

综 述

微波超视距雷达大气波导环境

康士峰, 张玉生, 王红光

(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, 山东 青岛 266107)

摘要: 针对岸基/舰载微波超视距雷达远距离海上低空或海面目标探测的实际需求, 首先对大气波导的直接测量和遥感反演等探测方法进行了分析比较, 基于对大气波导形成机制和中尺度数值预报模式的分析, 指出了有效预报大气波导需要解决的3个基本问题, 最后对微波超视距雷达电波传播模型和评估方法进行了讨论。

关键词: 微波超视距; 雷达; 电波传播; 大气波导; 预报

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2013.05.018

中图分类号: TN926.4 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2013)05-0085-05

Atmospheric Wave-guide Environment for Microwave Over-the-horizon Radar

KANG Shi-feng, ZHANG Yu-sheng, WANG Hong-guang

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

Abstract: Direct measurement and remote sensing inversion methods of atmospheric wave-guide detection methods were analyzed and compared according to the practical requirements of shore or ship-borne microwave over-the-horizon radar for long distance low altitude and surface targets detection over sea. Based on the analysis of atmospheric wave-guide mechanism and mesoscale numerical weather forecast model, three fundamental problems were presented, which should be solved effectively for atmospheric wave-guide forecast. Radiowave propagation models and evaluation methods for microwave over-the-horizon radar were discussed.

Key words: microwave over-the-horizon; radar; radiowave propagation; atmospheric wave-guide; forecast

微波超视距雷达海上低空或舰船远距离目标探测对现代信息化战争具有重要的意义。在一般条件下, 因地球曲率的影响, 要实现地基/岸基/舰载雷达微波超视距传播十分困难。在正常折射条件下, 无线电视距可以大于几何视距, 由于绕射损耗在过渡

区和阴影区随距离增加而迅速增大, 因此, 地基、岸基或舰载微波雷达的传播距离十分有限。为了提供远距离视距传播路径, 可以采用机载平台或星载平台, 但在某些方面受到一定条件限制。由于在海上特定的大气和水文环境中, 经常存在超折射或大气

收稿日期: 2013-05-24

作者简介: 康士峰(1966—), 男, 河南人, 博士, 研究员, 主要研究方向为微波遥感、电波环境观测与传播特性研究。

波导(低空波导和蒸发波导),电波在波导中可以以较小的损耗传播比视距远得多的距离,因此,海上大气波导是一种可利用的超视距传播环境。另外,由于在海上对流层天气现象变化复杂,大气不均匀、湍流和水平层结的经常性出现,可以引起较强的对流层散射,使电波传播较远的距离,若采用较大的天线增益、适宜的几何与环境条件则有可能实现超视距传播,因此,利用海上对流层散射远距离传播也是一种有效的微波超视距雷达探测手段。相比而言,大气波导(低空波导和蒸发波导)超视距传播衰减减小,对天线要求较低,容易达到超视距探测的目的。我国拥有黄海、东海、东南沿海、南海等广大的海域,海上的安全保障成为国防和经济发展最为关注的战略问题,需要充分利用海上复杂环境条件,充分发挥包括微波超视距雷达在内的信息化装备的作战能力,进一步发展特殊新型的电波环境自适应雷达系统。

1 研究与发展状况

超视距雷达一般分为天波超视距雷达、低波超视距雷达和微波超视距雷达。微波超视距雷达又可分为主动和被动2种,主要用于岸基/舰船远程预警探测和定位,其关键技术在于对对流层大气环境和传播特性的研究,以提高超视距探测概率、定位和识别能力。20世纪60年代,为提升海上舰艇的超视距攻击能力,前苏联开始进行微波超视距雷达研究,完成了第一代舰载主/被动舰载微波超视距雷达系统的研制,至90年代已发展到了第三代。其代表性的系统即“米拉涅尔”雷达,主动模式下探测距离为200 km,被动模式下可超过400 km,我国在引进该雷达的同时也进行了国产化装备研制工作。由于微波超视距雷达依赖于对流层大气波导和不均匀散射传播机制对目标进行有效的探测,国外引进或自行研制的雷达都需要结合当地海洋水文气象条件才能发挥作用,否则会制约雷达超视距性能的发挥,因此,对流层电波环境的监测和预报研究和应用对微波超视距雷达至关重要。

影响电波传播特性的气象因素主要是大气折射指数。对流层折射指数具有非均匀的空间分布,电波在其中传播会产生大气折射效应,折射效应的显著程度主要依赖于沿路径的折射指数变化梯度和射线初

始仰角。当对流层折射指数随高度升高急剧下降时,电波射线向下弯曲的曲率大于地球表面曲率,形成对流层波导传播。蒸发波导是由于海水蒸发使得近海面水汽密度随高度增加迅速下降,从而使折射指数急剧减小,在海面大面积水域上空形成的一种贴海波导,为微波超视距目标探测提供了有利条件。

在雷达探测应用中人们早就注意到微波超视距现象的存在。半个世纪以来,为了有效应用大气波导现象,提高信息系统的作战效能,发达国家如美国和前苏联的许多研究机构针对海上大气波导进行了大量实验观测和理论研究^[1-4]。如1989年在荷兰北海进行的10.5 GHz的海上视距传播实验;1992年美国海军海洋系统中心(NOSC)开展的蒸发波导通信(EDCOM)试验;2000年在Wallops岛进行的微波传播测试实验;2001在美国夏威夷开展的S,X,Ku等3个频段的粗糙海面传播试验等。建立了多种电波环境预报模型,如PJ,MGB,NPS,LKB和伪折射率模式等,发展了针对不同电波环境的传播分析方法,如美军使用的AMP方法等。美军研制并装备部队使用的AREPS系统,由电波环境数据库、地理高程数据库、系统设备库、传播模型库、目标雷达截面库、电波环境预报和传播预测软件组成。其利用数值天气预报和其他遥感手段获得的电波环境数据,可实时预报电波传播环境,并根据不同环境的电波传播特性对信息系统的作战性能进行评估预测,除提供探测概率、探测盲区、传输损耗、传播因子和信噪比等参数预测评估外,还提供多种辅助决策功能,包括电子攻防预案、预警机位置预案、电子监视预案、UHF/VHF通信、HF通信辅助决策和硬件维护故障辅助诊断等。澳大利亚也开发出一套有助于军舰拦截来袭反舰导弹的辅助分析系统TREPS,该系统可使处在波导气象环境下的舰载雷达、电子支援措施(ESM)系统和通信系统发挥最佳效能,装备TREPS系统的舰艇能够确定采用何种雷达或系统最适合探测和跟踪目标。近年来,由于利用气象探空、折射率仪等直接测量手段获取电波环境数据在时间和空间上的局限性,因此难以获得连续观测数据和空间区域的分布特性,且容易暴露军事目标和作战意图。为了更加可靠,美国等发达国家加大了对电波环境特性遥感反演理论和方法的研究,发展了利用雷达海杂波信息反演区域大气导参数、激光雷达监测、微波辐射计

遥感反演、GPS/MET等电波环境遥感技术,提高了对电波环境感知和预报能力。国内在大气波导方面也进行了很多试验和理论研究,研究内容包括波导的统计特性、测量和预报方法、数值计算方法(如抛物方程、射线追踪等)、波导对雷达等系统的影响和评估等。由于长期以来我国在基础领域投入的严重不足,因此与欧美等发达国家仍存在较大差距,相关基础和应用研究亟待加强^[5-13]。

2 大气波导超视距环境

2.1 大气波导探测

由于大气波导的产生与海面气象水文条件等因素密切相关,对大气波导的探测需要直接或间接获取大气折射率剖面,进而根据大气波导的垂直梯度特征进行判别,因此,海面气象水文要素的测量是获得大气波导信息的重要途径,如图1所示。



图1 蒸发波导与超视距传播

Fig. 1 Evaporation waveguide and over-the-horizon propagation

大气折射率的高度剖面可以利用单个仪器在高度上的上下移动进行采样获得,如采用垂直升降装置或系留气球和飞艇平台,或者采用分布式传感器同时获得不同高度上的采样值。微波折射率仪可以直接测量大气折射率,进一步根据大气折射率梯度确定大气波导的高度和强度,响应快、精度高。高精度气象仪器可以通过同时测量大气的温度、湿度、气压参数,再利用公式换算为大气折射率,湿度传感器响应慢,属于间接方法。因蒸发波导高度低,可利用微波折射率仪、气象梯度仪、低空大气探测系统等测量设备进行探测;表面波导和悬空波导则可采用微波折射率仪、低空大气探测系统和高空大气探测系统进行探测。近年来,许多新理论、新技术应用到大气波导的探测技术中,如利用GPS信号探测反演低层大气结构和利用雷达海面回波反演大气波导剖面

等。大气波导的直接探测和遥感探测技术各有优缺点,直接测量的优点是测量精度较高,但是只能实现单点探测,而且耗费人力物力。遥感测量的优点是可实现快速、区域反演探测,方便应用,缺点是精度较差,但遥感探测大气波导是一个新兴的方向。随着遥感反演技术的发展,遥感测量反演精度的逐步提高,遥感探测技术在大气波导探测领域将占据越来越重要的地位。

2.2 大气波导预测预报

大气波导是对流层大气边界层大气中出现的一种超折射自然现象,大气波导的形成与气象条件密切相关,具有明显的尺度和区域地理特征,与伴随的天气现象和天气过程相联系,例如蒸发波导具有明显的日变化和季节变化。大量的研究表明,大气波导形成的物理机制主要有蒸发过程和逆温过程。大气波导形成的5种主要天气学过程类型为:海表面海水的蒸发、反气旋性下沉运动、锋面下沉运动、陆地的夜间辐射冷却、平流运动(如海陆风过程)。

国际上在利用数值天气模式和天基遥感信息预测预报大气温湿结构、海(陆)面温度、近海(陆)面气温、风速等方面开展了大量理论和实验研究。2003年前后,美国沙漠研究所大气科学部开展了利用MM5模式与卫星遥感资料预测美国沿海地区大气边界层折射率剖面的研究。2003年宾夕法尼亚州立大学利用MM5模式预报晚上稳定边界层下的大气波导。2006年美国海军研究生院(NPS)开发了SEMEO系统,该系统利用卫星遥感估算云顶高度,进而预报区域悬空波导位置和强度等特征。加拿大也开展了VHF/UHF大气波导态势预报,并在互联网上发布。此外,国际上通过不断改进的数值预报模式作为支撑,结合卫星、飞机、船只、浮标等测量和遥感数据,发展了多种大气波导预报预测模式。随着中尺度数值天气预报技术的不断进步,对海-气耦合过程认识的不断深化以及计算能力的提高,利用中尺度海气耦合模式预报大气折射指数三维空间结构,预报海洋大气环境对电波的影响已经成为现实。美国海军业务化区域大气预报系统(NORAPS)早已用于预报大气折射指数。在海岸大气折射指数变化试验中,Burk和Thompson对NORAPS预报大气折射指数的能力作了论证,发现对于一般折射条件,中尺度模式

能够做出较好的预报,但在波导预报方面,中尺度模式还不理想。要想利用中尺度模式预报大气环境对电波传播的影响,有3个基本问题需要解决。

1) 如何使模式初始化。中尺度模式通常是使用全球预报模式场和观测条件融合在一起初始化模式,而海洋上大气边界层在粗网格的全球模式中通常不能很好地得到描述,且在海洋上气象观测数据极其缺乏,对于确定大气折射状况的温度场和湿度场通常不能在中尺度模式初始化时得到恰当的描述。

2) 中尺度模式的物理机制有待改进。对于预报大气折射条件来说,中尺度模式内海洋大气边界参数化方案能否准确地描述真实海洋大气边界层结构是十分重要的。

3) 对于湍流结构,应该考虑次网格尺度的影响。

尽管利用中尺度数值模式预报大气环境折射条件还有许多问题有待解决,但是利用中尺度模式预报大气折射条件无疑是定量获取三维空间大气环境折射指数、预报海洋大气环境对电磁波传播影响的最有希望手段之一。

2.3 雷达超视距探测

利用大气波导形成雷达超视距传播需满足以下几个基本条件。

- 1) 电磁波发射源必须位于波导层内或发射波和目标反(散)射波可以耦合入大气波导;
- 2) 电磁波的波长必须小于最大陷获波长(频率高于最低截止频率);
- 3) 电磁波的发射仰角必须小于临界仰角。

在电波传播预测模型和算法的基础上,使用大气波导诊断结果,可以评估传播损耗。对传播损耗的预测主要有2种:基于测试数据的经验性统计预测和基于抛物波方程的数值方法。结合电子装备系统参数,根据雷达检测目标(检测概率、虚警概率)的要求可得到最小可检测信号功率。受地海面 and 大气折射、散射的影响,评估大气波导情况下的雷达最大作用距离,需要根据雷达最小可检测信号功率得到可允许的最大路径损耗,然后利用传播损耗的空间分布,得到随高度变化的雷达最大作用距离覆盖图。

例如一部C波段脉冲雷达,发射功率为300 kW,

天线增益为30 dB,高度为10 m,脉冲宽度为1.5 μ s,系统损耗为3 dB,接收机噪声系数为5 dB,目标雷达散射截面为100 m²,虚警概率为10⁻⁸,则标准大气和表面波导情况下,雷达单脉冲检测对高度-距离空间的覆盖区域如图2所示。

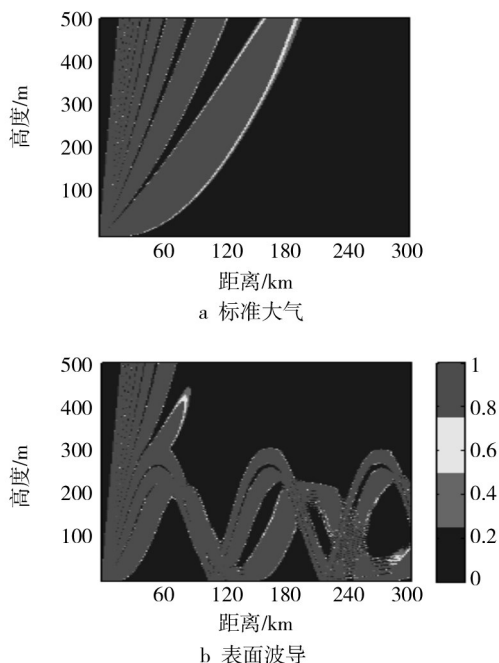


图2 雷达探测概率及盲区分布

Fig. 2 Radar detection probability and blind zone

由图2可见,由于地海面反射造成的多径干涉,因此在标准大气情况下,即使在视距区域,雷达也可能存在“顶部盲区”。在表面波导情况下,相同条件的雷达可能探测到超视距目标,也可能存在不同形态的“顶部盲区”,同时增加了“跳跃盲区”。显然,不同大气波导情况下,超视距范围及探测盲区也有所不同。

3 结语

海上微波超视距环境与传播对海上微波超视距目标探测具有重要的应用价值。微波超视距雷达电波环境特别是大气波导的探测、预测预报和超视距传播特性研究是一个涉及多学科的问题,包括微波雷达技术、电磁波理论和海洋-大气科学等领域。一方面为满足探测实时性、定位准确性以及对各类打击和突防目标探测能力的提高,必须在实时获得大气电波环境的同时,快速准确地预测、评估雷达的覆

盖范围及探测目标的准确位置;另一方面,大气电波环境的准确实时测报,需要利用大气科学的研究方法不断发展新型实用的传感器技术和预报方法。为了使雷达实时自适应大气波导环境,需要提供合适的雷达频率、天线高度、天线仰角等参数,因此,发展大气波导监测和传播辅助分析决策系统是提高微波超视距雷达远距离探测性能的关键。

参考文献:

- [1] ATKINSON B W, ZHU M. Coastal Effects on Radar Propagation in Atmospheric Ducting Conditions[J]. Meteorol Appl, 2006, 13: 53—62.
- [2] GEERNAERT G L. On the Evaporation Duct for Inhomogeneous Conditions in Coastal Regions[J]. App Meter Clim, 2007, 26: 538—543.
- [3] TED ROGERS L, CLAUDE P H. Estimating Evaporation Duct Heights from Radar Sea Echo[J]. Radio Science, 2000, 35(4): 955—966.
- [4] IVANOV V K, SHALYAPIN V N. Determination of the Evaporation Duct Height from Standard Meteorological Data [J]. Atmospheric and Oceanic Physics, 2007, 43(1): 36—44.
- [5] 姚展予, 赵柏林, 李万彪, 等. 大气波导特征分析及其对电磁波传播的影响[J]. 气象学报, 2000, 58(5): 60—615.
- [6] 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.
- [7] 蔺发军, 刘成国, 潘中伟. 近海面大气波导探测及与其它研究结果的比较[J]. 电波科学学报, 2002, 17(3): 26—27.
- [8] 焦林, 张永刚. 大气波导条件下雷达电磁盲区的研究[J]. 西安电子科技大学学报, 2004, 31(5): 815—820.
- [9] 任香凝, 李文计. 海面蒸发波导微波超视距通信可行性分析[J]. 无线电通信技术, 2008, 34(2): 22—24.
- [10] 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): 57—62.
- [11] 孙方, 赵振维, 康士峰, 等. 大气波导传播模型及特性分析[J]. 装备环境工程, 2009, 6(6): 16—20.
- [12] 赵小龙, 黄际英, 王玉平, 等. 大气波导中折射指数的预测预报技术研究[J]. 装备环境工程, 2011, 8(3): 58—61.

(上接第84页)

好。浸泡试验结果表明, 试验时间较短时, 储罐钢08MnNiVR耐蚀性略差; 试验时间较长时, SPV490Q耐蚀性略差。从应力腐蚀试验结果看, 储罐钢08MnNiVR和SPV490Q在石油沉积水中均具有高SCC抗力, 应力腐蚀敏感性较低。综合3种试验结果, 储罐钢08MnNiVR和SPV490Q在石油沉积水中耐蚀性接近, 都具有良好的耐蚀性。

参考文献:

- [1] 张磊. 原油储罐的腐蚀与防护[J]. 腐蚀与防护, 2001, 22(2): 72—73, 77.
- [2] 王鹏, 张玉刚. 钢制原油储罐的腐蚀与综合防护[J]. 云南化工, 2007, 34(1): 27—28, 36.
- [3] 刘伟明, 张含谦, 屈朝霞, 等. 大型原油储罐用钢腐蚀性能的研究进展[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2008, 20(6): 448—453.
- [4] 许振涛, 王观军. 常压储罐腐蚀原因及其防护[J]. 石油化工安全技术, 2003, 19(3): 40—42.
- [5] 唐建宇. 储油罐内腐蚀现状及防护措施[J]. 表面技术, 1989(2): 4—8.
- [6] 叶栋文, 王岳, 郭光利, 等. 原油储罐的腐蚀机理及对策[J]. 石油化工设备技术, 2010, 31(6): 62—67.
- [7] 李佳润, 袁起立, 汪海波. 原油储罐内壁的腐蚀与防护[J]. 装备环境工程, 2008, 5(3): 63—66.
- [8] 孟立新, 张晞. 大型原油储罐热喷涂防腐技术的应用[J]. 装备环境工程, 2006, 3(4): 85—87, 90.
- [9] 米广生, 陈德志, 瞿帆. 国产高强度钢板B610E在15万m³油罐中的焊接[J]. 石油化工建设, 2007, 29(5): 25—28.
- [10] 马朝晖, 王国栋, 张汉谦, 等. 08MnNiVR(B610E)高强度调质钢板的焊接性能[J]. 宝钢技术, 2008(6): 34—38.
- [11] 福鸿, 丛津功, 胡听明. 石油储罐用08MnNiVR钢板组织和性能研究[J]. 鞍钢技术, 2009(5): 32—35.
- [12] 孙决定, 王兴连. 大型石油储罐用钢的国内市场与生产[J]. 武钢技术, 2011, 49(5): 55—59.
- [13] 梁崔凯, 任海云. 08MnNiVR钢焊接技术在大型原油储罐制造中的应用[J]. 焊接技术, 2010, 39(8): 29—31.
- [14] 马朝晖, 王国栋. 08MnNiVR原油储罐用钢的腐蚀性能研究[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2009, 21(3): 252—254.
- [15] 贾思洋, 李超, 韩东锐. B610E不同焊接接头在石油沉积水中的耐蚀性研究[J]. 装备环境工程, 2012, 9(6): 25—28.
- [16] R 温斯顿 里维. 尤利格腐蚀手册[M]. 杨武, 译. 北京: 化学工业出版社, 2005: 834—835.