纬度和低磁度(阿普顿层,场向不规则结构),低纬度因素主要作用于高度小于 100 km 的路径,而低磁度因素主要作用在电离层的更高级路径(平均自由程较大),其中,纬度和磁度的关系在亚洲、非洲和美洲 3 个区是不同的;二是热带对流层具有显著特点,即在某些区域波导现象经常发生(东南亚)、高降雨率(东南亚和南美)、沙漠条件和灰尘污染(中东)、山、刀刃折射和阻碍增益。因此,URSI 发展中国家委员会于 1987 年组织编写和出版了《热带和亚热带地区电波传播手册》,旨在为热带和亚热带的发展中国家热带电波传播研究提供技术参考,其中中国工程院张明高院士参与了编写^[15]。

该手册的资料来源于多年采集的大量真实数据,主要包括两部分内容,第一部分是无线电波传播介质和理论,包括电离层、对流层的物理特性,磁离子理论,热带和亚热带地区的电离层和对流层特性,无线电通信中的电磁频谱使用情况,甚低频(VLF)、低频(LF)、甚高频(VHF)和微波传播等内容;第二部分是无线电链路和系统计算,包括中国和印度地区的高频(HF)、中频(MF)、VHF 及微波的链路和系统计算,尼日利亚地区 MF 的链路和系统计算,阿根廷地区 HF 的链路和系统计算,HF 频谱管理,异常 VHF 传播等内容。该手册内容丰富,其理论推导和计算公式为热带地区电波传播研究提供了有力支撑。

3 热带无线电波传播研究的核心影响因素

大气层和地面是影响无线电波传播的自然环境的主要因素。地球大气是无线电波在自然环境中传播时所受其影响的主要的甚至是唯一的介质。通常,大气层从低往高分为 4 个层次:对流层、平流层、电离层、磁球层。对流层中每时每刻都进行着各种各样复杂的天气过程,从而引起各种各样的传播现象。地面及其覆盖物则是无线电波在自然环境中传播时所受遭遇的主要的甚至是唯一的边界条件,可以引起无线电波的反射、散射、遮蔽和阻挡效应。因此,重点分析热带地区对流层和地面及其覆盖物

对无线电波传播的影响。

3.1 热带地区对流层影响电波传播的核心因素

在对流层中,常见的传播效应有多径效应、射线路径弯曲、聚焦/散焦效应、大气波导传播、去极化效应以及各种水凝体(雨、雾、雪、雹等)引起的衰减等。热带地区气候表现为温度高、旱雨分明、季风显著,由于气温较高,水汽蒸腾作用旺盛,导致水分散失较多,当水汽上升遇冷凝成雨水,从而带来充沛的雨量。相比于其他地区,热带地区的降雨率非常高。此外,热带地区的地理环境也比较特殊,表现为纬度低、海域广、地貌复杂。因此,雨衰、对流层闪烁、大气波导效应是热带地区研究无线电波传播首先需要考虑的因素。

3.1.1 雨衰

热带地区高降雨率给地空链路带来严重的衰减,已成为制约高频段(高于10 GHz)电磁波开发应用的一个显著问题。热带雨衰主要有三方面研究内容:倾斜传播路径的衰减预测方法、雨衰年度统计数据变换到最坏月份统计数据的方法、雨衰预测模型。

(1) 倾斜传播路径的衰减预测方法

ITU-R 的 SG3 提供了倾斜传播路径上降水和云引起的平均衰减预测方法^[16]。在该衰减预测方法的第2步中,倾斜路径长度 L_s 的选取要考虑该路径的仰角,按照仰角 $\theta \geq 5^\circ$ 和仰角 $\theta \leq 5^\circ$ 选择不同的计算公式。同理,在该衰减预测方法的第7步中,0.01% 时间内的垂直调整系数 $v_{0.01}$ 计算式中有变量 χ , 该变量是地球站纬度 φ 的函数,如果 $|\varphi| < 36^\circ$, 则 $\chi = 36 - |\varphi|$ 度; 否则, $\chi = 0^\circ$ 。

从以上描述可知,计算倾斜路径长度 L_s 和 0.01% 时间内垂直调整系数需要事先确定仰角 θ 和地球站的纬度 φ , 而这两个参数在热带地区与其他地区有明显差异,直接决定着热带地区倾斜传播路径上降水的平均衰减。

(2) 雨衰年度统计数据变换到最坏月份统计数据的方法

在 ITU-R 提供的年度统计数据变换到最坏月份统计数据的算法中^[17], 平均年度最坏月份超过的时间百分数 p_w 是根据变换因子 Q 以及平均年度超过的时间百分数 p 计算出来的,表达式如下:

$$p_w = Qp \quad (1)$$

其中, Q 是 $p(\%)$ 的两个参数 (Q_1, β) 的函数, Q_1, β 是两个变量参数。表3给出了部分传播环境和地区的 Q_1, β 值,可以看出 Q_1, β 值在不同传播环境和地区差别很大,对应计算得到的 Q 值也不同。

表3 不同传播环境和地区的 β 和 Q_1 值

Table 3 β and Q_1 values for various propagation effects and locations

| 地区 | 降雨率(β, Q_1) |
|------------------|---------------------|
| 经常下雨的热带、亚热带和温带地区 | 0.15, 2.82 |
| 干温带、极地和沙漠地区 | 0.11, 4.48 |
| 巴西赤道地区 | 0.13, 2.85 |
| 巴西热带海洋 | 0.21, 2.25 |
| 韩国 | 0.12, 4.60 |
| 吉尔吉斯斯坦平原地区 | 0.09, 5.95 |
| 中国北方 | 0.13, 4.12 |
| 中国沙漠地区 | 0.10, 5.40 |

以经常下雨的热带、亚热带和温带地区和干燥的温带、极地和沙漠地区为例,图1给出了全球子区域参数表示的 Q 和 p 关系的曲线图。

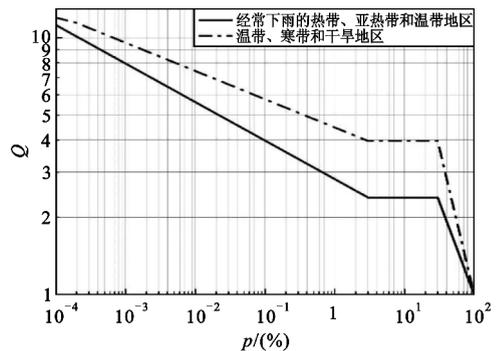


图1 用全球子区域参数表示的 Q 和 p 关系的实例
Fig. 1 Example of the dependence of Q on p with global subregion parameters

对于经常下雨的热带、亚热带和温带地区, $Q_1 = 2.82, \beta = 0.15$; 对于干燥的温带、极地和沙漠地区, $Q_1 = 4.48, \beta = 0.11$ 。这样就导出了下面的 p 和 p_w 之间的关系式: 对于经常下雨的热带、亚热带和温带地区, 满足条件 $p(\%) = 0.30p_w(\%)^{1.18}$, 其中 $7.7 \times 10^{-4} < p_w(\%) < 7.17$; 对于干燥的温带、极地和沙漠地区, 满足条件 $p(\%) = 0.19p_w(\%)^{1.12}$, 其中 $1.5 \times 10^{-3} < p_w(\%) < 11.91$ 。

(3) 雨衰预测模型

降雨引起的衰减 γ (dB/km) 可以从降雨强度 R (mm/h) 的幂次律关系式中算出^[18]:

$$\gamma = k(R)^\alpha \quad (2)$$

其中, 系数 k 和 α 为幂指数系数, k 表示水平极化系数 k_H , 或垂直极化系数 k_V , α 表示水平极化系数 α_H , 或垂直极化系数 α_V ; 它们主要与频率、雨滴大小分布、雨的温度以及极化方式相关。因此, 在不同气候区域, 系数 k 和 α 值相差较大。以 Ku 频段电磁波为例, 在马来西亚热带地区通过实验统计得到的与

ITU 提供的 k 和 α 值有非常显著的差别^[19], 如表 4 所示。

表 4 Ku 频段 (11 GHz) 的幂系数 k 和 α 的值
Table 4 k and α values for Ku-band (11 GHz)

| 来源 | k | α |
|-------|---------|----------|
| ITU-R | 0.013 2 | 1.239 1 |
| 实验统计 | 0.876 9 | 0.505 5 |

3.1.2 对流层闪烁

闪烁是指无线电波穿过大气层传播时, 由较小尺度的介质不规则性引起的电波振幅与相位快速随机起伏现象。闪烁效应和湿度、温度以及气压相关, 研究对流层闪烁的本质其实就是分析气候环境对闪烁的影响。相比于其他气候带地区, 热带地区常年炎热, 温度较高, 且湿度较大。因此, 热带地区需要有专门的闪烁预测模型进行闪烁强度的预测。在预测闪烁强度时, 时间百分比因子取决于纬度 Ψ , 不同的纬度对应不同的系数 C_{Lat} :

$$C_{Lat} = \begin{cases} 0, & 53^\circ S \geq \Psi \leq 53^\circ N \\ -53 + \Psi, & 53^\circ S \text{ 或 } N < \Psi < 60^\circ S \text{ 或 } N \\ 7, & \Psi \geq 60^\circ S \text{ 或 } N \end{cases} \quad (3)$$

3.1.3 大气波导

在频率高于约 0.1 GHz 时地球表面上电台之间干扰的预测方法中^[20], 干扰因素较多, 计算复杂。其中, 在水面上和在平坦的沿海陆地区域, 大气波导是最重要的短时间干扰机理之一, 它可能在很远距离(海面上长于 500 km)上产生高信号电平。在某些条件下, 这样的信号可能超过等效“自由空间”电平。

而大气波导的出现由气象条件决定。一般在夏天雨后初晴的稳定天气, 容易在大气层里形成大气波导。在沿海地区, 当陆地上干燥的热空气团向海上移动后, 也容易产生。大气波导一般在低纬和中纬地区产生的比较多, 尤其是沿海地区和海面上出现的更多。因此, 热带电波传播的研究中, 大气波导是关键影响因素之一。

3.2 热带地区地面及其覆盖物影响电波传播的核心因素

所有的频段, 地面及其覆盖物对无线电波传播的影响是不可回避、不容忽视的因素。与非热带地区相比, 热带地区的植被和海洋环境较为特殊, 是研究电波传播需重点区别对待的核心因素。

3.2.1 植被

典型热带丛林有如下特点: 一是植被种类丰富, 树种混杂, 树林有明显的分层, 一般有 5~8 层, 最高的乔木层高达 60~80 m, 林下有小乔木、灌木和草本植物等; 二是四季常青, 一年到头都有花开花落,

为争夺阳光, 植物都高大挺拔; 三是气温高, 湿度大, 年平均温度 24.6℃, 最高达 40℃, 只有干湿季之分, 雨季长达半年以上, 年雨量大于 2 000 mm。从区别于非热带地区的热带丛林特点可以判断, 其对电波传播和天线性能的影响不同于非热带地区, 因此热带植被的研究一直受到无线电波界的高度重视和普遍关注。

美国曾在泰国中部和南部等典型的热带干湿林和雨林进行了长期的电波传播实验, 积累了大量数据。学术界广泛研究了热带地区从短波到毫米波段的植被路损模型, 主要集中分析了枝叶信道环境中不同因素对路损模型的影响, 包括树木的类型、路径的几何形状、天线的高度、天气的影响(湿度的季节性变化、风引起的时间变化)等^[21-23]。此外, ITU-R P. 833-7 建议提出了 30 MHz 与 60 GHz 频率范围内植被引起信号衰减的计算方法^[24], 无线电波传播经过树丛时引起的总损耗 L_{total} 计算公式中涉及植被典型的叶片大小、树木种类的叶片面积指数(LAI)、植被深度(m)及仰角等参数。

3.2.2 海洋

热带地区海域广、地貌复杂, 地球表面约 71% 为海洋所覆盖, 热带地区海洋面积最大, 电波传播不可避免地要受到热带海洋的影响。海洋影响涉及海水盐度、海洋相对介电常数和海洋导电率等因素。

依据 ITU-R P. 368-9 建议书提供的频率在 10 kHz 和 30 MHz 间的地波场强预测方法^[25], 仿真得出了图 2 和图 3 所示的海水和淡水环境下不同频率的地波传播曲线。对比分析可知, 30 MHz 地波在海水环境下 10 km 处的场强值 (dB μ V/m) 是淡水环境下的 1.7 倍。因此, 海水盐度会严重影响地波传播。从图 2 和图 3 还可得出地波场强值与海洋相对介电常数和海洋导电率有关, 在 ITU-R 提供的 30 MHz~50 GHz 频率范围内地面传播模型的计算方法中也涉及海洋相对介电常数和海洋导电率^[26]。

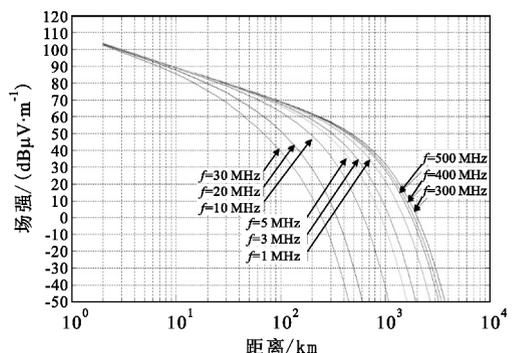


图 2 地波传播曲线:海水

Fig. 2 Ground wave propagation curve: seawaters

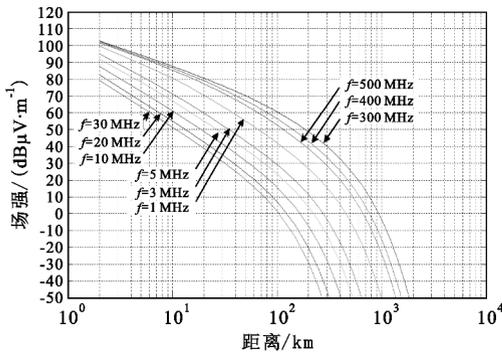


图3 地波传播曲线:淡水

Fig. 3 Ground wave propagation curve: freshwaters

4 热带无线电波传播研究的展望

近年来,随着信息通信技术的飞速发展及发展中国家经济实力的稳步增长,热带地区电波传播研究不断深入,已成为当前研究热点。尽管目前关于热带电波传播的研究涉及面广,如热带无线电气象学、热带电波的传播效应以及具体业务和典型系统的传播预测模型等,但热带电波传播仍有一些值得研究和探讨的领域,归纳起来包括以下三方面。

(1) 热带 V 频段地空卫星链路性能预测研究

在热带地区, Ku 频段的卫星系统几近饱和,同时, Ka 频段的卫星系统数量不断增长。在频谱需求面临日益饱和的形势下, V 频段以能大幅提升系统容量备受业界广泛关注。尽管 V 频段链路理论上的带宽很大,但与低频段相比,由于更高的射频损耗、更高的大气传播损耗、更高的雨衰等原因,它在很多方面性能难以实现。因此,如何评估热带地区 V 频段卫星链路的衰落特性,进而设计衰落消除技术是应用 V 频段亟需解决的问题。

(2) 热带森林信道传播特性研究

在热带地区森林中,除降雨率特别高外,暴雨伴随着强风是特别常见的气候现象,雨和风的聚集效应对电波传播特性将产生巨大影响,不仅仅只考虑雨衰和植被衰落。因此,如何为热带森林电波传播建立合理的无线信道模型,去除聚集效应带来的信号衰减是需考虑的问题。

(3) 热带衰落消除技术研究

在热带地区,运营在 10 GHz 频段以上的卫星通信系统会由于暴雨遭受各种各样衰落的影响。在设计通信网络时,服务运营商就需考虑选择合适的衰落消除技术以应对严重的雨衰。通常,可用的衰落消除技术包括前向纠错编码技术、调制技术、均衡技术^[27]、分集技术(时间分集、站址分集、频率分集、轨

道分集等)、上下行链路功率控制^[28]等。那么,如何选取和创新衰落消除技术以应对热带气候环境引入的各种衰落效应仍是具体业务和典型系统设计所面临的巨大挑战。

5 结束语

随着经济的稳步发展和无线电的广泛应用,无线电波传播研究引起了热带地区国家专家学者的高度重视,再一次掀起了无线电波传播研究的热潮。三亚作为我国唯一的热带气候地区,是海南省南部的中心城市和交通通信枢纽,是我国东南沿海对外开放黄金海岸线上最南端的对外贸易重要口岸,还是保护南海诸岛的后方基地。由此可见,三亚地理位置特殊,战略地位重要,在三亚全面深入开展无线电波传播研究具有深远而重大的战略意义。鉴于此,本文总结了国际组织 ITU 和 URSI 关于热带无线电波传播的研究进展情况,剖析了热带地区影响无线电波传播的核心因素,归纳了发展趋势和重点研究方向,旨在吸引学术界与产业界更为广泛的关注,以期推动热带无线电波传播研究在我国取得突破性进展。

参考文献:

- [1] Haslett C. Essentials of Radio Wave Propagation [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2008.
- [2] Saakian A. Radio Wave Propagation Fundamentals [M]. London: Artech House Publishers, 2011.
- [3] Blaunstein N. Radio Propagation and Adaptive Antennas for Wireless Communication Networks [M]. Hoboken: John Wiley & Son Press, 2014.
- [4] 刘义. 视距传播中地面起伏对传播中值衰减的影响[J]. 电讯技术, 2003, 43(4): 103-106.
LIU Yi. Effect of the Roughness of the Ground - surface on the Line of sight Propagation [J]. Telecommunication Engineering, 2003, 43(4): 103-106. (in Chinese)
- [5] Dijk J, Brussaard G, Holleboom K. Concerted action in African telecommunications research [C]// Proceeding of the 4th AFRICON. Cape Town, South African; IEEE, 1996: 308-313.
- [6] ITU Radio-communication sector. RESOLUTION 8-1 Radio-wave propagation studies and measurement campaigns in developing countries [R]. Geneva: ITU, 2012.
- [7] ITU Radio-communication sector. Study Group 3-Radio-wave propagation [R]. Geneva: ITU, 2013.
- [8] ITU Radio-communication sector, Recommendation ITU-R P. 833-7, Attenuation in vegetation [S].
- [9] Recommendation ITU-R P. 368-9, Ground-wave propagation

curves for frequencies between 10 kHz and 30 MHz[S].

[10] Recommendation ITU-R P. 527-3, Electrical Characteristics of The Surface of The Earth[S].

[11] Recommendation ITU-R P. 453-10, The radio refractive index; its formula and refractivity data[S].

[12] Recommendation ITU-R P. 1853-1, Tropospheric attenuation time series synthesis[S].

[13] Recommendation ITU-R P. 682-3, Propagation data required for the design of Earth-space aeronautical mobile telecommunication systems[S].

[14] International Union of Radio Sciences. Scientific Commissions F: Wave Propagation and Remote Sensing & Scientific Commissions G: Ionospheric Radio and Propagation [EB/OL]. 2014-6-16 [2014-8-11]. <http://www.ursi.org/en/commissions.asp>.

[15] 焦培南. 我国电波传播学发展的回顾和展望 [J]. 电波科学学报, 1992, 7(4): 528-532.
JIAO Pei-nan. Review and Prospect of the Development of wave propagation in China [J]. Chinese Journal of Radio Science, 1992, 7(4): 528-532. (in Chinese)

[16] Recommendation ITU-R P. 618-10, Propagation data and prediction methods required for the design of Earth-space telecommunication systems Attenuation in vegetation[S].

[17] Recommendation ITU-R P. 841-4, Conversion of annual statistics to worst-month statistics[S].

[18] Marzuki M. Diurnal Variation of Rain Attenuation Obtained From Measurement of Raindrop Size Distribution in Equatorial Indonesia[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2009, 57(4): 1191-1196.

[19] Ismail A F, Badron K, Yaccop A A H, et al. Determination of Ku-band specific attenuation parameters based on measurements in the tropics [C]//Proceedings of 2013 Antennas and Propagation Society International Symposium. Orlando, Florida: IEEE, 2013: 2008-2009.

[20] Recommendation ITU-R P. 452-14, Prediction procedure for the evaluation of interference between stations on the surface of the Earth at frequencies above about 0.1 GHz[S].

[21] Liao D, Sarabandi K. Near-earth wave propagation characteristics of electric dipole in presence of vegetation or snow layer [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2005, 53(11): 3747-3756.

[22] Liao D, Sarabandi K. Modeling and simulation of near earth propagation in presence of a truncated vegetation layer [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2007, 55(3): 949-957.

[23] Joshi G G, Dietrich C B, Anderson C R, et al. Near-ground channel measurements over line-of-sight and forested paths [J]. IEE Proceedings- Microwave Antennas and Propagation, 2005, 152(6): 589-596.

[24] Recommendation ITU-R P. 833-7, Attenuation in vegetation[S].

[25] Recommendation ITU-R P. 368-9, Ground-wave propagation curves for frequencies between 10 kHz and 30 MHz[S].

[26] Recommendation ITU-R P. 2001, A general purpose wide-range terrestrial propagation model in the frequency range 30 MHz to 50 GHz[S].

[27] 陈强. 低空无线信道建模及其均衡技术研究进展 [J]. 电讯技术, 2012, 52(1): 117-124.
CHEN Qiang. Research Progress of Low-altitude Wireless Channel Modeling and Equalization Techniques [J]. Telecommunication Engineering, 2012, 52(1): 117-124. (in Chinese)

[28] Pan Qing-wei. Evaluation of Diversity and Power Control Techniques for Satellite Communication Systems in Tropical and Equatorial Rain Climates [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2008, 56(10): 3293-3301.

作者简介:



李伟(1984—),男,湖北黄冈人,2013年于北京邮电大学信息与通信工程学院获博士学位,现为国家无线电监测中心工程师,主要从事无线电波传播、无线信道测量与建模、频谱管理技术、HetNets异构无线组网技术等方面的研究工作;

LI Wei was born in Huanggang, Hubei Province, in 1984. He received the Ph. D. degree from Beijing University of Posts and Telecommunications in 2013. He is now an engineer. His research concerns radio wave propagation, wireless channel measurement and modelling, spectrum management technique, heterogeneous wireless network technique.

Email: liwei@srcc.org.cn

杨森(1984—),男,北京人,2012年于北京理工大学获博士学位,现为国家无线电监测中心工程师,主要研究方向为电波传播研究、无线电新技术、无线电频谱资源管理;

YANG Miao was born in Beijing, in 1984. He received the Ph. D. degree from Beijing Institute of Technology in 2012. He is now an engineer. His research concerns radio wave propagation, new radio technique and radio spectrum management.

戴慧玲(1987—),女,河北枣强人,2013年于北京邮电大学获硕士学位,现为国家无线电监测中心助理工程师,主要研究方向为无线信道测量与建模、无线电新应用、空间通信技术、TD-LTE。

DAI Hui-ling was born in Zaoqiang, Hebei Province, in 1987. She received the M. S. degree from Beijing University of Posts and Telecommunications in 2013. She is now an assistant engineer. Her research concerns wireless channel measurement and modelling, radio applications, space communication techniques and TD-LTE.