

刘黎军, 夏俊明, 白伟华等. 2019. 蒸发波导对 GNSS 海面反射信号有效散射区域的影响. 地球物理学报, 62(2): 499-507, doi:10.6038/cjg2019L0689.

Liu L J, Xia J M, Bai W H, et al. 2019. Influence of evaporation duct on the effective scattering region of GNSS reflected signals on the sea surface. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 62(2): 499-507, doi:10.6038/cjg2019L0689.

# 蒸发波导对 GNSS 海面反射信号有效散射区域的影响

刘黎军<sup>1,2,3</sup>, 夏俊明<sup>1,2,3</sup>, 白伟华<sup>1,2,3\*</sup>, 孙越强<sup>1,2,3</sup>, 杜起飞<sup>1,2,3</sup>, 骆黎明<sup>1,2,3</sup>

1 中国科学院大学, 北京 100049

2 中国科学院国家空间科学中心, 北京 100190

3 天基空间环境探测北京市重点实验室, 北京 100190

**摘要** 蒸发波导在海洋低空的发生概率高达 90%, 对舰船雷达、通信等电磁系统具有重要影响. 为了分析利用 GNSS 卫星海面反射信号的时延-相关功率波形反演蒸发波导的可行性, 本文提出了 GNSS 卫星海面反射信号的有效散射区域的概念, 并将有效散射区域内的 GNSS 反射信号区分为 GNSS 标准反射信号和 GNSS 波导反射信号; 然后, 利用射线追踪方法, 仿真分析了 GNSS 卫星海面反射信号的有效散射区域大小对蒸发波导的关键参数——波导高度的敏感性, 并分析了在时延-相关功率波形上利用反射信号的传播时延将二者分离的可行性. 结果表明, GNSS 卫星海面反射信号的有效散射区域对蒸发波导高度非常敏感, 对于 2~25 m 高的 GNSS 反射信号接收天线, 当蒸发波导的高度由 0 m 增加至 20 m 时, GNSS 反射信号有效散射区域半径的均值可由约 14 km 迅速扩展至约 160 km; 采用高度角足够大的 GNSS 卫星可以将有效散射区内的 GNSS 标准反射信号与 GNSS 波导反射信号在时延-相关功率波形上分离开.

**关键词** 蒸发波导; GNSS 海面反射信号; 射线追踪; 有效散射区域

doi:10.6038/cjg2019L0689

中图分类号 P229, P407

收稿日期 2017-11-03, 2018-11-20 收修定稿

## Influence of evaporation duct on the effective scattering region of GNSS reflected signals on the sea surface

LIU LiJun<sup>1,2,3</sup>, XIA JunMing<sup>1,2,3</sup>, BAI WeiHua<sup>1,2,3\*</sup>, SUN YueQiang<sup>1,2,3</sup>, DU QiFei<sup>1,2,3</sup>, LUO LiMing<sup>1,2,3</sup>

1 The university of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

2 National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

3 Beijing Key Laboratory of Space Environment Exploration, Beijing 100190, China

**Abstract** The occurrence probability of evaporation duct, which has significant influence on the ship-borne radar, communication and other electromagnetic systems, is as great as 90% at low altitude marine atmosphere. In order to analyze the feasibility of retrieving the evaporative duct using the delay-correlation power mapping of the GNSS sea surface reflected signals, the concept of the effective scattering region of the GNSS sea surface reflected signals was proposed, and these signals in the effective scattering region were divided into GNSS standard reflected signals and GNSS duct reflected signals. Then, the sensitivity of the effective scattering region of the GNSS sea surface reflected signals to the key parameter of the duct, the evaporation duct height, was analyzed utilizing the ray tracing method. And the feasibility of separating GNSS duct reflected signals from GNSS standard reflected signals was analyzed as well. The results show

**基金项目** 国家重点研发计划重点专项项目(2017YFB0502800, 2017YFB0502802)和国家自然科学基金青年科学基金项目(41606206, 41405039, 41405040, 41505030)资助.

**第一作者简介** 刘黎军, 男, 1975 年生, 中国科学院大学在读博士研究生, 从事 GNSS-R 技术的海洋应用研究. E-mail: liulijun@nssc.ac.cn

**\* 通讯作者** 白伟华, 男, 1982 年生, 研究员, 从事 GNSS 遥感技术的应用研究. E-mail: bjbwh@163.com

that the effective scattering region of the GNSS reflected signals is very sensitive to the evaporation duct height. When the evaporation duct height increases from 0 m to 20 m, the mean effective scattering region radius could be rapidly extended from about 14 km to about 160 km with GNSS receiver antenna height varying from 2 m to 25 m. The GNSS standard reflection signals in the effective scattering region could be separated from the GNSS duct signals when the GNSS satellite's elevation angel is large enough.

**Keywords** Evaporation duct; GNSS sea surface reflected signal; Ray tracing; Effective scattering region

## 0 引言

大气波导是对流层内大气折射率随海拔升高而突然锐减的一种特殊的折射率剖面结构,这种特殊的大气折射率剖面结构可使电磁波传播轨迹的弯曲程度超过地球曲率,并将其陷获在一定厚度的大气层内形成波导传播(康士峰等,2014).在海洋大气环境中,受海水蒸发的影响,蒸发波导的发生概率非常高,在有些海域甚至可以达到90%(Yardim,2007).蒸发波导的平均高度约为13 m(严豪健等,2006),非常接近于海面舰船雷达、通信系统等电磁设备的高度.当蒸发波导存在时,受蒸发波导陷获作用的影响,舰船上电磁设备发射和接收到的电波信号极易发生超视距传播现象;当陷获作用较强时,这些电磁设备正常的工作覆盖区域内甚至会形成探测盲区和通信盲区(戴福山,2002).因此,快速、准确地掌握蒸发波导的发生情况,对于实现雷达的超视距探测、雷达目标探测结果的误差修正以及通信系统的远距离超宽带传输(周朋等,2014)等应用非常重要.目前,监测蒸发波导的方法主要有总体通量法和修正折射指数廓线拟合法(张永刚等,2014).但是这两种方法都需要利用系留汽艇、探空气球、海上铁塔等就位探测手段提供气象数据,因此,他们普遍具有测量结果时、空分辨率低,成本高且受海洋恶劣气象条件严重制约的缺点.大气波导的遥感探测是目前波导研究领域的重要研究方向,Krolik等首先提出了利用雷达海杂波反演大气波导的方法(Krolik and Tabrikian, 1997),该技术简称为RFC(Refractivity From Clutter)探测技术,是近年来的研究热点(Rogers et al., 2000; Yardim et al., 2009; Karimian et al., 2011).但是RFC技术属于主动微波遥感探测,需要雷达主动发射并接收海面电磁波的后向散射信号,隐蔽性较差.20世纪90年代以来,随着GPS卫星系统的快速发展,利用地基GPS卫星直射信号开展大气折射率剖面的反演研究开始兴起(Lowry et al., 2002; 毕研盟

等,2006;伍亦亦等,2010;Wang et al., 2013a,b).王波等借鉴RFC技术反演大气波导的思想,提出了利用GNSS卫星海面反射信号功率分布反演蒸发波导的方法(Wang et al., 2011).他们通过岸基实验证明了位于岸边的GNSS反射信号接收天线可以接收到大气波导内传播的低高度角GNSS海面反射信号,并用接收到的信号的相关功率值成功地反演了蒸发波导的折射率廓线,但是,当卫星仰角小于 $3^\circ$ 时,这种方法反演的蒸发波导高度误差非常大.为了研究利用GNSS海面反射信号反演大气波导的可行性,许多研究者(Balvedi and Walter, 2007, 2008; Li et al., 2010; Zhang et al., 2012)利用射线追踪法和抛物方程法对GNSS海面反射信号的传播路径和功率分布进行了仿真研究.目前,这些已有的仿真和实验研究工作,普遍侧重利用蒸发波导对GNSS反射信号的绝对功率的影响对波导参数进行反演,而利用蒸发波导对GNSS反射信号相关功率波形的影响反演大气波导的研究相对较少,事实上,GNSS海面反射信号的时延-相关功率波形已经成功应用到了海面风场的反演(Zavorotny et al., 2000; Foti et al., 2015).本文重点分析了利用GNSS相关功率波形反演蒸发波导的物理基础,即GNSS卫星海面反射信号的有效散射区域大小对蒸发波导的关键参数——波导高度的敏感性;然后,研究了从GNSS反射信号时延相关功率波形上分离出GNSS波导反射信号相关功率波形的可行性.

## 1 模型及方法

### 1.1 模型

为了使GNSS卫星海面反射信号在传播过程中受蒸发波导的折射效应更加显著,本文以岸基或舰载GNSS反射信号接收机接收低高度角GNSS海面反射信号为背景,建立了如图1所示的GNSS海面反射信号接收模型.由于蒸发波导的高度通常不超过30 m,因此,模型中的GNSS反射信号接收

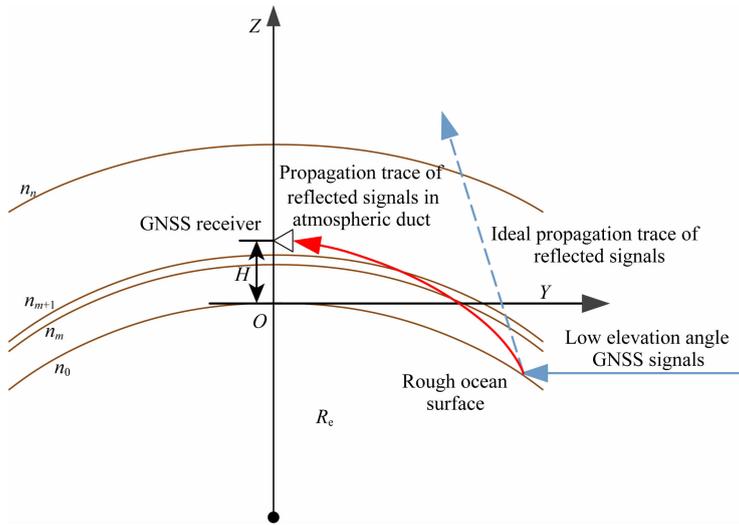


图1 GNSS反射信号传播模型

Fig. 1 GNSS reflected signal's propagation model

机天线的高度小于 30 m. 为了便于接收低高度角 GNSS 海面反射信号, GNSS 反射信号接收机天线的波束中心平行地面, 并指向 GNSS 卫星所在的方向. 图 1 模型中的直角坐标系以 GNSS 反射信号接收机在海面的投影  $O$  为原点;  $O$  与地心连线为  $Z$  轴, 竖直向上为正方向;  $Y$  轴与地球表面相切于原点  $O$ , 并指向 GNSS 卫星的方向;  $X$  轴由  $Y$  轴和  $Z$  轴按右手法则定义得到. 图 1 中红色带箭头实线示意了 GNSS 反射信号在蒸发波导折射效应作用下的一条传播的轨迹, 图中虚线表示其在无大气折射效应时的传播轨迹. 图中  $n_0, n_1, \dots, n_n$  表示依据球面大气分层方法划分的不同大气层的折射率, 其中  $n_0$  表示地面大气折射率.

根据大气修正折射指数  $M$  的定义为(康士峰等, 2014):

$$M = N + \frac{z}{R_e} \times 10^6 = \frac{77.6}{T} \left( P + \frac{4810e}{T} \right) + 0.157z, \quad (1)$$

式中,  $P, e, T$  分别表示大气压强(hPa), 水汽分压(hPa)和大气温度(K),  $z$  表示距离地面的垂直高度(m). 当大气修正指数  $M$  的垂直梯度满足  $dM/dz < 0 \text{ m}^{-1}$  (相应的折射指数梯度  $dN/dz$  小于  $-0.157 \text{ m}^{-1}$ ) 时, 表示存在大气波导,  $dM/dz = 0$  的点所对应的高度称为波导高度. 文献(Freehafer, 1988)给出了利用蒸发波导高度计算最低陷获电磁波频率的经验公式, 即:

$$f_{\min} = 360.33h^{-1.5} \text{ (GHz)}, \quad (2)$$

式中,  $h$  为波导层高度, 单位为 m. 由于蒸发波导的高度通常不超过 30 m, 由式(2)可得蒸发波导的最小陷获频率约为 2.19 GHz. 由于 GNSS 卫星的频

率处于 L 波段(1~2 GHz), 因此 GNSS 卫星信号通常不能被蒸发波导所捕获, 即在蒸发波导条件下, GNSS 海面反射信号通常只发生一次海面反射, 不存在多次反射的现象.

当海面平静时, 根据图 1 中 GNSS 卫星、海面及 GNSS 反射信号接收机之间的几何关系, 可推导得到 GNSS 卫星在海面的镜面反射点与原点  $O$  的距离  $Y_{\text{sp}}$  近似为

$$Y_{\text{sp}} = H \times \tan\theta, \quad (3)$$

式中,  $H$  为 GNSS 反射信号接收机天线的高度,  $\theta$  为 GNSS 卫星入射信号与海平面的夹角. 当  $H$  为 30 m,  $\theta$  为  $5^\circ$  时, 利用式(3)计算得到  $Y_{\text{sp}}$  约等于 343 m.

当海面粗糙时, 由于散射效应, GNSS 反射信号接收机接收到的是包括镜面反射点在内的大片海面区域的多径反射信号的叠加信号. 为了表示 GNSS 反射信号接收机可接收到的反射信号的最大空间范围, 本文定义原点  $O$  与可接收到的最远的海面反射信号的反射点之间的地球球面距离为 GNSS 反射信号的有效散射半径. 在标准大气条件下, GNSS 反射信号的有效散射半径  $D$  可利用视线传播距离公式表示为(张瑜, 2007):

$$D = \sqrt{2R_{\text{eff}}} \times \sqrt{H}, \quad (4)$$

式中,  $R_{\text{eff}}$  为考虑标准大气折射后的等效地球半径, 约为  $4/3R_e$ ,  $R_e$  为地球真实半径, 取 6378137 m. 当  $H$  为 30 m 时,  $D$  约等于 22.6 km, 即: 在标准大气条件下, GNSS 反射信号接收机最远可以接收到 22.6 km 外的海面反射信号. 理想条件下, 在不考虑接收天线方向图的影响时, 以坐标原点  $O$  为圆心, 在海面上以有效散射半径为半径的圆形区域内, 任意一点的

GNSS 散射信号,都可能经过海面反射后被 GNSS 反射信号接收天线接收到,因此,本文将这一区域定义为 GNSS 反射信号的有效散射区域.显然,依据上述定义,GNSS 反射信号有效散射区域的大小主要取决于有效散射半径的大小.由于蒸发波导存在时,受波导的陷获作用的影响,GNSS 反射信号的有效散射半径及有效散射区域会增大.为了便于区分,本文将有效散射区域内位于标准大气条件下的散射区域范围内的 GNSS 反射信号,称为 GNSS 标准反射信号;将有效散射区域内由于波导效应而增加的散射区域内的 GNSS 反射信号,称为 GNSS 波导反射信号.

## 1.2 蒸发波导模型

中性层结条件下,蒸发波导的大气修正折射指数廓线计算公式为(康士峰等,2014):

$$M(z) = M_0 + 0.125z - 0.125 \ln \left( \frac{z + z_0}{z_0} \right), \quad (5)$$

式中, $M_0$  为海面的修正折射指数; $h$  为蒸发波导高度; $z_0$  为海面粗糙度长度,通常取常数  $1.5 \times 10^{-4}$ ;  $z$  表示距离地面的垂直高度(m).由式(5)可知,蒸发波导的修正折射指数廓线主要由表面折射指数  $M_0$  和波导高度  $h$  两个参量来确定.因为海面的修正折射指数  $M_0$  通常可利用船上携带的温、湿、压探测仪器的测量结果计算得到,所以要确定蒸发波导的廓线公式(5),关键是确定蒸发波导的高度  $h$ .图 3 示意了海面折射指数  $M_0$  为 303,蒸发波导高度分别为 0 m、10 m、20 m 和 30 m 时,由公式(1)和(5)计算得到的大气折射指数,如图 2a 所示和修正折射指数廓线,如图 2b 所示.图 2 中蒸发波导高度为 0 m 的廓线,是标准大气折射廓线.

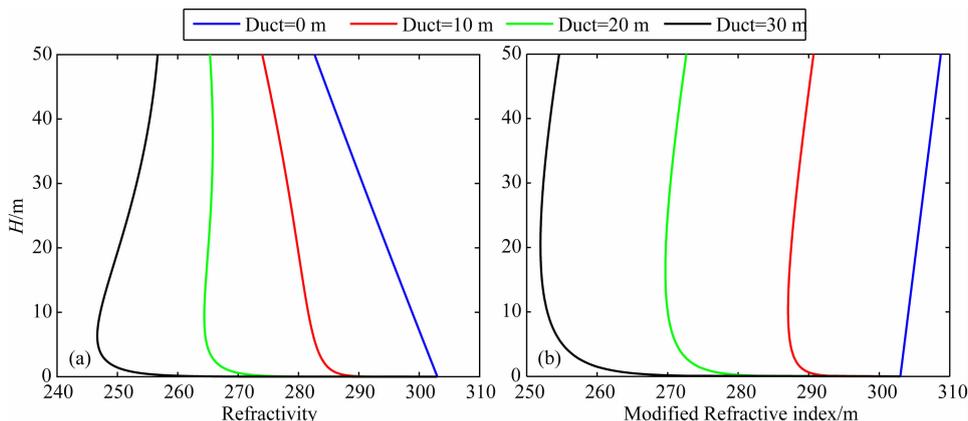


图 2 不同蒸发波导高度条件下的大气剖面

(a) 折射率剖面; (b) 折射指数剖面.

Fig. 2 Atmosphere with different evaporation duct height

(a) Refractivity profile; (b) Modified refractive index profile.

## 1.3 电磁射线追踪技术

电磁射线追踪方法是仿真分析电磁波在大气波导内传播轨迹和时延的常用方法(Balvedi and Walter, 2007, 2008; Li et al., 2010; Zhang et al., 2012),其基本原理是斯奈尔折射定律.本文仿真分析过程采用是 GREEPS 软件中的射线追踪功能模块. GREEPS 全称为 GNSS-R End-to-End Performance Simulator,是中国科学院国家空间科学中心为了评估 GNSS 反射信号特性而专门开发的一款仿真软件(Bai et al., 2016).本文利用 GREEPS 软件的射线追踪功能模块,首先仿真得到了不同蒸发波导条件下 GNSS 反射信号的有效散射区半径;然后,仿真得到了 GNSS 卫星-海面-GNSS 反射信号接收天线整个 GNSS 信号传播链路的传播时延.

利用 GREEPS 软件射线追踪模块,仿真计算

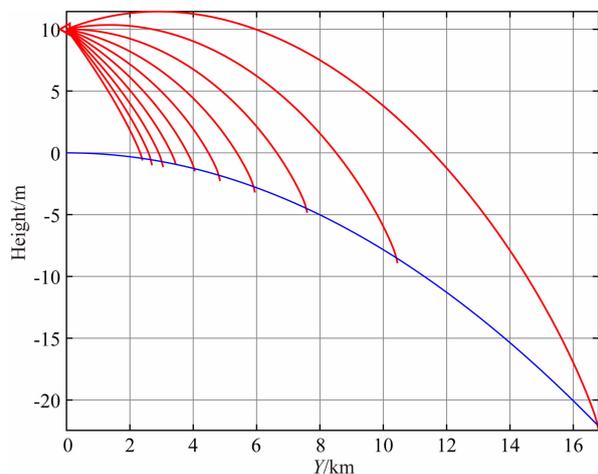


图 3 迭代仿真过程中的射线轨迹(蒸发波导高度为 30 m,接收机高度为 10 m)

Fig. 3 Ray tracing results during iterative simulation with evaporation duct height of 30 m and receiver height of 10 m

GNSS 反射信号有效散射区半径的主要步骤:(1)按照球面大气分层的方法,将大气折射率剖面,由下至上分成非等距均匀层,高度越低层距越小;(2)以 GNSS 反射信号接收机所在位置为电波信号发射源,通过改变射线发射角度,进行迭代仿真,如图 4 所示,最终得到与地面相切的射线轨迹;(3)利用步骤 2 的仿真结果,计算射线轨迹与地面的切点与接收机在海面投影的地球球面距离.根据射线的可逆性,可知该距离即为 GNSS 反射信号的有效散射半径.

利用 GREEPS 软件射线追踪模块,仿真计算 GNSS 卫星-海面散射点-GNSS 反射信号接收天线整个链路传播时延的主要步骤如下:(1)以有效散射区域内任一海面散射点为发射源,利用射线追踪法,仿真计算海面散射点到 GNSS 卫星传播时延;(2)以该海面散射点为发射源,利用射线追踪法,仿真计

算反射海面散射点到 GNSS 反射信号接收机的传播时延;(3)根据射线的可逆性,步骤 1 和步骤 2 计算得到的两个传播时延的和即为整个链路的传播时延.

## 2 仿真结果与分析

### 2.1 蒸发波导对有效散射区域半径的影响

当 GNSS 反射信号接收机高度的变化范围为 2~25 m,蒸发波导高度的变化范围为 0~35 m 时,仿真得到的有效散射区域半径如图 4a 所示,图 4b 为不同接收机天线高度得到的有效散射半径的平均值.为了检验有效散射区域半径仿真结果的可靠性,利用 0 波导高度(标准大气条件)时,电波信号的视线传播距离解析公式(4)的计算结果与仿真结果进行了对比,结果如图 5 所示.

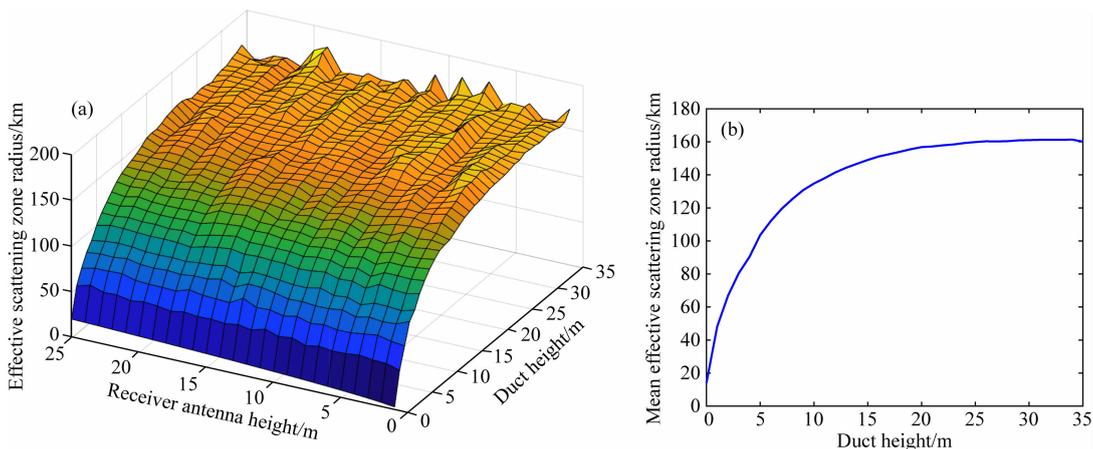


图 4 仿真得到的有效散射区域半径

(a) 不同接收高度和波导高度; (b) 不同接收机高度的平均.

Fig. 4 The simulated effective scattering zone radius

(a) With different receiver antenna heights and duct heights; (b) Averaged with different receiver antenna heights.

由图 5 可知, GREEPS 仿真软件得到的仿真结果与解析计算结果吻合的非常好,这证明了仿真方法的有效性.由图 4a 可知, GNSS 反射信号海面反射信号的有效散射区域半径即受蒸发波导高度的影响也受 GNSS 反射信号接收天线高度的影响,但是,与蒸发波导高度的影响相比,接收机天线高度的影响几乎可以忽略,这意味蒸发波导的存在与否,可以很容易地利用 GNSS 反射信号有效散射区域的大小进行判断.由图 4b 可知,蒸发波导对 GNSS 反射信号的有效散射区域半径的影响十分显著,当蒸发波导高度由 0 m 增加到 20 m 时,有效散射区域半径大小由 14 km 增加到了约 160 km;然而,当蒸发波导高度继续增加时,有效散射区域半径变化不大,趋于稳定.

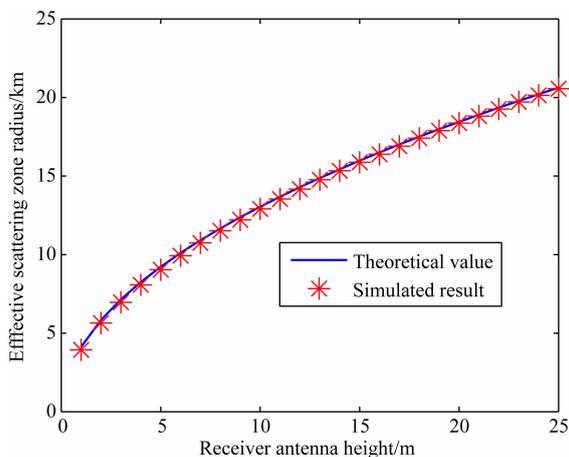


图 5 标准大气条件下,有效散射区域半径的仿真结果与计算结果的比较

Fig. 5 Comparison of simulation results and calculation results of effective scattering radius in standard atmosphere

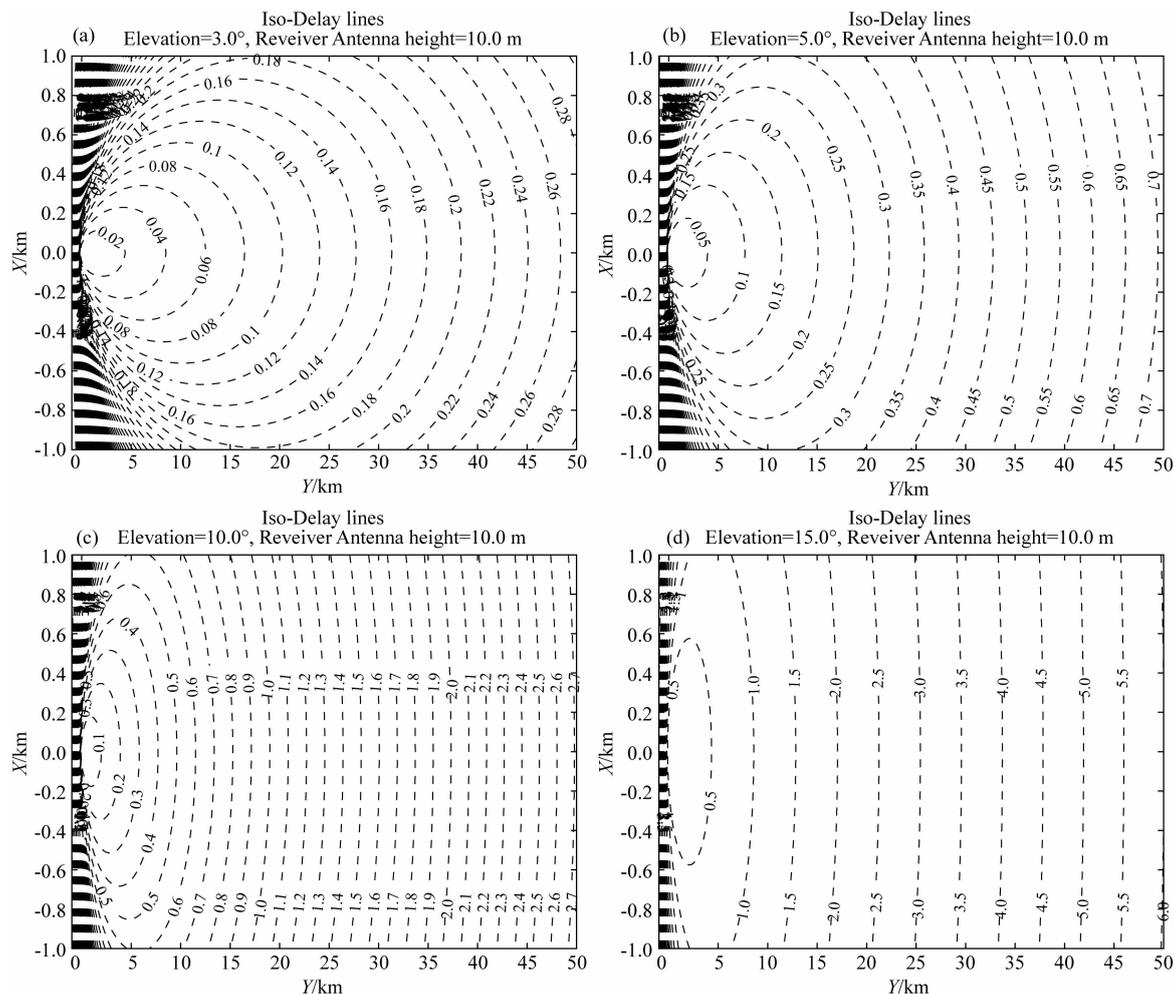
## 2.2 GNSS 标准反射信号与波导反射信号分离的可行性分析

GNSS 反射信号的时延-相关功率波形是低高度平台(如岸基、船载和机载)GNSS 反射信号反演地球物理参量的重要观测量(Zavorotny et al., 2014),它的物理本质是 GNSS 有效散射区域内的多路径反射信号与接收机本地码的相关功率波形的叠加.接收机输出的时延-相关功率波形的时延,通常定义为 GNSS 多径反射信号的传播时延与 GNSS 镜面反射信号传播时延的时延差,称为相对传播时延.为了能够得到 GNSS 波导反射信号的相关功率波形,同时又能排除 GNSS 直射信号和 GNSS 标准反射信号影响(Xia et al., 2016),本节讨论了在时延-相关功率波形上利用相对传播时延大小,将 GNSS 标准反射信号与波导反射信号分离的可行性.

### 2.2.1 真空条件下 GNSS 反射信号的相对传播时延

当 GNSS 反射信号接收机天线高度固定为 10 m,GNSS 卫星高度角分别为  $3^\circ$ 、 $5^\circ$ 、 $10^\circ$  和  $15^\circ$  时,在不考虑大气折射效应条件下,利用 GREEPS 软件仿真计算了 Y 轴方向  $0\sim 50$  km, X 轴方向  $-1\sim 1$  km 范围的海面区域内的散射点对应的 GNSS 卫星-海面散射点-GNSS 反射信号接收机之间的电磁链路的相对传播时延,结果如图 6 所示,图中的等时延值已经转换为了 GPS L1 C/A 码,如:图中的 0.16 表示的是 0.16 个 GPS L1 C/A.需要说明的是,图 6 中的坐标原点(0,0)为镜面反射点,而不是图 1 中定义的投影 O,事实上,正如 1.1 节所述,由于接收机高度比较低,二者之间的距离非常接近,下文图 7、图 8 的坐标原点与之相同,不再重复说明.

当 GNSS 反射信号接收机高度为 10 m 时,在



无折射效应条件下,将式(4)中的有效地球半径  $R_{\text{eff}}$  用真实地球半径  $R_0$  替换后,可计算得到此条件下的有效散射半径只有约 11 km. 这意味着,11 km 以外的海面反射信号由于地球曲率的影响,会被地面遮挡,但是为了后文的对比分析,在上述仿真分析过程中,假设 11 km 以外的海面散射点与 GNSS 发射接收天线之间仍可直线传播。

由图 6 可知,随着 GNSS 卫星高度角增大,GNSS 散射区域内同一反射点的反射信号的相对时延随之增大。

### 2.2.2 蒸发波导对 GNSS 反射信号相对传播时延的影响

当接收机高度仍固定为 10 m,将 GNSS 卫星的高度角固定为  $15^\circ$  时,利用 GREEPS 仿真软件计算了波导高度分别为 10 m、20 m 和 30 m 的蒸发波导对 Y 轴上  $-50 \sim 50$  km 范围内的海面散射点的相对传播时延的影响,结果如图 7 所示. 图中大于 0 km 的海面反射点位于 GNSS 卫星一侧,即图 1 中 Y 轴的正半轴上。

由图 7 可知,当考虑蒸发波导的折射效应后,有效散射区域内的同一散射点的 GNSS 反射信号的相对传播时延相对于无折射效应时有所增加,其增加量随着蒸发波导高度的增加而减小,这可由图 2b 的折射率剖线的数值变化趋势来解释;同一波导高度条件下,折射效应引起的时延增加量,随着反射点

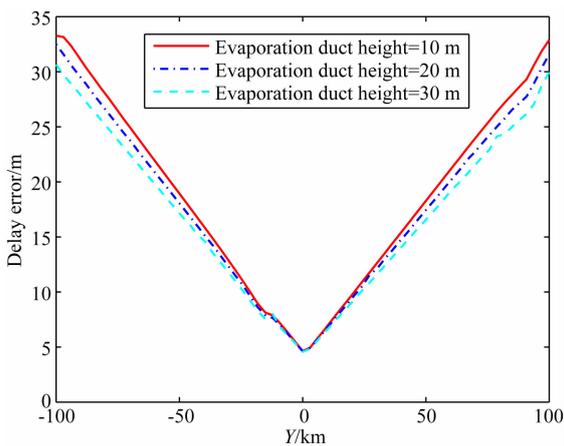


图 7 蒸发波导引起的散射区域内反射信号相对传播时延偏差

接收机高度为 10 m,GNSS 卫星高度角分别为  $15^\circ$ , 蒸发波导高度分别为 10 m、20 m 和 30 m.

Fig. 7 The simulated relative path delay difference due to evaporation duct's refractive effect

The receiver height is 10m and the GNSS satellite elevation angle is  $15^\circ$  and the evaporation duct heights are 10 m, 20 m and 30 m.

与镜面反射点之间的距离增大而近似呈直线增加,当距离为 160 km,可以估算 10 m、20 m 和 30 m 的蒸发波导的影响应不大于 45 m,倘若换算为 GPS L1 C/A 码,约等于 0.15 个码片,与图 6 中的数值相比,可知,对于高度角较大的 GNSS 卫星,如高度角为  $10^\circ$  和  $15^\circ$  的情形,蒸发波导折射效应对传播时延的影响几乎可以忽略。

当接收机高度仍设定为 10 m,而波导高度设定为 15 m 时,利用 GREEPS 软件仿真得到了 GNSS 卫星高度角分别为  $3^\circ$ 、 $5^\circ$ 、 $10^\circ$  和  $15^\circ$  时,蒸发波导对 Y 轴上  $-50 \sim 50$  km 范围内的海面散射点的相对传播时延的影响,如图 8 所示,图中距离大于 0 的海面反射点位于 GNSS 卫星一侧,即图 1 中 Y 轴的正半轴上。

由图 8 可知,当考虑折射效应后,GNSS 卫星高度角对同一蒸发波导折射效应的影响也只有几十米. 因此,综合图 6—图 8 可知,蒸发波导条件下,当 GNSS 卫星高度角足够大时,在有效散射区内,GNSS 反射信号的传播时延可以利用真空条件下的直射传播时延进行估算。

对于 10 m 高的 GNSS 反射信号接收天线,由式(4)可知,其有效散射半径约为 13 km,即其对应的 GNSS 标准反射信号的范围为 13 km,由图 6 可知,当 GNSS 卫星高度角分别为  $3^\circ$ 、 $5^\circ$ 、 $10^\circ$  和  $15^\circ$  时,

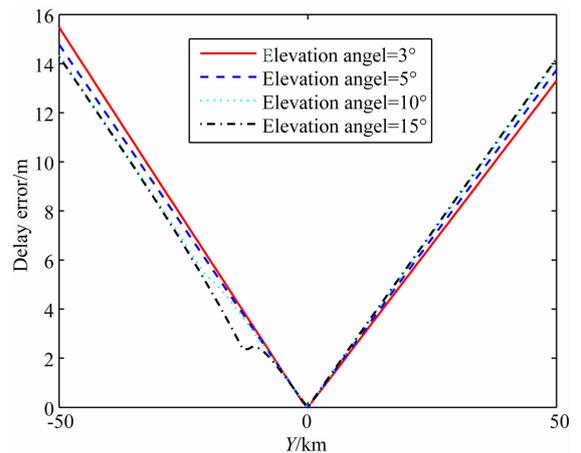


图 8 蒸发波导引起的散射区域内反射信号相对传播时延偏差

接收机高度为 10 m,蒸发波导高度为 15 m,GNSS 卫星高度角分别为 (a)  $3^\circ$ ; (b)  $5^\circ$ ; (c)  $10^\circ$ ; (d)  $15^\circ$ .

Fig. 8 The simulated relative path delay difference due to evaporation duct's refractive effect

The receiver height is 10m and the evaporation duct height is 15 m and the GNSS elevation angles are (a)  $3^\circ$ ; (b)  $5^\circ$ ; (c)  $10^\circ$ ; (d)  $15^\circ$ .

GNSS 标准反射信号的最大相对时延换算为 GPS L1 C/A 码后,分别为 0.08 码片、0.25 码片、0.9 码片和 1.8 码片,考虑 GNSS 模糊度函数( $\pm 1$  个码片)及直射信号的影响后,GNSS 波导反射信号的相对传播时延应分别大于 1.08 码片、1.25 码片、1.9 码片和 2.8 码片才可与 GNSS 标准反射信号分离开;由图 6 可知,当采用高度角为  $10^\circ$  和  $15^\circ$  的 GNSS 卫星时,可以将 GNSS 波导反射信号与 GNSS 标准反射信号分离开.因此,利用高度角较大的 GNSS 卫星,在时延-相关功率波形上,可以将 GNSS 标准反射信号与 GNSS 波导反射信号分离开.需要指出的是,尽管从理论上,利用高度角较大的 GNSS 卫星,在时延-相关功率波形上,可以将 GNSS 标准反射信号与 GNSS 波导反射信号分离开,但是在工程实践上还需要进一步考虑 GNSS 波导反射信号的功率大小及其相关影响因素,如海面风场、GNSS 卫星高度角等.因此,未来尚需从 GNSS 波导反射信号的功率大小的角度,进一步论证利用 GNSS 反射信号反演蒸发波导的可行性.

### 3 结论

在蒸发波导条件下,频段为  $1 \sim 2$  GHz 的 GNSS 卫星海面反射信号尽管不能被波导完全陷获,但由于其传播路径发生了很大的变化,使得 GNSS 反射信号有效散射区域增大.本文利用射线追踪的方法,研究了蒸发波导条件下,GNSS 海面反射信号的有效散射区域大小对蒸发波导高度的敏感性,并分析了在 GNSS 海面反射信号的时延-相关功率波形上将有效散射区域内的 GNSS 标准反射信号与 GNSS 波导反射信号分离开的可行性.研究表明,随着蒸发波导高度的增大,GNSS 海面反射信号的有效散射区域迅速增大,并在蒸发波导高度达到约 20 m 时,趋近于 160 km 这一稳定值;当 GNSS 卫星高度角较大时,蒸发波导的折射效应对 GNSS 反射信号的相对传播时延的影响只有几十米,因此,可以利用真空条件下的 GNSS 反射信号相对传播时延估算有效散射区内 GNSS 反射信号的相对传播时延,当 GNSS 卫星高度角足够大时,可以利用相对传播时延的大小在 GNSS 海面反射信号的时延-相关功率波形上将 GNSS 标准反射信号和 GNSS 波导反射信号分离开.由于并未指定 GNSS 反射信号接收天线的具体参数,本文在分析 GNSS 标准反射信号与波导反射信号的分离问题时,忽略

了反射信号相关功率及噪声信号的影响.未来,将利用天线的真实参数,估算反射信号的功率及噪声的功率,并进一步分析天线参数对 GNSS 标准反射信号和 GNSS 波导反射信号分离的影响.

**致谢** 感谢中国科学院南海海洋研究所王东晓研究员、何云开副研究员在大气波导研究现状调研过程中所给予的大力支持和帮助.

### References

- Bai W H, Xia J M, Zhao D Y, et al. 2016. GREEPS: an GNSS-R end-to-end performance simulator. // IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). Beijing, China: IEEE, 4831-4834.
- Balvedi G C, Walter F. 2007. Analysis of GPS signal propagation in tropospheric ducts using numerical methods. // 11th URSI Commission F Open Symposium on Radio Wave Propagation and Remote Sensing Proceedings. Rio de Janeiro, RJ, Brazil.
- Balvedi G C, Walter F. 2008. GPS Signal Propagation in Tropospheric Ducts. Finland: URSI Convention on Radio Science.
- Bi Y M, Mao J T, Liu X Y, et al. 2006. Remote sensing of the amount of water vapor along the slant path using the ground-based GPS. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 49(2): 335-342.
- Dai F S. 2002. Atmospheric Duct and Its Military Application (in Chinese). Beijing: Chinese People's Liberation Army Publishing House.
- Foti G, Gommenginger C, Jales P, et al. 2015. Spaceborne GNSS reflectometry for ocean winds: First results from the UK TechDemoSat-1 mission. *Geophys. Res. Lett.*, 42(13): 5435-5441.
- Freehafer J E. 1988. Tropospheric refraction. // Kerr D E ed. Propagation of Short Radio Wave. Los Altos Hills: Peninsula Publishing.
- Kang S F, Zhang Y S, Wang H G. 2014. Atmospheric Duct in Troposphere Environment (in Chinese). Beijing: Science Press.
- Karimian A, Yardim C, Gerstoft P, et al. 2011. Refractivity estimation from sea clutter: An invited review. *Radio Science*, 46(6): RS6013, doi: 10.1029/2011RS004818.
- Krolik J L, Tabrikian J. 1997. Tropospheric refractivity estimation using radar clutter from the sea surface. // Proceedings of the 1997 Battle space Atmospherics Conference. San Diego, 635-642.
- Li G C, Gao L X, Liang Y. 2010. Simulation modelling the GPS signal propagation in the tropospheric ducts. // Proceedings of the 9th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory. Guangzhou, China: IEEE, 592-595.
- Lowry A R, Rocken C, Sokolovskiy S V, et al. 2002. Vertical profiling of atmospheric refractivity from ground-based GPS. *Radio Science*, 37(3): 13-1-13-19.
- Rogers L T, Hattan C P, Stapleton J K. 2000. Estimating evaporation duct heights from radar sea echo. *Radio Science*, 35(4): 955-966.
- Wang B, Wu Z S, Zhao Z W, et al. 2011. A passive technique to

- monitor evaporation duct height using coastal GNSS-R. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 8(4): 587-591.
- Wang H G, Wu Z S, Kang S F, et al. 2013a. Monitoring the marine atmospheric refractivity profiles by ground-based GPS occultation. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 10(4): 962-965.
- Wang H G, Wu Z S, Lin L K, et al. 2013b. Retrieving evaporation duct heights from power of ground-based GPS occultation signal. *Progress in Electromagnetics Research M*, 30: 183-194.
- Wu Y Y, Hong Z J, Guo P, et al. 2010. Simulation of atmospheric refractive profile retrieving from low-elevation ground-based GPS observation. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 53(5): 1085-1090, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2010.05.008.
- Xia J M, Bai W H, Zhao D Y, et al. 2016. First shipborne GNSS-R campaign for receiving low elevation angle sea surface reflected signals. // *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*. Beijing, China; IEEE, 5613-5616.
- Yan H J, Fu Y, Hong Z J. 2006. *Introduction to Modern Atmospheric Refraction* (in Chinese). Shanghai: Shanghai Science and Technology Education Press.
- Yardim C. 2007. *Statistical estimation and tracking of refractivity from radar clutter*[Ph. D. thesis]. California: University of California.
- Yardim C, Gerstoft P, Hodgkiss W S. 2009. Sensitivity analysis and performance estimation of refractivity from clutter techniques. *Radio Science*, 44: RS1008, doi: 10.1029/2008RS003897.
- Zavorotny Z U, Gleason S, Cardellach E, et al. 2014. Tutorial on remote sensing using GNSS Bistatic radar of opportunity. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 2(4): 8-45.
- Zavorotny Z U, Voronovich A G, Katzberg S J, et al. 2000. Extraction of sea state and wind speed from reflected GPS signals: modeling and aircraft measurements. // *IEEE 2000 International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Taking the Pulse of the Planet; The Role of Remote Sensing in Managing the Environment*. Honolulu, USA; IEEE, 1507-1509.
- Zhang J P, Wu Z S, Wang B, et al. 2012. Modeling low elevation GPS signal propagation in maritime atmospheric ducts. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 80: 12-20.
- Zhang Y. 2007. *Electromagnetic Waves Propagation in Space* (in Chinese). Xi'an: Xi'an University of Electronic Science and Technology Press.
- Zhang Y G, Jiao L, Zhang X, et al. 2014. *Marine Atmospheric Duct's Effect and Application for Sound, Light and Electromagnetic Waves* (in Chinese). Beijing: Publishing House of Electronic Industry.
- Zhou P, Zhang H Y, He Y, et al. 2014. Application of atmospheric duct in maritime communications. *Telecommunication Engineering* (in Chinese), 54(8): 1134-1139.

### 附中文参考文献

- 毕研盟, 毛节奏, 刘晓阳等. 2006. 应用地基 GPS 遥感倾斜路径方向大气水汽总量. *地球物理学报*, 49(2): 335-342.
- 戴福山. 2002. *大气波导及其军事应用*. 北京: 解放军出版社.
- 康士峰, 张玉生, 王红光. 2014. *对流层大气波导*. 北京: 科学出版社.
- 伍亦亦, 洪振杰, 郭鹏等. 2010. 地基 GPS 低高度角观测反演大气折射率廓线的模拟仿真. *地球物理学报*, 53(5): 1085-1090, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2010.05.008.
- 严豪健, 符养, 洪振杰. 2006. *现代大气折射引论*. 上海: 上海科技教育出版社.
- 张瑜. 2007. *电磁波空间传播*. 西安: 西安电子科技大学出版社.
- 张永刚, 焦林, 张旭等. 2014. *海洋声光电波导效应及应用*. 北京: 电子工业出版社.
- 周朋, 张海勇, 贺寅等. 2014. 大气波导在海上通信中的应用. *电讯技术*, 54(8): 1134-1139.

(本文编辑 张正峰)