

# 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

郝晓静<sup>1,2</sup>, 李清亮<sup>2</sup>, 郭立新<sup>1</sup>, 郭相明<sup>2</sup>

(1. 西安电子科技大学物理与光电工程学院, 陕西西安 710071; 2. 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:** 悬空波导的测量方法有直接测量和间接测量两种. 传统的直接测量手段只能得到单点的波导信息. 间接测量也存在一定的局限性, 不能获取高时空分辨率的波导多维空间信息. 而静止气象卫星由于其高时空分辨率观测的特点, 能对我国沿海海域大气环境进行时空四维监测. 文中借鉴国外一种基于气象卫星数据反演悬空波导的方法, 利用我国静止气象卫星 FY-2G 的云分类和云顶温度数据、地面观测数据及探空数据, 分析该方法中各影响因素的敏感性, 初步检验了该方法在我国沿海的适用性. 提出建立本地海域悬空波导反演方法的几个关键问题: ①选用高精度云顶温度反演数据; ②选择合适规定层(850hPa 或 700hPa); ③根据本地数据得到一些参量的经验值; ④建立本地参数化方案. 下一步将寻找更多我国不同沿海海域的事例进行验证, 该方法有望运用到我国沿海大气波导监测中, 为我国沿海大气波导监测和反演提供一种新方法新技术.

**关键词:** 悬空波导监测; 气象卫星; 云顶温度; 反演方法

**中图分类号:** TN011.3

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0372-2112 (2019)03-0600-06

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>

**DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2019.03.012

## An Preliminary Research on Inversion Method of Elevated Duct from Meteorological Satellite Observation over Chinese Regional Seas

HAO Xiao-jing<sup>1,2</sup>, LI Qing-liang<sup>2</sup>, GUO Li-xin<sup>1</sup>, GUO Xiang-ming<sup>2</sup>

(1. School of Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China; 2. National Key Laboratory of  
Electromagnetic Environment, China Research Institute of Radiowave Propagation, Qingdao, Shandong 266107, China)

**Abstract:** Elevated duct can be measured through direct or indirect ways. Nevertheless, both of these traditional methods are inadequate because direct measurement can only obtain single-point information, while indirect measurement can not obtain multidimensional information with high temporal and spatial resolution. Geostationary meteorological satellite can be used to monitor ocean atmospheric environment because of its ability to capture four-dimensional information with high temporal and spatial resolution. This paper presents a foreign inversion method of elevated duct based on geostationary meteorological satellite data, and the applicability of this method was verified with cloud classification and cloud top temperature productions from FY-2G, ground-based meteorological observation and radiosonde data in Chinese regional seas. Several key research aspects are needed to be solved for setting up the method in Chinese regional seas as, which include: Using high-precision cloud-top temperature data, selecting appropriate standard pressure level from 850hPa or 700hPa, obtaining values of empirical parameters according to local-area radiosonde data, and setting up a local parameterization schemes. The verification of applicability for the method in Chinese regional seas will be carried out, positive result of which can potentially see as an effective new means used in monitoring elevated duct in Chinese regional seas.

**Key words:** monitoring of elevated duct; meteorological satellite data; cloud top temperature; inversion method

### 1 引言

在海上, 悬空波导是除了蒸发波导之外, 最常见的

一种大气波导. 大气波导是影响电波传播的一种反常大气环境, 它的存在会导致超视距现象和雷达盲区的出现, 对雷达、通信等电子信息系统性能产生重要的影

响,而悬空波导与高空预警、突防等武器设备的作战效能密切相关。悬空波导的测量方法有直接测量和间接测量两种。直接测量手段主要有无线电探空仪、低空飞行器和微波折射率仪,这几种手段只能得到单点的大气波导信息,而且在海洋环境中的使用很少。间接测量主要有掩星反演、海杂波反演等手段,但这些手段也存在局限性,掩星反演不能获取空间连续范围的波导信息,时间分辨率也低。海杂波反演虽然能获取波导三维空间信息,但基本不能反演悬空波导。而静止气象卫星由于其实时、全空间、无缝观测的特点,为海上波导的监测提供了一种可能的手段。

大量的研究表明,大气波导是在特定天气背景条件下产生,与天气系统和天气形势密切相关<sup>[1~3]</sup>。已有大量的研究证明,层积云是悬空波导存在的重要标志<sup>[4]</sup>,层积云顶有逆温存在,逆温层内湿度随高度减小,这种分布是波导形成机制中最容易导致悬空波导出现的机制。在水平分布上,层积云所遍布的范围便是悬空波导存在的范围。因此,层积云的移动、生消变化代表着波导的变化,层积云的三维空间信息与波导的三维空间信息息息相关。利用气象卫星数据,可以得到层积云存在时的各种气象信息,从而可间接获取悬空波导的信息。

美国海军已经发明了基于气象卫星数据反演层积云大气波导的方法<sup>[5~10]</sup>,该方法适用于沿海和广阔海域。美国海军研究生院的气象学院基于该方法建立了反演软件系统 SEMEO (Satellite Electromagnetic Electro-Optical),该软件以卫星数据为输入,输出海面悬空波导的覆盖范围及波导参量。本文基于我国静止气象卫星数据,分析探索了这种方法在我国沿海海域的适用情况,初步提出了建立我国沿海悬空波导反演方法的思路。

## 2 悬空波导反演方法简介

基于气象卫星数据反演层积云大气波导的方法以海表温压湿气象要素(下文简称“海表气象要素”)、卫星反演的云顶温度(下文简称“云顶温度”)、850hPa 的温压湿气象要素(下文简称“850hPa 气象要素”)为输入,通过各种近似、参数化方案和物理统计模型,计算得到悬空波导。该方法基本思路是:首先,利用海表气象要素和云顶温度,通过近似方案、物理统计模型,得到海表、云顶和云底的高度、修正折射指数。其次,再利用 850hPa 气象要素,通过参数化方案,间接得到波导顶的高度和修正折射指数,同时计算 850hPa 高度和修正折射指数。最后,把云顶作为波导层底,利用海表面、云底、波导层底、波导顶、850hPa 五个点所在高度及其修正折射指数绘制修正折射指数廓线图(图 1),即可得到层积

云存在时悬空波导各参量值。其中波导层底高度及修正折射指数求解见式(1)、式(2):

$$Z_3 = a_1 \times \frac{\Delta T}{\Gamma_{\text{dry}}} + (1 - a_1) \times \frac{\Delta T}{\Gamma_{\text{moist}}} \quad (1)$$

$$M_3 = 77.6 \times \frac{P_3}{T_{\text{CT}}} + 3.73 \times 10^5 \times \frac{e_3}{T_{\text{CT}}^2} + 0.157 \times Z_3 \quad (2)$$

其中,式(1)中,云厚占边界层厚度  $a_1 = \frac{1}{3}$  or  $\frac{2}{3}$ ,  $\Delta T = T_{\text{CT}} - T_{\text{Sea}}$  为云顶与海表温度差,干、湿绝热温度梯度分别为  $\Gamma_{\text{dry}} = -9.8^\circ\text{C}/\text{km}$ 、 $\Gamma_{\text{moist}} = -7^\circ\text{C}/\text{km}$ ;式(2)中,  $P_3$ 、 $e_3$  分别为波导层底气压、水汽压,可通过压高公式和相对湿度公式得到。

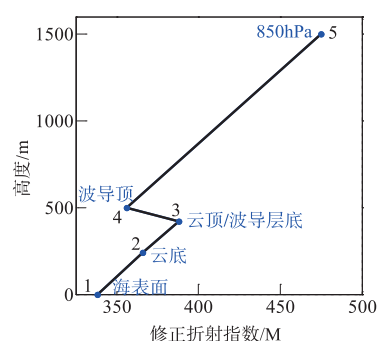


图1 “五点法模型”大气修正折射指数廓线图

波导顶高度及修正折射指数求解见式(3)、式(4):

$$Z_4 = Z_3 + Z_{\text{DepthTrappingLayer}} \quad (3)$$

$$M_4 = M_3 - \Delta M \quad (4)$$

$$\Delta M = 1.1543 \times \Delta T' + 4.71 \quad (5)$$

$$\Delta T' = T_{850} + \frac{9.84}{1000} \times (Z_{850} - Z_3) \quad (6)$$

其中,  $\Delta M$ 、 $\Delta T'$  分别为波导强度参数化公式、温度参数化公式,由实测数据统计拟合得到;  $T_{850}$ 、 $Z_{850}$  分别为 850hPa 温度和高度值,由数值模式提供;陷获层厚度  $Z_{\text{DepthTrappingLayer}} = 100\text{m}$ ,也由实测数据统计得到。反演流程如图 2 所示。下文把该反演方法统称为“五点法模型”。

## 3 反演结果与探空结果比较

### 3.1 探空结果分析

探空选取的站点是 58968 (台北站),时间为 2015 年 08 月 07 日 08 时。图 3 是用 MICAPS (Meteorological Comprehensive Analysis and Process System, 气象信息综合分析处理系统)显示的结果,其中紫色等值线代表静止气象卫星 FY-2G 的云顶温度,填色图代表云分类。其中,云顶温度由 FY2G 星载多通道扫描辐射计两个红外 (10.3 ~ 11.3  $\mu\text{m}$ , 11.5 ~ 12.5  $\mu\text{m}$ ) 反演得到,云分类由两个红外通道 (10.3 ~ 11.3  $\mu\text{m}$ , 11.5 ~ 12.5  $\mu\text{m}$ ) 和一个水汽通道 (6.3 ~ 7.6  $\mu\text{m}$ ) 反演得到,本文所用数据是从国家卫星气象中心下载的反演产品。图中,该站点位于

台风西部的外围层积云或高积云区域内(浅咖色). 云顶温度数据显示,该站点云顶温度为 17℃. 探空数据计算的该点波导各参量值分别为:波导顶高 2334m,底高

2278m,强度 9.8M. 下文把探空数据计算的波导结果统称为“探空结果”.

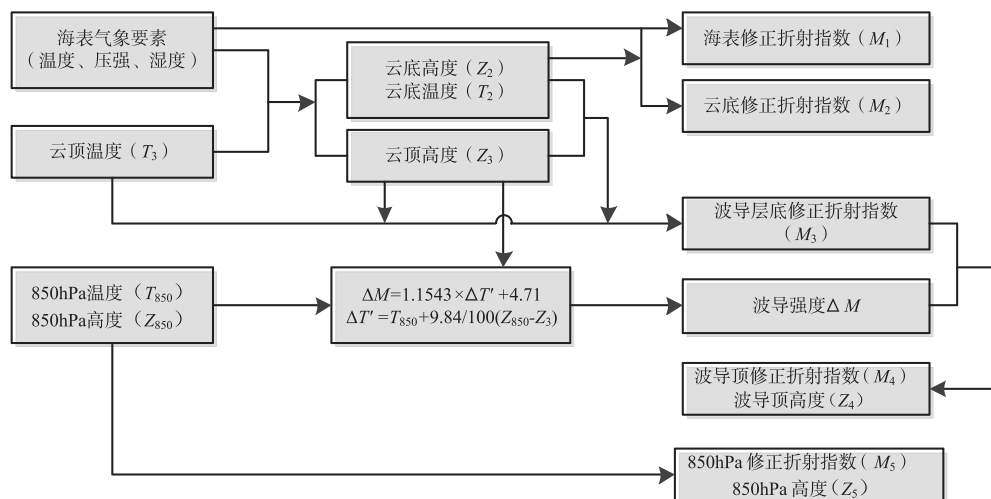


图2 五点法模型反演悬空波导流程图

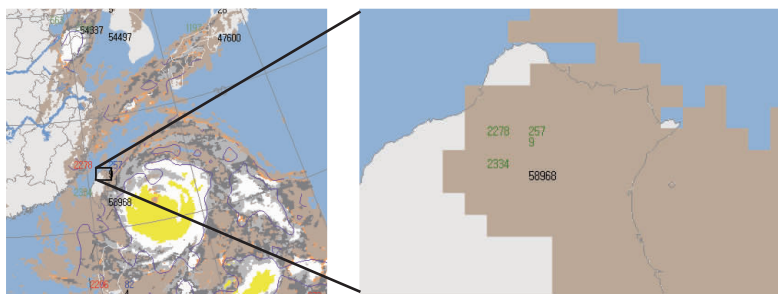


图3 FY-2G云分类数据、云顶亮温数据和悬空波导参量MICAPS显示图

图 4(a) 是这一时刻台北站的探空结果,图中显示 2278m ~ 2333.5m 之间是波导层. 从探空数据气温和露点温度廓线图(图 4(b))上可以看出,在波导层内,有逆温存在,且温度露点差随高度迅速增大,属于典型的下沉逆温. 图 4(c) 位温廓线显示边界层为典型的稳定边界层,且在 2000m 左右出现明显的顶盖逆温,顶盖逆温标志着边界层顶. 水汽压和相对湿度廓线图(图 4(d)、(e))显示,逆温层内水汽压和相对湿度随高度也呈现出迅速减小的趋势. 在 689 米到逆温层底的气层内,空气相对湿度大于 95%,说明该层大气达到饱和状态,该气层为云层, FY-2G 云分类数据也显示该站被层积云或高积云覆盖.

### 3.2 反演结果与探空结果比较

根据探空数据,波导顶高度 2278m 已经位于 850hPa 高度之上,因此此处试图选择 700hPa 作为第五点,其他参数不变,五点法模型反演结果与探空结果见表 1,从表中可知,模型反演的波导顶高偏低 918.3m,波导层底高偏低 962.8m,波导厚度偏高 45.5m,波导强

度偏高 30.3M,五点法模型反演结果与探空结果相比,误差较大,但探空数据也存在垂直分辨率不够高的问题,有可能只捕捉到了一部分波导层.

表 1 悬空波导反演结果与探空结果比较

	波导顶高 (m)	波导层底高 (m)	波导厚度 (m)	波导强度 (M)
探空结果	2333.5	2278	55.5	9.8
反演结果	1415.2	1315.2	100	40.1

## 4 反演模型敏感性分析

为了检验五点法模型的适用性,下面依次分析模型中各影响因素的敏感性.

首先,分析云顶温度变化对模型反演结果的敏感性. 卫星数据反演的云顶温度为 17℃,而探空的云顶温度为 14℃,显然云顶温度偏高是造成模型反演误差的原因之一. 云顶温度变化敏感性结果见表 2,云顶温度每降低 1℃,波导顶高平均升高 115m,波导强度平均降低 1.3M,随着云顶温度逐渐接近探空的真实值,五点法模型反演结果越接近探空结果(图 5).

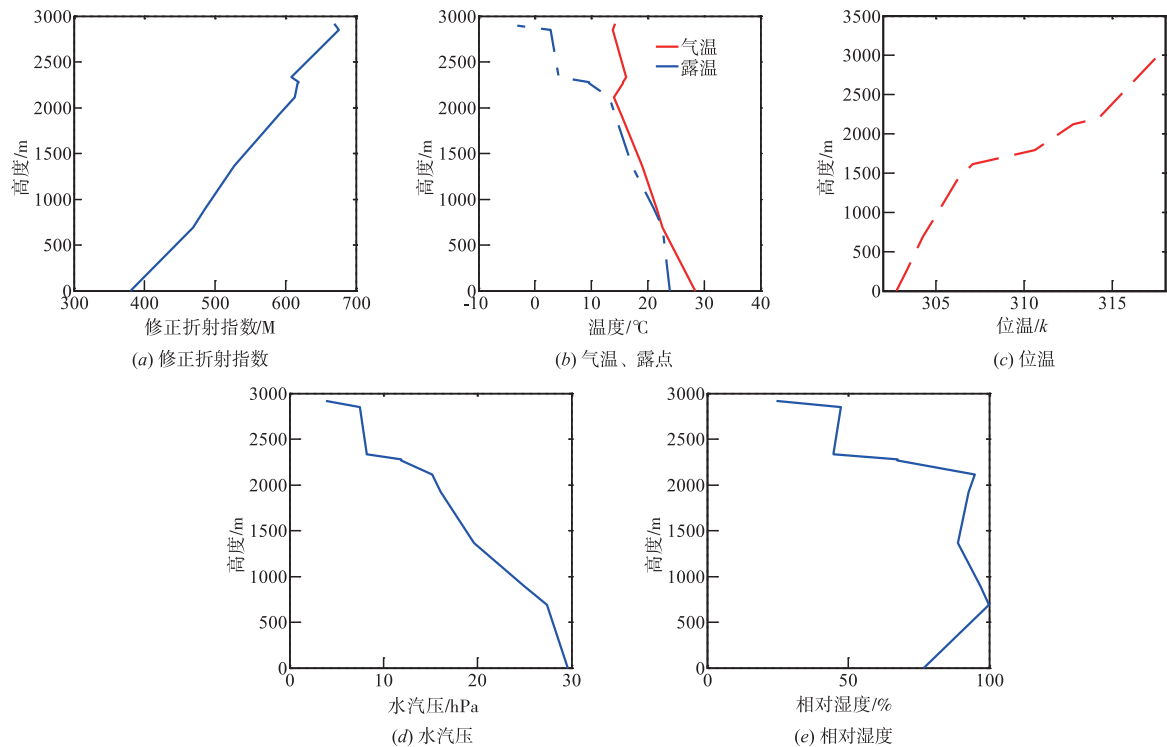


图4 2015年08月07日08时台北站实测气象要素及修正折射指数廓线图

表 2 反演结果与探空结果

	云顶温度 (℃)	波导顶高 (m)	波导层底高 (m)	波导厚度 (m)	波导强度 (M)
探空结果	14	2333.5	2278.0	55.5	9.8
反演结果	17	1415.2	1315.2	100	40.1
	16	1530.6	1430.6	100	38.8
	15	1646.0	1546.0	100	37.5
	14	1761.3	1661.3	100	36.1

然后,又分析了云厚占边界层比例的变化对反演结果的影响.五点法模型中云厚占边界层的比例为1/3,而探空数据为2/3(图6).所以,按探空数据修改云厚占边界层的比例,结果显示,五点法模型结果与探空结果相比,反演误差减小,反演结果进一步逼近探空结果(图7).表3显示,与上面云顶温度修正后的反演结果相比,波导顶高升高约200m,强度减小2.2M,反演效果进一步改善.在五点法模型中,云厚占边界层厚度 $a_1$ 的取值(1/3或2/3),取决于波导顶高度是否小于400m.因此,为了提高模型精度,400m这个阈值应该进行修正.

表 3 反演结果与探空结果

	波导顶高	波导层底高	波导层厚度	波导强度
探空结果	2333.5	2278	55.5	9.8
云顶温度修正后反演结果	1761.3	1661.3	100	36.1
云厚占边界层比例修正后反演结果	1959.2	1859.2	100	33.9

接着分析气温递减率变化对模型反演结果的影响.首先,探空数据云内湿绝热温度递减率为 $6^{\circ}\text{C}/\text{km}$ (图4(a)),小于模型中用到的 $7^{\circ}\text{C}/\text{km}$ .研究显示,在对流层中的不同部位,湿绝热温度递减率会有近 $3^{\circ}\text{C}/\text{km}\sim 5^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 的差异<sup>[1]</sup>.因此,这里根据探空数据把云内温度递减率由 $7^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 修改为 $6^{\circ}\text{C}/\text{km}$ .其次,探空数据云底温度递减率为 $8.4^{\circ}\text{C}/\text{km}$ ,介于干绝热温度递减率( $9.8^{\circ}\text{C}/\text{km}$ )与湿绝热温度递减率( $6^{\circ}\text{C}/\text{km}$ )之间,所以,在云顶云底高度计算中把干绝热减温率由 $9.8^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 修改为实际的 $8.4^{\circ}\text{C}/\text{km}$ .与上述两步修正后反演结果相比,波导顶高提高了311m,强度减小5.1M(表4),模型反演结果更进一步逼近探空结果(图8).因此,五点法模型中,云内和云底大气的温度递减率应该根据实测数据统计得到.

在反演模型中,假设下垫面相对湿度为85%,云顶相对湿度为100%,而探空数据这两个值分别为75%和94%.按照探空数据修改这两个值,修改后结果没有明显改进(图略).因此下垫面和云顶相对湿度对反演模型影响不大.

表 4 反演结果与探空结果

	波导顶高	波导层底高	波导层厚度	波导强度
探空结果	2333.5	2278	55.5	9.8
云厚占边界层比例修正后反演结果	1959.2	1859.2	100	33.9
气温递减率修正后反演结果	2271	2171	100	28.8

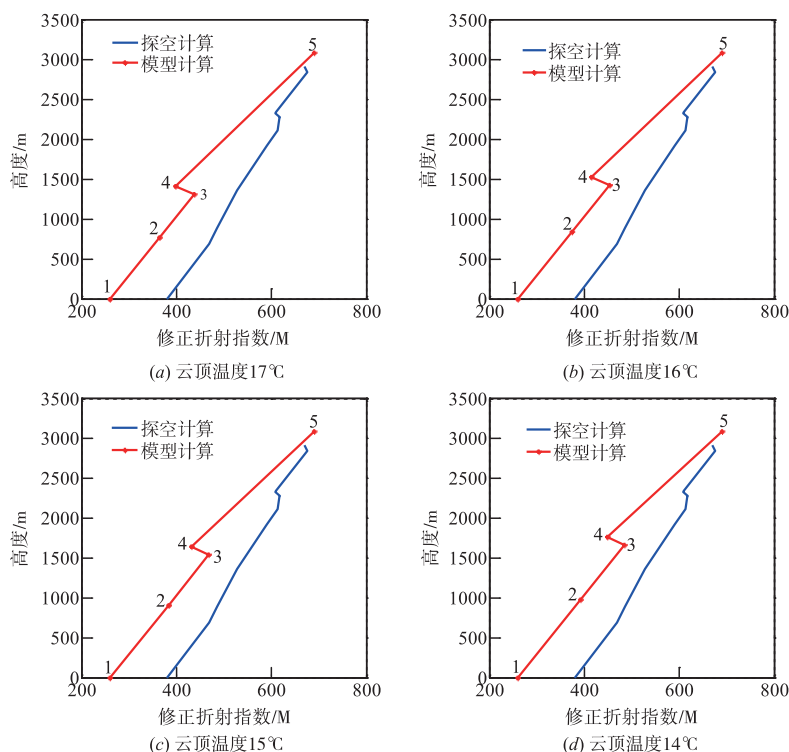


图5 反演结果与探空结果修正折射指数廓线(云顶温度变化后)

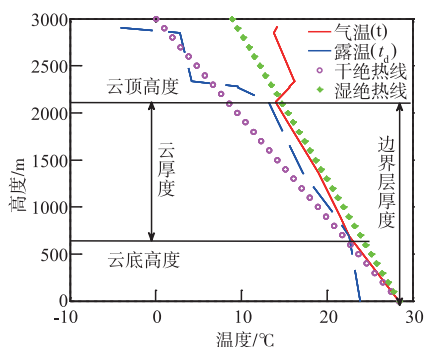


图6 云厚占边界层厚度比例图

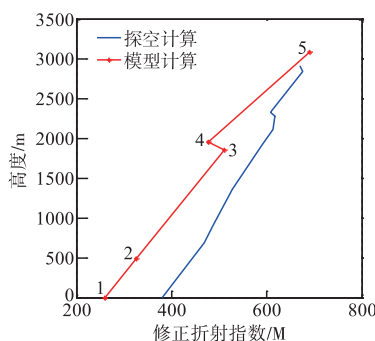


图7 反演结果与探空结果修正折射指数廓线(云厚占边界层比例变化后)

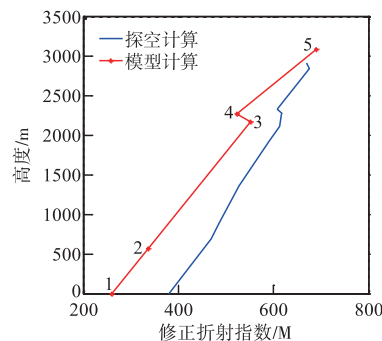


图8 反演结果与探空结果修正折射指数廓线(气温递减率变化后)

除了上述几个因素外,用来计算波导强度的  $\Delta T'$  参数化公式中,温度梯度也应该根据本地实测数据分析得到,而不应该用干绝热温度梯度. 另外,在计算悬空波导强度  $\Delta M$  的线性回归方程中,方程各系数值是通过东太平洋加利福尼亚范登堡本地实测数据统计得到的,因此,也应该根据本地实测数据统计得到该值. 最后,模型中规定波导层厚度  $Z_{\text{DepthTrappingLayer}}$  为 100m. 100m 也是范登堡本地的经验值,实际应该根据本地实测数据得到该值.

通过分析反演模型中几个影响因素的改变对反演结果的影响,以及模型中一些参数化方案中参数值根据本地实测值修正后,五点法模型反演波导的准确度提高.

## 5 结论

通过对 2015 年 08 月 07 日 08 时,位于台风西部外围层积云或高积云区域一个波导个例的分析,初步检验了“基于气象卫星数据反演悬空波导的方法”在我国沿海的使用效果. 通过对模型进行以下修改:

- (1) 改变云厚占边界层比例选择的阈值;
- (2) 修正云内云底气温随高度变化的梯度;
- (3) 通过本地数据重新建立  $\Delta T'$  和  $\Delta M$  参数化公式;调整波导层厚度值  $Z_{\text{DepthTrappingLayer}}$  为本地适用值;
- (4) 选用高精度云顶温度反演数据,为此可选择使用 MODIS 云顶温度反演数据;
- (5) 对不同的波导高度,用不同的规定层(850hPa、

700hPa)气象要素.

修改后,模型反演精度提高,与探空结果接近,但还存在一定的误差.因此,上述几点也是建立本地海域悬空波导反演方法的几个关键问题.另外,需要经过大量的本地数据和高精度卫星数据改进模型,建立本地的适用模型.该模型用到的规定层(850hPa、700hPa)气象要素是通过数值模式结果得到的,可以尝试使用MODIS反演的结果,这样就消除了对数值模式的依赖,更易于船载、舰载大气波导监测系统.最后,如果能得到高分辨率探空数据,则更有助于提高反演模型的精度.同时,为了提高云顶温度精度,以后的分析将使用MODIS反演数据代替FY2G反演数据.下一步将寻找更多的我国不同沿海海域的事例进行验证,该方法有望运用到我国沿海大气波导监测中,为我国沿海大气波导监测和反演提供一种新方法新技术.

#### 参考文献

- [1] B R Bean, E J Dutton. Radio Meteorology [M]. Boulder, Colorado, USA: National Bureau of Standards Monograph, 1996.
- [2] R A Helvey, J S Rosenthal. Guidance for an expert system approach to elevated duct assessment over the northeastern pacific ocean [A]. Proceedings of 1994 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium [C]. Pasadena, CA, USA: IEEE, 1994.
- [3] Gary W Culbertson. Assessment of Atmospheric Effects on VHF and UHF Communications [D]. Monterey, California, USA: Naval Postgraduate School, 1990.
- [4] Rosenthal J S. Inferring refractivity conditions from satellite imagery [R]. California: Pacific Missile Test Center, 1985.
- [5] Lyons S W. Satellite-Derived Refractive Duct Height Estimates [R]. California: Pacific Missile Test Center, 1985.
- [6] Lyons S W. SPADS Automated Duct Height Statistics [R]. California: Pacific Missile Test Center, 1985.
- [7] Szymer R J. Evaluation of the Accuracy of the PMTCSatellite-Infrared (IR) Automated Duct Height Algorithm [R]. California: Pacific Missile Test Center, 1989.
- [8] 戴福山. 大气波导及其军事应用 [M]. 北京: 解放军出版社, 2002.  
Dai Fu-shan. Atmospheric Duct and Its Military Applications [M]. Beijing: PLA Press, 2002. (in Chinese)
- [9] McBride, Marvin B. Estimation of Stratocumulus-Topped Boundary Layer depth Using Sea Surface and Remotely Sensed Cloud-Top Temperatures [D]. Monterey, California, USA: Naval Postgraduate School, 2000.
- [10] Mary S J, Philip A D. Verification and Validation of the Satellite Marine-Layer/Elevated Duct Height (SMDH) Technique [R]. San Diego: Space and Naval Warfare System Command METOC System Program Office, 2000.

#### 作者简介



**郝晓静** 女, 1983年4月出生, 内蒙古人. 2009年毕业于南京信息工程大学大气物理学院, 获得硕士学位, 中国电波传播研究所工程师, 西安电子科技大学在读博士. 主要研究方向为电波环境的数值模拟及遥感反演研究.  
E-mail: haoxj22s@163.com



**李清亮** 男, 1963年出生, 河南人, 博士, 中国电波传播研究所研究员, 中国电子科技集团公司首席科学家, 长期从事电波传播理论及应用技术研究, 先后担任某重大工程副总设计师、973项目技术首席和863计划重大课题组长, 在目标及其环境特性、电离层扰动与传播特性等方面取得多项研究成果, 获国家科技进步一等奖, 享受国务院政府特殊津贴.

E-mail: qliangliCrip@sina.com



**郭立新** 男, 1968年出生, 陕西人, 博士, 西安电子科技大学研究员, 西安电子科技大学教授, 在国际上率先开展电大尺寸目标波束电磁散射研究, 成果得到应用; 解决低仰角、大粗糙度海面散射建模难题, 突破了地海杂波建模和应用部分瓶颈; 考虑耦合散射, 解决粗糙面与目标复合散射中的部分关键问题. 教育部长江学者特聘教授, 国家杰出青年基金获得者, 入选

国家“百千万人才工程”并被授予“有突出贡献中青年专家”荣誉称号.

E-mail: lxguo@xidian.edu.cn