

海上对流层微波超视距传播与海洋大气环境特性相关性研究

李磊^① 吴振森*^① 林乐科^② 赵振维^② 张守宝^② 郭相明^②

^①(西安电子科技大学物理与光电工程学院 西安 710071)

^②(电波环境特性及模化技术重点实验室 青岛 266107)

摘要: 海上对流层微波超视距传播与海洋大气环境特性的相关性研究对电波传播的短期预测以及无线电通信系统的设计和应用有着十分重要的意义。该文根据在我国黄渤海海域进行的 14.1 GHz 海上对流层微波超视距传播试验的传输损耗数据以及在发射端塔基平台上同步进行的气象梯度仪试验的气象数据,分别分析了风向、风速以及气海温差对传输损耗和蒸发波导高度相关性的影响,研究了沿海海域气象数据在微波超视距传播链路中的可用性,并结合散射抛物方程方法和高级折射效应预报系统(AREPS)对分析结果进行了验证。该文的研究结果对海上对流层微波超视距传播的传播特性以及短期预测的研究有一定的指导意义。

关键词: 微波; 超视距; 蒸发波导; 传输损耗; 对流层散射; 海洋大气环境

中图分类号: TN011

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2016)01-0209-07

DOI: 10.11999/JEIT150210

Study on the Relativities of the Tropospheric Microwave Trans-horizon Propagation above Ocean Surface and the Marine Atmospheric Environment Characteristics

LI Lei^① WU Zhensen^① LIN Leke^② ZHAO Zhenwei^② ZHANG Shoubao^② GUO Xiangming^②

^①(School of Physics and Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)

^②(National Key Laboratory of Electromagnetic Environment, China Research Institute of Radiowave Propagation, Qingdao 266107, China)

Abstract: Study on the relativities of the tropospheric microwave trans-horizon propagation above ocean surface and the marine atmospheric environment characteristics has important significance for the short-term prediction of the trans-horizon propagation and for the designs and the applications of the radio-communication systems. In this paper, based on the transmission loss data collected in the oversea experiment at 14.1 GHz on the area of Yellow Sea and Bohai Sea of China and the synchronous meteorological data collected from the meteorology grads tower which founded in the transmitter station, the relativities of the transmission loss and the evaporation duct height are analyzed with wind direction, wind speed and the difference of air temperature and sea temperature, respectively. The usability of the coastal meteorological data for the tropospheric microwave trans-horizon propagation is studied, and the results are validated with the parabolic equation method and the Advance Refractive Effects Prediction System (AREPS). The conclusions are helpful for the study of the propagation characteristic and the short-term prediction of the tropospheric microwave trans-horizon propagation above ocean surface.

Key words: Microwave; Trans-horizon; Evaporation duct; Transmission loss; Troposcatter; Marine atmospheric environment

1 引言

电磁波通过各种不同媒质进行传输的过程称为无线电波传播^[1]。无线电波在各种媒质中传播时,总

会发生反射、折射、散射、吸收和色散等现象。其中,对流层大气对电磁波传播的影响主要体现在气体分子、气溶胶粒子的吸收和散射以及大气的折射效应^[2]。对海上对流层超视距传播而言,由于传播距离较远,并且海洋上空大气环境变化剧烈,呈现出较强的区域性和非均匀性变化,电磁波既可以利用大气波导现象进行传输损耗较小的波导或超折射传播,也可以利用对流层散射现象进行传输损耗较大的对流层散射传播^[3]。因此,正确感知传播路径上大

收稿日期: 2015-02-05; 改回日期: 2015-07-28; 网络出版: 2015-10-13

*通信作者: 吴振森 wuzhs@mail.xidian.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(61471329, 61401410, 41175012)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61471329, 61401410, 41175012)

气环境特性对于电磁波传输损耗的正确预测以及通信系统性能的评估和设计都具有十分重要的意义。

随着人类对海洋的不断开发和利用,海洋大气环境特性越来越受到人们的重视。1944年,美国海军电磁、声学实验室在开展海上无线电气象学测量实验时就发现了对流层波导陷获层结构的存在^[4]。1955年,Booker等人^[5]提出了湍流非相干散射理论,解释了1945年加利福尼亚海超视距无线电传播实验中出现的传输损耗随传播距离缓慢减小的现象。1973年,文献^[6]提出了利用抛物方程解决实际的复杂折射率环境中的电波传播问题的方法。随后此方法被不断发展并广泛应用于电波在对流层大气波导中超视距传播的研究中。1992年,Barrios^[7]提出了海洋大气修正折射率的不均匀分布特性,并将其代入抛物方程模拟了瓜达卢佩岛和圣地亚哥海上超视距传播试验的传输损耗,模拟结果与实测值符合得较好。1993年,Hitney^[8]将折射指数结构常数引入抛物方程,提出了对流层散射抛物方程方法,解决了以往抛物方程方法无法表征对流层散射传播现象的问题。1994年,美国宾夕法尼亚州立大学(PSU)和国家气象研究中心(NCAR)合作开发了第5代区域性中尺度预报模型MM5^[9-11],实现了区域性波导的发生和强弱信息的初步预测。近年来发展迅速的天气预报模式(WRF)^[12-14]更加完善了对大气环境特性空间分布的预测。1998年,美国圣地亚哥空军和海军武器系统指挥中心开发了著名的大气波导预测评估软件——高级折射效应预报系统(AREPS),此软件已装备美军系统并且仍在不断地完善和发布新版本^[15]。在国内,许多相关单位和专家学者也正致力于对海洋大气环境区域性和非均匀性以及海上超视距传播的研究。王红光等人^[16]根据天气雷达方程和大气波导传播模型建立了模拟天气雷达地物回波的方法,得到了地物回波的有效反射因子。李建儒等人^[17]利用海洋气象观测数据,基于蒸发波导高度统计分析结果和大气波导传播模型,提出了一种可预测蒸发波导传播损耗统计特性的方法。成印河等人^[18]以海上大气波导类型为线索总结了国内外与大气波导相关的研究方法。张青洪等人^[19]则在抛物方程非均匀网格技术的基础上,提出了抛物方程方法的亚网格模型,以快速准确地求解大尺度复杂电磁环境中存在关键目标的电波传播问题。2014年,肖金光等人^[20]也提出了一种基于弯折谱估计进行抛物方程模型模拟海面电波传播的计算方法,解决了传播路径上特定距离处入射余角无法计算的问题。同年,康士峰等人^[21]针对大气波导的超折射和多径传播效应影响低空目标探测的问题,提出了一种基

于目标函数的微波超视距雷达天线高度优化方法。2015年,张利军等人^[22]针对对流层超视距无源探测可能出现的收发天线无法对准的情形,给出了对流层散射传播偏移损耗的计算方法。

虽然人们对海洋大气环境特性的探测和预报研究都取得了很大的进步,但是海洋大气环境变化复杂,呈现较强的区域性和非均匀性,尤其在陆海交界处,这种不均匀性会使MM5和WRF等预报模型出现较大的预报误差。并且,这些预报模型耗时周期较长,与通信系统的实时结合使用还有待提高。Barrios提出的大气修正折射率不均匀分布模型至少需要发、收两个站点的近海面气象剖面数据。而在实际的海上超视距通信或探测中,通常只有发射或接收一端的气象数据,因此,如何正确有效地利用单站气象数据与通信系统相结合对传输损耗进行预测成为亟待解决的问题。

本文根据在我国黄渤海区域进行的14.1 GHz的海上微波超视距传播试验以及发射端的塔基气象梯度仪数据,结合散射抛物方程方法和AREPS软件中的高级传播模型(APM)研究了传输损耗与蒸发波导高度、风向、风速以及气海温差的关系,分析了单站塔基气象数据在微波超视距链路传播中的可用性。最后,根据分析结果,利用散射抛物方程和实测蒸发波导高度模拟了本次试验其中一天的传输损耗,并与实测值进行了对比。结果表明,正确合理地使用单站岸基气象数据就可以有效地反映出微波超视距传输损耗的变化趋势。

2 试验条件及蒸发波导模拟

本次微波超视距传播试验发射端位于觉华岛,接收端位于长兴岛,传播路径为海洋路径,距离为107 km,发、收天线高度分别为21 m和12 m,发射功率为43.67 dBm,频率为14.1 GHz,发、收端天线增益均为35.9 dBm,采样频率为100 Hz。同时在发射端的海上观测平台上进行了气象梯度仪试验,在距离塔基平台6, 10, 15, 20, 27和34 m处架设了温湿度传感器,在6, 15和27 m处架设了风速传感器,在10 m处同时安装了气压和红外海温传感器。数据由数据采集器采集,采样频率为1/60 Hz。本次试验开始时间为2013年9月14日,结束时间为2013年10月10日,其地理位置和发射端的岸基海上观测平台如图1和图2所示。

在海洋大气环境中,海面的水汽蒸发使得在海面上很小高度范围内的大气湿度随高度锐减从而形成蒸发波导。蒸发波导几乎永远存在,因此历来成为大气波导研究的重点和热点。目前存在的几种主

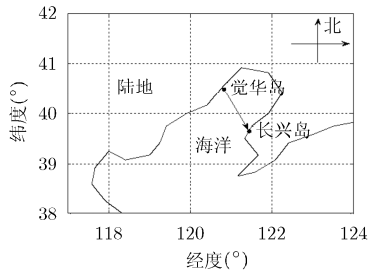


图 1 试验链路地理位置示意图



图 2 岸基海上观测平台示意图

要的蒸发波导高度模型有：Paulus-Jeske (PJ)模型、MGB 模型、BYC 模型、NPS 模型和伪折射率模型^[23-27]。郭相明等人^[28]利用本次试验的实测蒸发波导高度数据对比了上述几种模型，结果表明 PJ 模型的预测精度最高。宋伟等人^[29]也根据海上试验采集的波导数据，对比分析了蒸发波导 PJ 模型和 NPS 模型在我国海域的适应性，结果同时表明在多数情况下 PJ 模型的适应性优于 NPS 模型。在中性层结下，PJ 模型可表示为

$$M(z) = M_0 + 0.125z - 0.125\delta \ln\left[\frac{z + z_0}{z_0}\right] \quad (1)$$

式中， M 为采用平地球模式时的修正折射率，单位为 M 单位(M-units)，其与通常使用的大气折射率 N 的关系为： $M = N + 157z$ ， N 的单位为 N 单位(N-units)， M_0 为海平面修正折射率， z 海面以上垂直高度， δ 为蒸发波导高度， z_0 为空气动力学粗糙度因子，通常取 1.5×10^{-4} m。经计算，本次试验的平均海平面修正折射率为 369 M-units。将式(1)代入散射抛物方程和 AREPS 软件分别计算了不同蒸发波导高度修正折射率剖面的传输损耗，计算结果与实测值对比如图 3 所示。

夏末秋初，天气气候变化剧烈，尤其在陆海交界处，空气中水平对流现象经常出现，近海上空极易形成逆温层或反射层结。从图 3 可以看出，本次试验的实测数据基本都在自由空间传输损耗和年平均对流层散射传输损耗中值之间，这说明波导、层反射和对流层散射 3 种传播方式都在本次试验中占据了一定比例，并且，受夏末季节的影响，大气湿度的下高上低程度比冬季强烈，造成对流层散射传播时的传输损耗要略小于年平均对流层散射传输损耗中值。另外，从图 3 还可以看出，模拟的传输损耗随着蒸发波导高度的增加而减小，但实测的传输损耗和蒸发波导高度之间并没有这种明显的变化趋势。这可能是由于以下两种原因造成的：(1)由于海风或者人为天线架设的原因造成整个试验期间收发天线不是总在最佳指向，有一部分的传输损耗中会包含天线偏向损耗；(2)实测的蒸发波导高度并不

能完全代表整个传播路径的蒸发波导高度，使得实测蒸发波导高度和传输损耗无明显的对应关系。因此，为了验证上述假设，分别从风向、风速和气海温差等方面分析了传输损耗和蒸发波导高度之间的关系。

3 风向、风速的影响

由于本次试验的气象设备架设在岸基平台上，加之试验时间正处于夏末季节，来自陆地的干暖气流会经常吹向海洋，造成陆海交界处海面逆温显著，湿度随高度下降剧烈，蒸发波导高度和强度均明显增加，大气环境的区域性和非均匀性明显，实测的蒸发波导高度会出现“虚高”，呈现蒸发波导高度很高但是传输损耗却很大的现象。要尽可能地“滤除”这种现象，可以仅选取风从海洋吹向陆地时的数据，因此，根据图 1 和实际地形情况，仅选取风向方位为 $180^\circ \sim 250^\circ$ 之间时的实测蒸发波导高度数据和相应的传输损耗，结果如图 4 所示。

从图 4 可以看出，“滤除”掉陆地风影响的实测数据后，蒸发波导高度在 $10 \sim 20$ m 之间传输损耗较大的数据明显减少，但是实测的蒸发波导高度和传输损耗之间仍没有较好的对应关系。

文献[30]中指出，大气波导的特征量对水平风速的变化也有一定的敏感性。对蒸发波导而言，主要表现为海面粗糙度对电波传播特性的影响。粗糙海面的漫反射可引起海面镜反射能量的衰减，引起电波在传播过程中传输损耗的增大，这种影响可通过在抛物方程方法中引入粗糙度衰减因子来实现^[31]。由海上观测平台架设的风速传感器收集的数据可得本次试验期间的最大风速为 15.87 m/s，最小风速为 0.25 m/s，平均风速为 6.17 m/s。因此，本文利用文献[34]提出的海面粗糙度衰减因子分别计算了风速为 0 m/s, 6 m/s, 10 m/s 和 15 m/s 时不同蒸发波导高度下的传输损耗，如图 5 所示。

从图 5 可以看出，粗糙海面的漫反射引起了电波传播能量的衰减，使得传输损耗增大。当电波传播方式为波导或者超折射传播(蒸发波导高度较高)

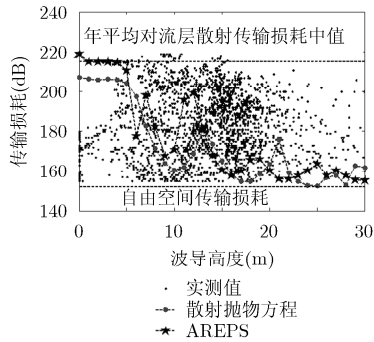


图3 不同蒸发波导高度下的
实测损耗与模拟值比较

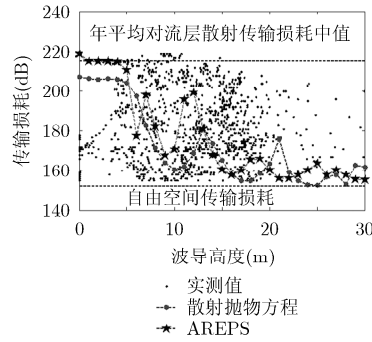


图4 风向为 $180^{\circ} \sim 250^{\circ}$ 时
实测损耗与模拟值比较

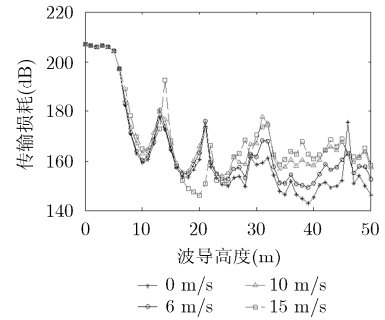


图5 不同风速和蒸发波导
情况下的传输损耗

时, 传输损耗随着风速的增大而增大, 且蒸发波导高度越高, 这种现象越明显; 当传播方式为对流层散射传播(蒸发波导高度较低)时, 风速的增大对传播损耗的影响很小。但从图中也可以看出, 风速的增大只是减缓了传输损耗随蒸发波导高度增高而减小的趋势, 因此, 风速的变化并不能很好地解释图1中实测蒸发波导高度和传输损耗不对应现象。

4 气海温差的影响

气海温差定义为海洋上空大气温度和海水表面温度的差值。当大气温度大于海水温度时的大气状态称为稳定大气, 通常发生在沿海海域, 尤其是夏季, 来自陆地的干暖气流会造成沿海海域上空大气温度的升高; 而在远洋海域, 海洋上空的大气受陆地风的影响很小, 大气温度通常会小于海水温度, 这时的大气状态称为不稳定大气^[25]。Paulus^[23]指出, PJ模型是一种适用于远洋海域的模型, 即其适用于不稳定大气情况, 郭相明等人^[28]也利用本次试验的实测蒸发波导高度数据比较了PJ模型在稳定和稳定大气状态下的平均误差和均方根误差, 结果表明, PJ模型在模拟不稳定大气的蒸发波导高度时误差最小。并且由图1可知, 本次试验的传播路径基本是远洋路径, 对电波传播起主要作用的大气状态为不稳定大气, 实测的气海温差大于零的时期不能完全代表整个传播路径的海洋大气环境特性, 而当塔基平台处的风为海风且气海温差小于零时, 可以认为此时塔基平台处的气象环境和远海海域的气象环境一致, 此时远海海域的气海温差可近似用塔基平台处的气海温差代替。因此, 在考虑了风向的前提下, 将实测气海温差大于零时期的传输损耗也“滤除”掉, 结果如图6。

从图6可以看出, 在只考虑海风和稳定大气情况下, 实测的蒸发波导高度和传输损耗之间有着很好的相关性, 并且与散射抛物方程和AREPS软件的模拟结果趋势基本一致, 随着蒸发波导高度的

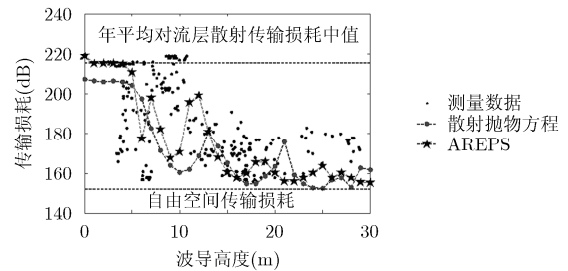


图6 风向为 $180^{\circ} \sim 250^{\circ}$, 气海温差小于
零时的实测损耗与模拟值比较

升高, 传输损耗逐渐减小。另外, 从图中也可以看出, 受海上复杂大气环境以及岸基的影响, 在相同蒸发波导高度下, 实测的传输损耗在大部分期间要大于模拟值, 经计算, 整个试验期间的实测传输损耗均值为185 dB, 而根据实测的蒸发波导高度利用散射抛物方程模拟的传输损耗均值为176 dB, 利用AREPS软件模拟的传输损耗均值为179 dB。为了进一步证明上述观点, 根据实测的蒸发波导高度, 利用散射抛物方程模拟了本次试验期间9月16日00:00~23:00的传输损耗, 如图7(a)所示, 相应的蒸发波导高度, 风向和气海温差时间序列分别如图7(b), 7(c)和图7(d)。

从图7(a), 7(b), 7(c)和图7(d)可以看出, 在0点至4点时, 虽然气海温差小于零, 为不稳定大气状态, 但风向约为 $255^{\circ} \sim 270^{\circ}$, 为陆地风, 因此, 受陆地风的影响, 实测的蒸发波导高度较高, 模拟结果出现较大误差; 约在17:00以后, 气海温差大于零, 表明此时沿海的大气处于稳定状态, 从图7(b)可以明显看出此时的实测蒸发波导高度有个明显上升的“凸”点, 从而导致模拟结果与实测值出现相反的变化趋势; 在4:00~10:00以及13:00~17:00这两段时间内, 风向为海洋风且大气处于不稳定状态, 模拟结果的变化趋势同实测结果基本一致, 但是受天气或者地形原因的影响, 实测结果整体要大于模拟结果。而在10:00~13:00之间, 虽然风向为海洋性且大

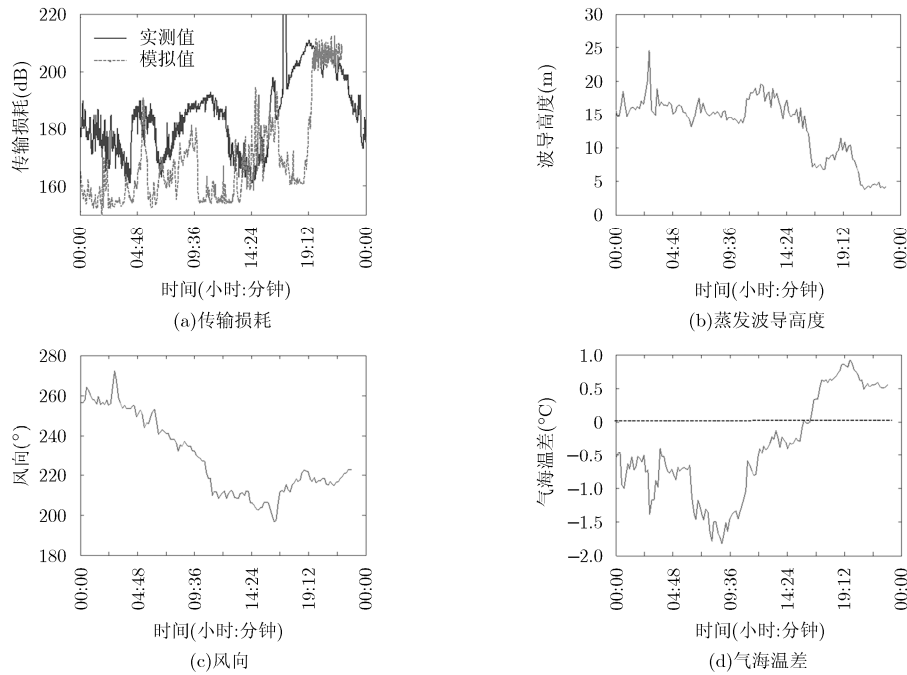


图7 9月16日实测与模拟时间序列示意图

气处于不稳定状态,但模拟与实测结果间还是出现了较大差别。由图7(b)可以看出,这个时段的蒸发波导高度出现了明显的升高,从而导致模拟结果变小,而这种波导高度突然升高的现象很可能是由于局部海面的温湿压骤变所引起的。

5 结束语

传播路径上的大气环境特性对于岸基或舰载雷达的微波超视距通信及探测而言起着至关重要的作用。一般情况下,我们往往只能得到发射端的气象数据,目前的大气环境预报模型又往往难以准确地模拟出传播路径上的大气环境特性,因此,如何对收集到的气象数据进行合理有效的利用并且对对流层超视距传播进行准确的短期预测成为亟待解决的重要问题。该文首先根据2013年9月14日至2013年10月10日期间在我国黄渤海海域进行的14.1 GHz 对流层微波超视距传播试验的传播条件和设备参数,利用散射抛物方程方法和 AREPS 软件计算了不同蒸发波导高度下的传输损耗,随后分别分析了实测的传输损耗和蒸发波导高度对风向、风速和气海温差的依赖关系。分析结果表明:对沿海气象数据而言,只有当出现海洋风且大气处于不稳定状态时,实测的传输损耗和蒸发波导高度才能形成良好的对应关系,其趋势和散射抛物方程以及 AREPS 软件的模拟结果一致。最后利用散射抛物方程方法和2013年9月16日实测的蒸发波导高度数据模拟了当天的传输损耗并与实测的传输损耗、风向和气

海温差进行了比较,比较结果进一步验证了上述结果的正确性。

该文的研究结果对于海上超视距传播与大气环境特性相关性的研究以及微波超视距传播的短期预测有一定的指导意义。但是陆地风以及沿海海域的稳定大气状态会时常发生并且会对电波的传播和预测产生十分重要的影响,本文对于这种情况下的电波传播特性的研究还尚未展开,在今后的工作中应当对此进行更加深入的研究。

参考文献

- [1] 刘选谋. 无线电波传播[M]. 北京: 高等教育出版社, 1987: 1-2.
LIU Xuanmou. Radio Wave Propagation[M]. Beijing: Higher Education Press, 1987: 1-2.
- [2] HITNEY H V, RICHTER J H, PAPPERT R A, et al. Tropospheric radio propagation assessment[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1985, 73(2): 265-283.
- [3] 康士峰, 张玉生, 王红光. 微波超视距雷达大气波导环境[J]. 装备环境工程, 2013, 10(5): 85-89.
KANG Shifeng, ZHANG Yusheng, and WANG Hongguang. Atmospheric wave-guide environment for microwave over-the-horizon radar[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2013, 10(5): 85-89.
- [4] PAULUS R A. VOCAR: an experiment in variability of coastal atmospheric refractivity[C]. International Geoscience and Remote Sensing Symposium, IEEE, Pasadena, 1994: 386-388.

- [5] BOOKER H G and GORDON W E. A theory of radio scattering in the troposphere[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1950, 38(4): 401-412.
- [6] HARDIN R H and TAPPERT F D. Application of the split-step Fourier method to the numerical solution of nonlinear and variable coefficient wave equations[J]. *SIAM Review*, 1973, 15(1): 423-428.
- [7] BARRIONS A E. Parabolic equation modeling in horizontally inhomogeneous environments[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1992, 40(7): 791-797.
- [8] HITNEY H V. A practical tropospheric scatter model using the parabolic equation[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1993, 41(7): 905-909.
- [9] GRELL G A, DUHIA J, and STAUFFER D R. PSU/NCAR mesoscale modeling system tutorial class note and user's guide: MM5 Modeling system version 3[R]. National Center for Atmospheric Research, Boulder, Colorado, 2001.
- [10] YANG S, YANG Kunde, YANG Yixin, *et al.* Spatio-temporal distribution of evaporation duct for the South China Sea[C]. *IEEE Oceans 2014, Taipei*, 2014: 1-6.
- [11] MIADEN V, MAJA T P, and BRANKO G. A multi-year study of the anomalous propagation conditions along the coast of the Adriatic sea[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2013, 97(5): 75-84.
- [12] 王晓君, 马浩. 新一代中尺度预报模式(WRF)国内应用进展[J]. *地球科学进展*, 2011, 26(11): 1191-1199.
YANG Xiaojun and MA Hao. Progress of application of the weather research and forecast (WRF) model in China[J]. *Advances in Earth Science*, 2011, 26(11): 1191-1199.
- [13] ZHANG Xin and HUANG Xiangyu. Development of the upgraded tangent linear and adjoint of the weather research and forecasting (WRF) model[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2013, 30(6): 1180-1188.
- [14] ZHANG Yan, SARTELET K, ZHU S, *et al.* Application of WRF/ Chem-MADRID and WRF/polyphemus in Europe - part 2: Evaluation of chemical concentrations, sensitivity simulations, and aerosol-meteorology interactions[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, 13(2): 6845-6875.
- [15] BOOKNER E, CORNELLY P R, and LOK Y F. AREPS and TEMPER — getting familiar with these powerful propagation software tools[C]. *IEEE Radar Conference in 2007, Piscataway, NJ, USA*, 2007: 1034-1043.
- [16] 王红光, 章晗, 吴振森. 多普勒天气雷达反常地物回波模拟研究[J]. *电子与信息学报*, 2013, 35(12): 2863-2867. doi: 10.3724/SP.J.1146.2012.01541.
WANG Hongguang, ZHANG Han, and WU Zhensen. Study on simulating anomalous ground echoes for Doppler weather radar[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2013, 35(12): 2863-2867. doi: 10.3724/SP.J.1146.2012.01541.
- [17] 李建儒, 王红光, 赵振维. 一种基于海洋气象数据的蒸发波导传播统计方法[J]. *电波科学学报*, 2013, 28(5): 891-896.
LI Jianru, WANG Hongguang, and ZHAO Zhenwei. Statistical method of evaporation duct propagation based on marine meteorological data[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2013, 28(5): 891-896.
- [18] 成印河, 周生启, 王东晓. 海上大气波导研究进展[J]. *地球科学进展*, 2013, 28(3): 318-326.
CHENG Yinhe, ZHOU Shengqi, and WANG Dongxiao. Review of the study of atmospheric ducts over the sea[J]. *Advances in Earth Science*, 2013, 28(3): 318-326.
- [19] 张青洪, 廖成, 盛楠, 等. 抛物方程方法的亚网格模型及其应用研究[J]. *电子与信息学报*, 2014, 36(8): 2005-2009. doi: 10.3724/SP.J.1146.2013.01428.
ZHANG Qinghong, LIAO Cheng, SHENG Nan, *et al.* Study on subgridding model of the parabolic equation and its application[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2014, 36(8): 2005-2009. doi: 10.3724/SP.J.1146.2013.01428.
- [20] 肖金光, 周新力, 刘晓娣. 弯折谱估计在抛物方程模型电波传播中的应用研究[J]. *电波科学学报*, 2014, 29(3): 559-566.
XIAO Jinguang, ZHOU Xinli, and LIU Xiaodi. Application of curved wave spectral estimation in wave propagation with parabolic equation model[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2014, 29(3): 559-566.
- [21] 康士峰, 曹仲晴, 王红光, 等. 基于目标函数的微波超视距雷达天线高度优化方法[J]. *电子与信息学报*, 2014, 36(7): 1767-1770. doi: 10.3724/SP.J.1146.2013.01039.
KANG Shifeng, CAO Zhongqing, WANG Hongguang, *et al.* Antenna height optimization based on object function for microwave over-the-horizon radar[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2014, 36(7): 1767-1770. doi: 10.3724/SP.J.1146.2013.01039.
- [22] 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. doi: 10.11999/JEIT141233.
ZHANG Lijun, ZHANG Rui, and ZHAO Zhenwei. Analysis of rotational loss in troposcatter propagation[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2015, 37(6): 1502-1506. doi: 10.11999/JEIT141233.
- [23] PAULUS R A. Practical application of an evaporation duct model[J]. *Radio Science*, 1985, 20(4): 887-896.
- [24] MUSSON-GENON L, GAUTHIER S, and BRUTH E. A simple method to determine evaporation duct height in the surface boundary layer[J]. *Radio Science*, 1997, 27(9): 193-204.
- [25] BABIN S M, YOUNG G S, and CARTON J A. A new model of the oceanic evaporation duct[J]. *Journal of the Applied Meteorology*, 1997, 36(3): 193-204.

- [26] FREDERICKSON P, DAVIDSON K, and GORLCH A. Operational bulk evaporation duct model for MORIAH[R]. Tech. Rep. NPS/ MR-2000-002, Version 1.2, Nav. Postgard. Sch., Monterey, Calif., 2000.
- [27] 刘成国. 蒸发波导环境特性和传播特性及其应用研究[D]. [博士论文], 西安电子科技大学, 2003.
LIU Chengguo. Research on evaporation duct propagation and it's application[D]. [Ph.D. dissertation], Xidian University, 2003.
- [28] 郭相明, 康士峰, 张玉生, 等. 蒸发波导模型特征及其适用性研究[J]. 海洋预报, 2013, 30(5): 75-83.
GUO Xiangming, KANG Shifeng, ZHANG Yusheng, *et al.* Study on the characteristics of evaporation duct models and their applicability[J]. *Marine Forecasts*, 2013, 30(5): 75-83.
- [29] 宋伟, 田斌, 周沫, 等. 蒸发波导预测模型研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2013, 41(5): 52-56.
SONG Wei, TIAN Bin, ZHOU Mo, *et al.* Research on evaporation duct predicting model[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2013, 41(5): 52-56.
- [30] 刘成国, 潘中伟, 郭丽. 中国低空大气波导的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 Chengguo, PAN Zhongwei, and GUO Li. Statistical analysis of occurrence and characteristics of atmospheric ducts in China[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 1996, 11(2): 60-66.
- [31] MILLER A R, BROWN R M, and VEGH E. New derivation for the rough-surface reflection coefficient and for the distribution of sea-wave elevations[J]. *IEE Proceedings and Microwaves, Optics Antennas*, 1984, 131(2): 114-116.
- 李 磊: 男, 1987 年生, 博士生, 研究方向为电磁波在随机介质中的传播和散射建模及仿真.
- 吴振森: 男, 1946 年生, 教授, 博士生导师, 主要从事随机介质波传播、电磁散射等方面研究.
- 林乐科: 男, 1972 年生, 博士, 研究员, 主要从事对流层传播与环境特性研究.
- 赵振维: 男, 1965 年生, 博士, 研究员, 主要从事电波环境及其传播特性的研究.