

张钜一, 丁佳奇, 赵小峰. 基于 GPS 探空数据的南海海域大气波导特征分析[J]. 电波科学学报, 2020, 35(6): 841-846. DOI: 10.13443/j.cjors.2020071501

ZHANG J Y, DING J Q, ZHAO X F. Statistical analysis of atmospheric ducts in the South China Sea based on GPS sounding [J]. Chinese journal of radio science, 2020, 35(6): 841-846. (in Chinese). DOI: 10.13443/j.cjors.2020071501

基于 GPS 探空数据的南海海域大气波导特征分析

张钜一^{1,2} 丁佳奇¹ 赵小峰¹

(1. 国防科技大学气象海洋学院, 南京 211101; 2. 中国人民解放军 63870 部队, 渭南 714200)

摘 要 为了更精确地掌握南海海域大气波导的统计特征, 详细分析了大气折射率关于温度、湿度和压强的敏感性, 并在此基础上利用 2006—2010 年南海航次 GPS 探空资料对该海域表面波导和悬空波导的发生概率和波导特征参数进行了统计分析. 结果表明: 表面波导年平均发生概率基本在 20% 以下, 波导顶平均高度约为 167 m, 陷获层厚度一般不超过 30 m, 强度介于 4.5~9.6 M, 年度平均值为 7.5 M; 悬空波导年平均发生概率接近 50%, 波导顶高度一般介于 1 100~1 300 m, 陷获层厚度比表面波导略高, 平均厚度为 32.8 m, 强度平均值与表面波导相当, 但跨度比表面波导要小得多. 统计分析结果可为南海区域舰载无线电系统的运行保障提供参考.

关键词 大气折射率; 大气波导; 南海; GPS 探空; 统计分析

中图分类号 TN011

文献标志码 A

文章编号 1005-0388(2020)06-0841-06

DOI 10.13443/j.cjors.2020071501

Statistical analysis of atmospheric ducts in the South China Sea based on GPS sounding

ZHANG Juyi^{1,2} DING Jiaqi¹ ZHAO Xiaofeng¹

(1. College of Meteorology and Oceanography, National University of Defense Technology, Nanjing 211101, China;
2. Unit 63870 of PLA, Weinan 714200, China)

Abstract In order to master the statistical characteristics of atmospheric duct in the South China Sea more accurately, the sensitivity of atmospheric refractive index of temperature, pressure and humidity are analyzed in detail. Based on the cruising GPS sounding data in the South China Sea from the year of 2006 to 2010, statistical analysis of the occurrence probability of surface-based duct and elevated duct, and their characteristic parameters are computed and analyzed. The results show that the average occurrence probability of surface-based duct is relatively low, generally less than 20%. The average height of the top of surface-based duct is about 167 m, and the thickness of the trapped layer is below 30 m. The strength is between 4.5 M-units and 9.6 M-units, and the annual average is 7.5 M-units. While the average occurrence probability of elevated duct is near to 50%, and the height of the top of elevated duct is generally between 1 100 m and 1 300 m. The thickness of the trapped layer is at an average value of 32.8 m, which is slightly higher than that of the surface-based duct. The average strength of elevated duct is close to that of the surface-based duct, but its span is much smaller. These results can provide reference for the operation of ship-borne radio system in the South China Sea.

收稿日期: 2020-07-15

资助项目: 国家自然科学基金(41775027)

联系人: 赵小峰 E-mail: zxf_best@126.com

Keywords atmospheric refractive index; atmospheric duct; the South China Sea; GPS sounding; Statistical analysis

引言

大气波导是一种异常大气折射结构,它的出现能够改变电磁波传播路径及空间能量分布,从而影响雷达等无线电电磁通信系统的探测性能,如实现雷达的超视距探测,形成雷达电磁盲区及造成雷达的测高、测距误差.了解大气波导发生规律,掌握其特征量的概率分布状况,将有助于趋利避害地利用大气波导^[1-4].

近年来,随着南海地区局势日益紧张,军事斗争准备日趋激烈,为了更好地掌握战场制电磁权,加强南海海域电磁环境相关理论和实际应用研究十分迫切.由于实际高精度观测数据稀少,目前国内针对该海域大气波导的相关研究偏少.2012年,丁轩茹、成印河等对1998年5、6月份南海季风期间海上低空大气波导特征进行了分析^[5-6].成印河等还根据2006年12月7日在长山山脉以东的南海海域加密观测的1天4次高分辨率船载GPS探空数据和美国国家环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)-气候预报系统再分析(climate forecast system reanalysis, CFSR)格点再分析数据,完整分析了一次低空大气波导生成、维持、消失过程^[7].2013年,赵小峰等利用2010—2012年春季“实验1号”科考船的GPS探空资料,分析了南海以及热带东印度洋上空的大气波导发生概率和波导特征量^[8].2017年,吴超开展了基于天气研究及预报(weather research and forecasting, WRF)模型的南海海域蒸发波导中尺度数值模拟研究^[9].2019年,王海斌等基于2014—2016年发布的全球电信系统(global telecommunication system, GTS)数据对南海海域附近8个探空站数据进行了统计分析,获得了南海海区低空大气波导参数统计特征以及概率分布特征结果^[10].

本文从大气波导的成因与大气温度、湿度和压强的关系出发,详细分析了大气折射率关于温度、湿度和压强的敏感性,并在此基础上利用2006—2010年南海航次高精度GPS探空数据对该地区表面波导和悬空波导的发生概率以及波导特征参数进行了统计分析,相关研究内容是对以往该地区大气波导研究很好的补充.

1 大气折射率敏感性分析

在微波波段,大气折射率 N 可以表示为大气温度、大气压强以及水汽压的函数^[11]:

$$N = \frac{77.6}{T} \left(P + \frac{4810e}{T} \right). \quad (1)$$

式中: P 为大气压强,单位hPa; T 为大气温度,单位K; e 为水汽压,单位hPa,其值与相对湿度 h_r (%)和大气温度 t (°C)有关($T = t + 273.15$,后文将大气温度简称为温度); $e = e_0 \times h_r$, e_0 可由马格努斯经验方程给出^[12],

$$e_0 = 6.1121 \times \exp \left(17.502 \times \frac{t}{t + 240.79} \right). \quad (2)$$

在实际应用中,可以进一步将大气折射率分为干湿两项,大气折射率干项与大气压强和温度有关,而大气折射率湿项只与湿度和温度有关:

$$N_{\text{dry}} = 77.6 \frac{P}{T}, \quad (3)$$

$$N_{\text{wet}} = 3.37 \times 10^5 \frac{e}{T^2}. \quad (4)$$

为了解温度(T)、压强(P)、湿度(e)的变化对大气折射率 N 的影响, N 对高度 z 求导可得

$$\begin{aligned} \partial N = 77.6 \frac{\partial P}{T} - \left(77.6 \frac{P}{T^2} + 7.46 \times 10^5 \frac{e}{T^3} \right) \partial T + \\ 3.73 \times 10^5 \frac{\partial e}{T^2}. \end{aligned} \quad (5)$$

为了更清晰地观察温度、湿度和大气压强的变化对折射率变化的具体贡献率,取压强 P 为1000hPa,温度 T 为290K,相对湿度 h_r 为50%,代入式(5)可得

$$\delta N = 0.268 \delta P - 1.397 \delta T + 4.01 \delta e. \quad (6)$$

由式(6)可知:1) N 的变化与 e 和 P 的变化呈正相关,而与 T 的变化呈负相关;2) 水汽压 e 的变化对 N 的变化相对贡献最大,而压强 P 的变化对 N 的变化相对贡献最小.

图1给出 $P = 1013$ hPa时,大气折射率随温度和相对湿度变化的关系曲线.

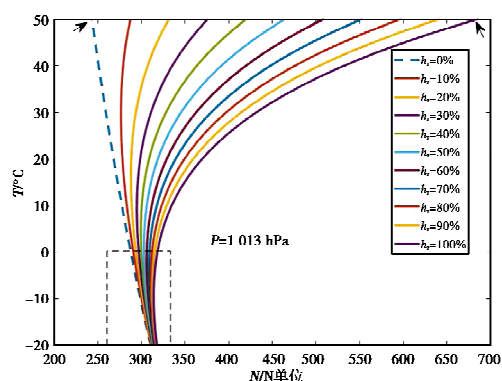


图1 压强 $P=1\ 013\ \text{hPa}$ 时大气折射率随 T 和 h_r 的变化曲线

Fig. 1 Variation of N to atmospheric temperature and relative humidity, assuming pressure is $1\ 013\ \text{hPa}$

从图1可以看出:1) 图中左侧虚线对应的相对湿度为0,即折射率干项 N_{dry} 随温度的变化,当温度升高时,折射率逐渐变小;2) 随着湿度增大,折射率的湿项 N_{wet} 对 N 的影响逐渐占据主导地位,湿度越大,折射率也越大;3) 当温度在 $0\ ^\circ\text{C}$ 以下时,湿度的影响相对较弱,随着温度的升高,湿度对折射率的影响也相应增大。以上分析也从理论上定性地说明了为什么冬季折射率变化比夏季要小,中高纬地区折射率变化要比低纬地区小。图中箭头所指位置分别在245 N单位和680 N单位附近,这也标定了实际近地面大气折射率的大致范围,可以作为之后数据筛选过程中的重要依据。

为了克服地球表面曲率的影响,引入大气修正折射率 M ,将地球表面处理成平面^[13]:

$$M = N + 10^6 \times z/a_e \approx N + 0.157z. \quad (7)$$

式中: z 为高度,单位 m ; a_e 为地球平均曲率半径。当 $dN/dz < -157$ 时(或 $dM/dz < 0$),电磁波传播路径的曲率将大于地球表面曲率,即可判断发生大气波导传播现象。由式(6)和图1可以看出,只有当水汽压随着高度迅速递减和(或)温度随高度迅速增加时才有利于出现大气波导现象。根据成因不同可以将大气波导分为三大类:蒸发波导、表面波导、悬空波导。其中蒸发波导主要是由于水汽在垂直方向上递减引起的,其结构可以采用蒸发波导高度和波导强度表示^[14];表面波导主要是由于地面的辐射冷却引起的^[15];悬空波导主要是由于逆温引起的^[16]。表面波导和悬空波导均可以采用波导顶高度、陷获层厚度和波导强度三个特征量来表示(图2)。

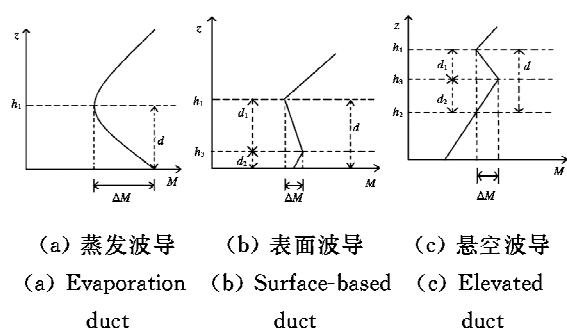


图2 大气波导分类及特征参数

Fig. 2 Classification of atmospheric ducts and their characteristic parameters

2 数据来源及数据处理

2.1 数据来源

本文所用数据来源于2006—2010年南海航次GPS探空资料,包含温度、湿度、大气压强以及风速和风向信息,具体航次时间和航线由图3给出。数据空间跨度大,北至我国台湾省以北,南至北纬 6° ,东西向横跨15个经度。因此基于这些数据分析得出的结果对南海附近广大区域的电磁保障有重要的参考价值。

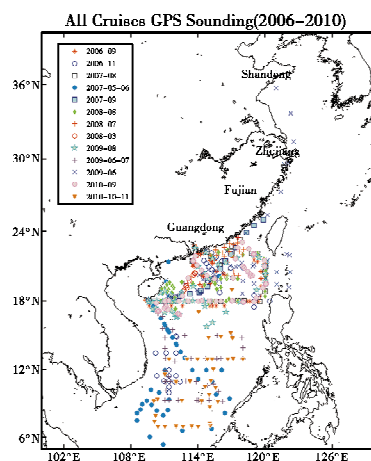


图3 2006—2010年南海航次GPS探空对应的航迹图

Fig. 3 Cruise routes corresponding to the GPS sounding of the South China Sea in 2006—2010

2.2 数据处理

2.2.1 数据质量控制

原始探空数据中有部分数据测量不全或者出现显著错误,对其进行质量控制后,利用剩余数据作为大气波导统计的有效数据。具体质量控制包括:1) 大量数据重复或出现大面积Nan,则不使用该组数

据;2)高度必须单调递增,否则去除该高度处数据;3)温压湿三项数据若与前一高度处的数据相同,去除该层数据;4)温度、湿度和大气压强的变化必须符合实际,否则剔除该数据;5)对处理后的数据进行线性插值,插值后的垂直分辨率为 2 m. 筛选之后,获得可用数据 421 组.

2.2.2 统计方法

由于蒸发波导高度较低(通常在 30 m 以下),而大部分实测 GPS 探空数据有比较严重的底部缺失,无法利用这些数据对蒸发波导进行有效的判断,因此本文不考虑蒸发波导的情况,仅对表面波导和悬空波导进行分析. 具体方法如下:1)将 N 转化为 M 并计算 M 关于高度 z 的导数,找出 $dM/dz < 0$ 对应的高度层;2)对底部数据有缺失的样本,利用底部相邻两个有效采样点的梯度计算海表大气修正折射率值,并比较该值与波导顶高度处大气修正折射率值,以此判断出现的波导是表面波导还是悬空波导;3)根据梯度分层计算相应的波导特征参数;4)对波导发生概率及特征参数进行统计分析.

3 结果分析

表 1 给出 2006—2010 年年平均发生概率及逐年发生概率. 可以看出:表面波导发生概率较低,只有 2010 年在 20% 以上,平均发生概率为 15% 左右;悬空波导发生概率较高,2006 和 2007 年发生概率均在 50% 以上,2008 年更是高达 62.16%,平均发生概率接近 50%. 与 2014—2016 年 GTS 探空统计结果相比^[10],本文表面波导年平均发生概率略低(GTS 为 17.9%),悬空波导年平均发生概率高约 12%(GTS 为 37.4%).

表 1 2006—2010 年波导发生概率年分布情况
Tab. 1 Annual distribution of waveguide occurrence probability in 2006—2010

年份	表面波导			悬空波导		
	样本数	次数	频率/%	样本数	次数	频率/%
2006	71	8	11.27	71	39	54.93
2007	101	12	11.88	101	51	50.50
2008	37	6	16.22	37	23	62.16
2009	129	20	15.50	129	57	44.19
2010	83	18	21.69	83	40	48.19
总计	421	64	15.20 (平均值)	421	210	49.88 (平均值)

表 2 给出了表面波导和悬空波导特征参数的统

计结果.

表 2 表面波导和悬空波导特征参数年分部情况
Tab. 2 Annual distribution of surface duct and elevated duct characteristic parameters

年份	表面波导			悬空波导		
	顶高/ m	厚度/ m	强度/ M单位	顶高/ m	厚度/ m	强度/ M单位
2006	190.89	23.33	9.6	1 991.5	22.16	7.2
2007	178.11	28.89	5.5	1 192.4	32.64	6.3
2008	214.75	19.50	4.5	1 267.3	36.80	5.6
2009	138.96	21.13	8.4	1 189.0	33.16	8.4
2010	113.35	21.90	9.5	1 093.0	39.29	8.9
平均值	167.21	22.95	7.5	1 346.6	32.81	7.3

从表 2 可以看出:表面波导顶高范围为 110~220 m,其中 2009 和 2010 两年间平均顶高相对最低,在 140 m 以下,2008 年最高,达到了 214 m,平均高度约为 167 m(GTS 为 106 m);平均陷获层厚度约为 23 m,其中 2008 年的平均厚度为 19.50 m,其他年份均在 20 m 以上,2007 年的平均水平最高,接近 30 m;强度年分布平均水平为 7.5 M 单位(GTS 为 7.4 M 单位),其中 2008 年最弱,为 4.5 M 单位,2006 和 2010 两年的平均水平接近 10 M 单位. 就悬空波导而言,其发生高度较高,各年平均高度都大致分布在 1 100~1 300 m,但 2006 年平均水平接近 2 000 m;陷获层厚度比表面波导略高,2006 年波导厚度约为 22 m,其余年份的平均水平都在 30 m 以上,2010 年的平均厚度接近 40 m;强度平均值与表面波导相当,为 7.3 M 单位(GTS 为 8.3 M 单位),但最低强度为 5.6 M 单位,高于表面波导最低强度,而最高强度为 8.9 M 单位,低于表面波导最高强度.

本文统计结果与 GTS 探空统计结果相比有一定的差异,这主要源于:1)本文所采用的为走航 GPS 探空数据,而文献[10]采用 8 个定点站数据,不同地理位置的大气波导发生概率会有所差异;2)本文所采用数据只包含每年 2—4 月份的数据,而大气波导的发生概率也有一定的季节差异.

4 结论与讨论

本文首先在理论上分析了大气折射率关于温度、湿度和压强的敏感性,并利用 2006—2010 年南海航次 GPS 探空数据,对该地区五年间的表面波导和悬空波导发生概率和波导特征参数年度分布情况

进行了统计分析,结论如下:

1) 表面波导五年间平均发生概率为 15.20%,除 2010 年发生概率为 21.69% 以外,其余年份的发生概率都在 20% 以下;波导顶高度一般介于 100~220 m;陷获层厚度一般不超过 30 m;波导强度介于 4.5~9.6 M 单位,年度平均值为 7.5 M 单位;

2) 悬空波导五年间的平均发生概率为 49.88%,除 2009 和 2010 两年以外,另外三年的发生概率均高于 50%;波导发生高度较高,一般介于 1 000~2 000 m;陷获层厚度比表面波导略高,一般在 30~40 m;波导强度五年年度平均值与表面波导相当,但跨度比表面波导要小。

本文所采用的数据为航次高精度 GPS 探空,虽然统计分析结果可靠性较高,但由于每年航次时间和路径都不相同,很难进行更精细化的分析。另外由于大部分探空数据有比较严重的底部缺失,没有能够基于这些数据给出蒸发波导的统计结果。考虑到深远海气象水文实测数据稀少,本文的相关结果是对以往研究很好的补充。文中每年仅包含 2—4 月份的数据,尤其缺少 12 月到次年 2 月的数据,但不同年份出现表面波导和悬空波导的年频率及其特征参数相对较为一致,所以本文的分析结果也有着一定的参考价值。下一步主要工作是收集更多的高精度实测数据,对该海域大气波导的详细季节和月分布情况做进一步研究。

致谢 感谢中科院南海海洋研究所提供本文所用实测航次 GPS 探空资料。

参考文献

- [1] MAI Y B, SHI H Q, LIAO Q X, et al. Using the decomposition-based multi-objective evolutionary algorithm with adaptive neighborhood sizes and dynamic constraint strategies to retrieve atmospheric ducts[J]. *Sensors*, 2020, 20(8): 2230.
- [2] 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 S F, ZHANG Y S, WANG H G. Atmospheric wave-guide environment for microwave over-the-horizon radar[J]. *Equipment environmental engineering*, 2013, 10(5): 85-89. (in Chinese)
- [3] HITNEY H V, RICHTER J H, PAPPERT R A. Tropospheric radio propagation assessment[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1985, 73(2): 265-283.
- [4] 孙璐. 南海地区大气波导分析与数值模拟初步研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2009.
- [5] SUN L. Analysis and preliminary research with numerical simulation of the atmospheric duct in South China Sea [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2009.
- [5] 丁轩茹. 南海海上大气波导的特征分析与变化规律[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2012.
- [6] DING X R. Characteristics analysis and change rule of atmospheric duct in the South China Sea [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology 2012. (in Chinese)
- [6] 成印河, 赵振维, 张玉生. 季风期间南海低空大气波导统计分析[J]. *电波科学学报*, 2012, 27(2): 268-274.
- [7] CHENG Y H, ZHAO Z W, ZHANG Y S. Statistical analysis of the lower atmospheric ducts during monsoon period over the South China Sea [J]. *Chinese journal of radio science*, 2012, 27(2): 268-274. (in Chinese)
- [7] 成印河, 钟权加, 周生启. 南海局地海域一次低空大气波导过程分析[J]. *广东海洋大学学报*, 2012, 40(6): 81-86.
- [8] CHENG Y H, ZHONG Q J, ZHOU S Q. A process of the lower atmospheric ducts over the local area of South China Sea [J]. *Journal of Guangdong Ocean University*, 2012, 40(6): 81-86. (in Chinese)
- [8] ZHAO X F, WANG D X, HUANG S X, et al. Statistical estimations of atmospheric duct over the South China Sea and the tropical Eastern Indian Ocean [J]. *Chinese science bulletin*, 2013, 58 (23): 2794-2797.
- [9] 吴超. 基于 WRF 的南海海域蒸发波导中尺度数值模拟研究[D]. 天津: 天津大学, 2017.
- [10] WU C. Mesoscale numerical simulation of evaporation duct in the South China Sea based on WRF [D]. Tianjin: Tianjin University, 2017. (in Chinese)
- [10] 王海斌, 张利军, 王红光. 南海海区低空大气波导气候学分析[J]. *电波科学学报*, 2019, 34(5): 633-642.
- [11] WANG H B, ZHANG L J, WANG H G. The climatological analysis of the lower atmospheric ducts in South China Sea [J]. *Chinese journal of radio science*, 2019, 34(5): 633-642. (in Chinese)
- [12] 成印河. 海上低空大气波导遥感反演及数值模拟研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2009.
- [12] CHENG Y H. A study on atmospheric ducts over the sea retrieval with AMSR-E satellite data and its numerical simulation [D]. Beijing: Graduate School of Chinese Academy of Sciences, 2009. (in Chinese)
- [12] LV W M, LI C, SONG H J, et al. Comparative analysis of reflection characteristics of lunar penetrating

- radar data using numerical simulations[J]. Icarus, 2020, 350. DOI: 10.1016/j.icarus.2020.113896
- [13] 严豪健. 大气折射的研究进展[J]. 世界科技研究与发展, 2006, 28(1): 48-58.
- YAN H J. Progresses in research of atmospheric refraction[J]. World sci-tech R & D, 2006, 28(1): 48-58. (in Chinese)
- [14] 蔡夕方, 王静菊, 何锡玉, 等. 东海区域蒸发波导变化特性研究[J]. 电波科学学报, 2020, 35(3): 372-376.
- XAI X F, WANG J J, HE X Y, et al. Research on change features of evaporation duct over the East China Sea[J]. Chinese journal of radio science, 2020, 35(3): 372-376. (in Chinese)
- [15] 任重, 李天伟, 韩东. 海上障碍物条件下表面波导电波传播仿真[J]. 计算机仿真, 2019, 36(7): 139-142.
- REN Z, LI T W, HAN D. Simulation of wave propagation in surface duct with maritime obstacle circumstance[J]. Computer simulation, 2019, 36(7): 139-142. (in Chinese)
- [16] 郝晓静, 李清亮, 郭立新, 等. 基于气象卫星数据的我国沿海悬空波导反演方法初步研究[J]. 电子学报, 2019, 47(3): 600-605.
- HAO X J, LI Q L, GUO L X, et al. Preliminary research on inversion method of elevated duct from meteorological satellite observation over Chinese regional seas[J]. Acta electronica sinica, 2019, 47(3): 600-605. (in Chinese)

作者简介

张钜一 (1997—), 男, 黑龙江人, 助理工程师, 研究方向为大气波导及电磁波传播建模.

丁佳奇 (1999—), 男, 内蒙古人, 研究方向为大气波导及电磁波传播建模.

赵小峰 (1983—), 男, 江苏人, 副教授, 研究方向为信号处理、无线电气象学、大气环境参数遥感反演.