

DOI: 10.3724/SP.J.1224.2013.00092

“走向蔚蓝：海洋经略面面观”专栏

海上低空大气波导及其应用综述

成印河，薛宇峰，朱凤芹

(广东海洋大学海洋与气象学院，陆架及深远海气候、资源与环境省教育厅重点实验室，广东湛江 524088)

摘要:低空大气波导对电波传播和探测通信系统等具有重要影响,研究大气波导环境和开发其应用系统具有重要的科学意义和应用价值。本文以工程应用为目标,简要概括了海上蒸发波导、表面波导和悬空波导的调查方法和主要研究进展,以及基于大气波导环境的电波传播评估系统。蒸发波导调查,一般通过近海面气象要素廓线进行间接的观测,在工程中多利用相似理论计算大气折射率廓线,该方法已集成到许多针对电波传播效应开发的软件中。表面和悬空波导调查,大多采用气象探空方法进行观测,近年来对该类大气波导环境的观测方法,由通过天气图、卫星云图等进行定量分析和估算,逐渐发展为中尺度天气数值式精确确定,在工程中更倾向于海气耦合数值模式,如美国的 COAMPS 业务系统。关于大气波导传播效应的主要理论有几何光学理论、波导模理论和抛物型方程,其中抛物型方程理论应用较多。最后指出大气波导研究在工程方面努力的方向,即结合中尺度数值模式和电波传播模式发展三维可视化系统,准确可靠地提供电波环境信息和预测预报,更好地为经济和国防建设服务。

关键词:大气波导; 波导类型; 电磁环境; 应用系统

中图分类号: P421.3, P732.6, TNO011 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-4969(2013)01-0092-08

引言

电波(又称电磁波)作为信息载体几乎每时每刻都存在于我们周围。我们周围的大气环境,尤其是对流层大气,对电波传播产生重要的影响。不仅对流层中的沉降物,如降雨、降雪、雾等,对电波传播产生衰减、散射等效应,大气本身也会对电波传播产生影响。在一定的气象条件下,在对流层尤其是近地层中传播的电磁波,受大气折射影响,其传播轨迹弯向地面,当射线曲率半径小于地球半径时,电磁波会部分地陷获在一定厚度的大气层,这种传播现象被称为大气波导传播,该层大气称为大气波导^[1]。

大气波导传播可使电波,尤其是无线电波,实现超视距传输,传播距离可达上千千米。利用大气波导现象可使雷达实现超视距传播和探测^[2]。为了合理利用大气波导传播,亟需对大气波导形成的环境因子、天气过程等进行研究,开展电波传播理论及应用研究。海上大气环境下大气波导发生概率较高,持续时间长,比较稳定,大气波导环境研究及其应用也可为制海权提供支撑。因此,海上大气波导环境成为近年来国内外专家、学者的研究热点。

在海洋大气环境中,通常按照大气折射率廓线形状和所在大气中的位置,将大气波导分为蒸

收稿日期: 2013-01-07; 修回日期: 2013-01-25

基金项目: 国家自然科学基金项目“南海近岸蒸发波导的观测及其模式研究”(41106011); 广东海洋大学人才引进项目“南海低空大气波导环境研究”(1012360)

作者简介: 成印河(1980-), 男, 讲师, 主要从事大气波导环境及数值模拟研究。E-mail: yinhe_9951@163.com

朱凤芹(1981-), 女, 讲师, 主要从事海气相互作用研究。E-mail: fqzhu_07@163.com

发波导、表面波导、悬空波导三种类型(图1)。在垂直高度上存在以上两种波导则称为复合波导。

在大气波导环境的研究中,不同波导类型,描述波导参数略有不同,主要有波导厚度、波导强度 δM 、陷获层、底高和顶高。在正常的折射下,修正大气折射率随高度变大,形成正常的大气环境;相反则形成大气陷获层,能够捕获某些频段的无线电波,使其折向地球表面传播,由于无线

电波进入部分正常大气后,正常折射后又会发生反射,遂可使无线电波限制在该层大气中传播。这层大气被称为大气波导,其位置用大气波导底高和顶高确定,二者之间的距离称为波导厚度。该层内最大和最小修正大气折射率之差称为波导强度 δM 。波导厚度和强度共同描述该层大气捕获无线电波的能力。除蒸发波导外,所有大气波导类型也经常发生在陆地环境中。

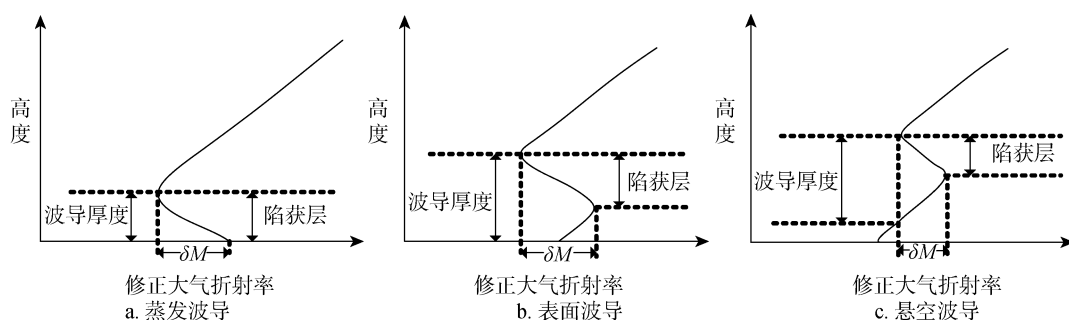


图1 波导类型

图片来源:文献[3]13。

1 大气波导环境的研究进展

大气波导环境研究起源于军事上大气波导传播研究和应用的需要,是电波环境研究中的一个重要分支。由于大气波导类型和形成机制不同,其调查和研究方法也不同。

1.1 蒸发波导

海上蒸发波导是由于海水的蒸发引起湿度随高度锐减而形成的^[4]。蒸发波导环境通常由蒸发过程引起,因此,在海洋或者大面积水域上空,蒸发波导出现概率较高,一般高于80%,厚度从几米到40 m,波导强度最强达40兆单位,且持续时间长。有时大雨或融雪后的陆地也可形成蒸发波导,但其出现概率低且寿命短^[5]。由于蒸发波导发生高度较低,因此对其的调查一般存在两种方法,即运用微波折射率仪直接探测大气折射率廓线和利用探空气球、海岸铁塔等测量梯度气象数据进而间接地计算近海面大气折射率廓线。

由于蒸发波导受海气交界面处微气象条件湍流的影响和制约,学者、专家都热衷于通过研究宏观观测资料的经验关系发展蒸发波导诊断模型,然后计算大气折射率廓线,先后出现了多种确定蒸发波导高度的诊断模式^{[6]347-353}。这一方法通常在评估电磁波传播的开发软件中有所应用,如美国海军海洋系统中心研制的个人电脑版的工程折射效应预报系统(Engineer's Refractive Effects Prediction System, EREPS)中应用的就是PJ模式^[7]。

然而蒸发波导诊断模型大多基于水平均匀的海气相互作用区域建立,因此其适用区域也是有限的,除国内伪折射率模式^[8]和New模式^{[9]220-224}外,大部分适用于开阔海洋。开阔海洋的海洋大气界面环境并不是水平均匀的,因此这些模型并不具有普适性。许多机构、学者转而发展其他方法。20世纪80年代美国研究建立了以美国海军业务全球大气预报系统(Navy Operational Global

Atmospheric Prediction System, NOGAPS) 输出的预报量作为模式输入的全球表面接触界面蒸发波导预报模式^[10], 并投入业务使用。20 世纪 80 年代, 法国基于欧洲中期天气预报中心的数值预报产品, 根据莫宁-奥布霍夫相似理论, 对大西洋和印度洋部分海域进行蒸发波导高度预报, 其结果偏高^{[9]244}。国内研究人员尝试采用卫星遥感资料反演的海表面参量, 如气温、相对湿度、风速、SST 等, 进行蒸发波导的诊断计算, 确定卫星资料在蒸发波导应用上的适用性^[11], 然而区域验证的底层大气剖面数据有限, 分辨率较低; 同时结合中尺度天气数值模式 MM5 和 WRF 耦合蒸发波导模式进行诊断计算^{[6]351}, 分析中国海域蒸发波导时空统计规律及季节和日变化^[12]。此外, 伴随着遥感技术的进步, 蒸发波导研究也出现了一些新的方法, 如直接利用雷达接收的海面回波反演近海面的大气折射率廓线^{[6]350-351}。

1.2 表面波导和悬空波导

大气逆温层往往伴随着湿度锐减, 是发生稳定的且持续时间较长的大气波导的高发区。表面波导和悬空波导通常是由于湿度随高度锐减, 或者温度随高度递增, 或者大气逆温伴随着湿度锐减而形成的。对于这两种类型的波导, 其调查方法与蒸发波导类似, 直接用微波折射率仪测量大气折射率, 利用无线电探空仪和低空探空火箭探测气温、气压和湿度, 通过折射率公式计算大气折射率廓线。虽然利用微波折射率仪直接测量大气折射率的精度高, 但其结构相对复杂, 造价高, 需要专门人员维修、校正等, 导致使用不便。因此在实际应用中多采用间接方法获取大气折射率廓线, 如美国海军为了实时保障“宙斯盾”级巡洋舰上 AN/SPY-1 雷达的作战性能, 在其上研制配备了“舰载环境评估/武器系统性能”系统 (SEAWASP), 该系统是利用低空一次性火箭获取大气折射率廓线的^{[9]139-140}。

对于这两种类型大气波导环境, Bean 等学者提出了大气折射指数与气温、气压、水汽压的关系式和大气波导存在的判据, 揭示了其形成的主要天气学条件^[13]。利用天气图与大范围的大气折射环境的关系, 可研究大气波导的预测和预报。因此结合天气图和卫星云图中云的特征信息, 可以提取出大气折射状况信息, 如 2012 年成印河等基于天气图、卫星云图及中尺度数值模式 MM5 分析了 2008 年“威马逊”台风期间的海上大气波导时空特征^[14]。美国海军在 20 世纪 70 年代初就已经开始研究天气尺度、天气形势对电波传播的影响及其与大气折射指数间的关系。20 世纪 80 年代美国海军环境预测机构、海军研究实验室和太平洋导弹试验中心的研究人员, 提出了一套利用天气特征预报大气折射条件的方案, 被称为《折射影响指南》, 但利用该方案预测大气折射条件并不比随机猜测更好, 最终被取消^{[9]143-144}。此后美国海军一直探索新的利用天气参数预报大气折射条件的研究。1983 年, 美国太平洋导弹试验中心的 Helvey 等通过研究天气图上的气团、气旋、反气旋、锋面系统和卫星云图上云的结构特征与大气环境折射条件间的关系, 提出了一个天气-折射关系模式、一系列有利于不同折射条件下的经验规则和一套利用天气尺度气象条件预报大气折射条件的临时方案^[15]。图 2 为适用于北太平洋副热带、热带海域的天气-折射关系模式中的大气折射情况定型分析图。

Culbertson 在 1990 年分析比较了实际探空资料和上述利用大气折射条件临时方案的预报结果, 认为该临时方案预报成功率为 60 %^{[16]1-3}。国内也曾通过分析天气形势及天气要素的变化等, 对东南沿海的波导结构进行预报研究, 准确率达到 70 %^[17], 然而此种方法并未被深入地集成应用到电波评估系统。对于那些只能获得天气云图和卫星云图, 无法获取直接探空资料的舰艇来说, 能否有效预报大气折射条件具有极其重要的意义。因此美国海军研究发展了根据卫星云图导出

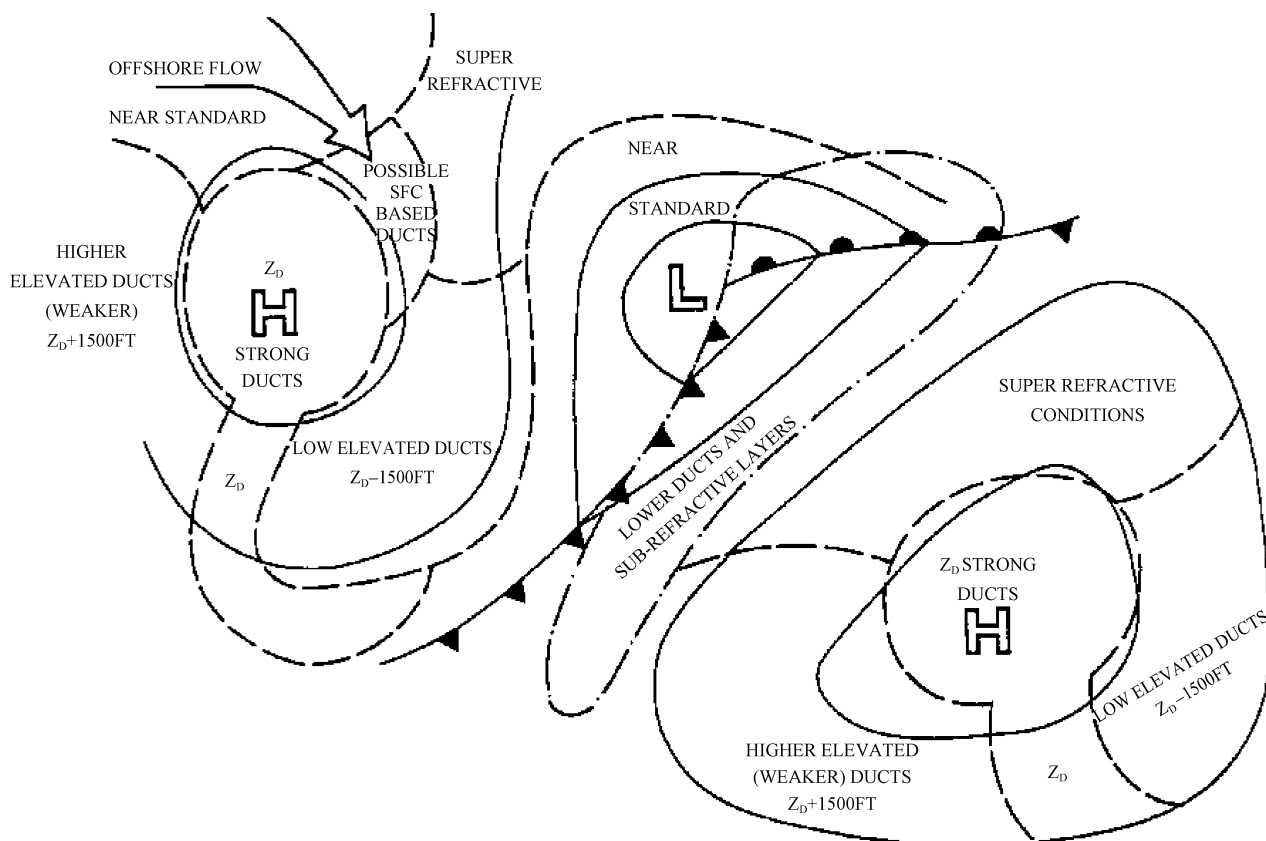


图2 大气折射环境定型分析

图片来源: 文献[16] 55。

的云顶温度估计副热带海域悬空波导高度的“卫星红外-波导”技术。而后, Rosental 又开发出既可以适用于有云区域又可以适用于无云区域的估计波导高度的技术^{[9][149]}。

随着数值天气预报技术的进步, 中尺度数值模式被成功应用到大气波导的研究中来。美国海军利用区域大气预报系统 NORAPS (Navy Operational Regional Atmospheric Prediction System) 预报大气折射指数, 分析电磁环境。Burk 和 Thompson 在 1989 年基于海岸大气折射指数变化试验, 对 NORAPS 预报大气折射指数的能力作了论证, 认为中尺度数值模式在大气波导环境量化方面的精度不是很理想^[18]。后来, Martin 等^[19]也认为发展和提高中尺度大气数值模式能够提高大气波导环境预测和估算精度。尽管利用中尺度数值模式预报大气折射环境存在许多问题, 但其在非常稀少的海洋上空观测中已成为主要的研究

工具。利用中尺度数值模式可以预报三维空间大气环境折射指数, 结合电磁波传播理论, 可以预报和评估战场海洋大气环境对电磁波传播的影响。美国海军研究实验室开发研制的海洋大气耦合中尺度预报系统 (Coupled Ocean/Atmosphere Mesoscale Prediction System, COAMPS) 已经投入业务使用, 进行研究、预报蒸发波导高度和大气折射环境^[20]。图 3 为 COAMPS 系统模拟的一个区域及陷获层分析结果。

随后的研究中出现了紧密结合数值天气预报的新技术和方法, 如资料同化技术, 改进次网格参数化, 对全球区域, 尤其是战略海域, 如波斯湾海域, 开展观测和数值实验, 改进和提高大气波导环境参数预测和预报精度。Engeln 等分别于 2003 年^[21]和 2004 年^[22]基于不同时间的欧洲中尺度天气预报中心全球格点数据, 对全球大气波导事件及其分布进行了研究, 从气候学的角度分析

对于大气波导环境及其应用, 中国也非常重视, 先后研制了“大气波导传播分析与应用软件系统 V.98 和“大气波导传播分析与应用软件系统 V1.0”^{[9]378}。其中, V.98 版的系统于 1998 年研制完成, 该软件系统运行于 Windows 95 环境下, 可以处理探空资料, 分析大气折射条件, 诊断是否存在表面波导和悬空波导, 以及波导特征量; 可以利用海面气象水文观测资料诊断分析蒸发波导及其特征量; 可以计算查询中国海域及邻海海域各月多年月平均海面大气折射率、蒸发波导高度及受蒸发波导影响的最低电磁波频率; 可以计算绘制电波传播损耗图和电波射线轨迹图; 结合雷达参数, 可以计算雷达自由空间距离, 绘制雷达覆盖图等。V1.0 版的系统于 2000 年完成, 运行于 Windows 98/2000 环境下, 是 V.98 版的升级版。在该版本中采用六种模式计算、诊断蒸发波导, 采用美国海军地形抛物型传播模式分析评估电波传播模式。作为电波环境一项重要的应用, 中国电波传播研究所已成功开发出包括部分大气波导环境信息的研究成果的系统级电波环境基础信息服务系统——“电波环境信息实时查询系统(1.0 版)”, 并在专门的网站发布^[30]。

3 结语

21 世纪是海洋的世纪, 海上大气波导为海上舰载雷达、通信设备提供环境支撑, 对它的研究涉及海洋学、气象学和电波传播等学科, 是电波环境信息技术研究的重要组成部分。中国关于海上的大气波导研究虽然起步较晚, 但也紧随先进国家研究的步伐, 集中研究中国附近沿海大气波导环境。研究的终极目标就是把专门的信息转向为公共服务信息, 为海上雷达设计、研制、生产、试验和作战提供电波环境信息服务系统, 集成最新的研究成果开发电波环境数据库、远程查询服务单元、信息发布服务单元、环境特征提取与可视化系统。

海上大气波导研究已由定性分析逐步转移到

定量的研究上来, 中尺度数值模式成为最主要的研究手段, 尤其是对于缺少探空资料的海上大气波导; 同时电波传播研究取得了许多优秀的研究成果。结合数值天气预报技术的最新研究进展和电波传播研究的最新成果, 需进一步开发和完善电波环境预测评估系统。随着国家资助力度增加、研究单位的增加、研究手段的多样化, 多单位协作, 坚信不久海上大气波导研究将取得更好的研究成果, 更好的服务于国防建设。

参考文献

- [1] Freehafer J E, Kerr D E. Tropospheric Refraction Propagation of Short Radio Wave[M]. Los Altos Hills: Peninsula Publishing, 1988: 9-22.
- [2] Battan L J. Radar Observation of the Atmosphere[M]. Chicago: University of Chicago Press, 1973: 324.
- [3] 成印河. 海上低空大气波导的遥感反演及数值模拟研究[D]. 青岛: 中国科学院海洋研究所, 2009: 13.
- [4] Cook J. A Sensitivity Study of Weather Data Inaccuracies on Evaporation Duct Height Algorithms[J]. *Radio Science*, 1991, 26: 731-746.
- [5] 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: 11.
- [6] 漆随平, 王东明, 郭颜萍, 等. 海上蒸发波导的预测方法综述[J]. *海洋通报*, 2012, 31(3).
- [7] 蔡世樵. 台湾地区蒸发导管之特性研究[D]. 台湾: 国立中央大学, 2005: 33-42.
- [8] 刘成国, 黄际英, 江长荫, 等. 用伪折射率和相似理论计算海上蒸发波导剖面[J]. *电子学报*, 2001, 29(7): 970-972.
- [9] 戴福山. 大气波导及其军事应用[M]. 北京: 中国人民解放军出版社, 2002.
- [10] Thompson W T. The Surface Evaporation Duct Height Product: An Evaluation[R]. Monterey: Naval Environmental Prediction Research Facility, 1987: 1-2.
- [11] 成印河, 何宜军, 赵振维, 等. 利用 AMSR-E 卫星数据反演蒸发波导高度的 BP 神经网络方法[J]. *海洋技术*, 2008, 27(4): 63-67.
- [12] 杨坤德, 马远良, 史阳. 西太平洋蒸发波导的时空统计规律研究[J]. *物理学报*, 2009, 58(10): 7339-7350.
- [13] Bean B R, Dutton E J. Radio Meteorology[M]. New York: Dover Publication Inc, 1968: 435.
- [14] 成印河, 周生启, 薛宇峰. 2008 年“威马逊”台风期间海上大气波导时空特征[J]. *广东海洋大学学报*, 2012, 32(3): 64-69.
- [15] Battalino T E, Helvey R A. Air Trajectory Parameterization Technique for Use in the Navy Aerosol Model[R]//

- Geophysical Sciences Technical Note No.82. Point Mugu: Pacific Missile Test Center, 1983: 2450–2465.
- [16] Culbertson G W. Assessment of Atmospheric Effects on VHF and UHF Communications[D]. Monterey: Naval Postgraduate School, 1990.
- [17] 潘中伟, 刘成国, 郭丽. 东南沿海波导结构的预报方法[J]. 电波科学学报, 1996, 11(3): 58–64.
- [18] Burk S D, Thomapson W T. A Vertically Nested Regional Numerical Weather Prediction Model with Second-order Closure Physics[J]. Monthly Weather Review, 1989, 117: 2305–2324.
- [19] Otte M J, Seaman N L, Stauffer D R, et al. A Mesoscale Model for EM Ducting in the Marine Boundary Layer[R]. Philadelphia: The Pennsylvania State University, 1996: 5–6.
- [20] COAMPS® Refractivity and EM Propagation Analysis and Prediction [EB/OL]. (2006-04-04)[2012-12-20]. <http://www.nrlmry.navy.mil/refract/refract2005.htm>.
- [21] Axel V E, Nedoluha G, Teixeira J. An Analysis of the Frequency and Distribution of Ducting Events in Simulated Radio Occultation Measurements Based on ECMWF Fields[J]. Journal of Geophysics Research, 2003, 108 (D21): ACL3-1-ACL3-12.
- [22] Axel V E, Teixeira J. A Ducting Climatology Derived from ECMWF Global Analysis Fields[J]. Journal of Geophysics Research, 2004, 109(D18): 1–18.
- [23] Zhu M, Atkinson B W. Simulated Climatology of Atmospheric Ducts over the Persian Gulf [J]. Boundary-layer Meteorology, 2005, 115: 433–452.
- [24] 陈莉. 中国近海大气波导的统计特征分析及演变机理的数值研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2010: 4–5.
- [25] 陈莉, 高山红, 康士峰, 等. 中国近海局部海域低空大气波导的天气学特征分析[J]. 电子学报, 2010, 38(9): 1997–2002.
- [26] 刘成国, 潘中伟. 低空大气波导的研究状况及前景[J]. 电波与天线, 1996(1): 1–5.
- [27] 赵小龙, 黄际英, 温志贤, 等. 大气波导中的电波传播与环境特性研究进展[J]. 装备环境工程, 2009, 6(5).
- [28] Patterson W L, Hattan C P, Lindem G E, et al. Engineer's Refractive Effects Prediction System(EREPS) Version 3.0[R]. San Diego: Naval Command Control and Ocean Surveillance Center, 1994: 1.
- [29] 董庆生. 电波与信息化[M]. 北京: 航空工业出版社, 2009.
- [30] 焦培南, 张忠治. 雷达环境与电波传播特性[M]. 北京: 电子工业出版社, 2007: 9.

Review of Study on Atmospheric Ducts and Its Applications over the Sea

Cheng Yinhe, Xue Yufeng, Zhu Fengqin

(Key Laboratory of Climate, Resources and Environment in Continental Shelf Sea and Deep Sea, College of Ocean and Meteorology, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, Guangdong, China)

Abstract: Atmospheric duct plays a major role in propagation of radio waves and function of surveillance equipment system and so on. Research of atmospheric duct and its application system development are of great scientific and practical importance. To take engineering application as the target, this paper reviews briefly the main research methods and application systems of atmospheric duct including evaporation duct, surface duct and elevated duct. Evaporation duct is usually indirectly investigated from meteorological profiles near sea surface and atmospheric refractivity is calculated based on some similarity theory and the methods have been integrated into many radio propagation prediction systems. The surface and elevated duct are similarly observed by sounding balloons or micro-rockets. The atmospheric duct environments are studied from quantitative analysis based on synoptic maps, satellite images and so on to accurate quantification with mesoscale weather numerical models. Numerical models are often used in engineering prediction systems such as COAMPS. There are three major radio propagation models in atmospheric duct environments at present: geometrical optics model, guided mode and parabolic equation model. Parabolic equation models are mostly used in application systems. Engineering systems of atmospheric ducts are further developed in the field of image visualization system based on coupled ocean/atmosphere mesoscale prediction system and electromagnetic propagation models, which can offer more reliable and accurate electromagnetic environments and propagation estimations, and serve economic construction and national defense better.

Key words: atmospheric duct; duct types; electromagnetic propagation; application system