热带地区GPS掩星观测传播路径上影响参数变化与水汽折射率局部强梯度的关系

杨胜朋, 邹晓蕾*

南京信息工程大学资料同化研究与应用联合中心, 南京 210044

* 通讯作者, E-mail: xzou@nuist.edu.cn

收稿日期: 2020-11-25; 收修改稿日期: 2021-05-10; 接受日期: 2021-05-21; 网络版发表日期: 2021-08-13

国家重点研发计划项目(编号: 2018YFC1507004)和国家自然科学基金项目(批准号: 41875032)资助

摘要 热带对流层低层的大气折射率场比其他地区受水汽的影响更大. 在这项研究中, 文章首先将2009年气象、电离层和气候星座观测系统(COSMIC)的无线电掩星数据与CloudSat云剖面雷达资料进行了匹配. 然后, 基于模式模拟, 又研究了掩星射线路径在何处以及为什么与其上下的射线路径相交. 利用欧洲中期天气预报中心ERA5再分析作为射线追踪观测算子的输入, 在热带对流层低层模拟得到的掩星影响参数沿着某些射线路径恒定. 为简洁起见, 文章把某射线路径与其上下射线相交这一现象称为一次掩星多路径模拟. 在二维掩星平面上, 把模式模拟得到的射线轨迹叠加在大气折射率垂直和水平梯度分布场上, 可以生动地说明掩星多径模拟事件发生折射率梯度的关系. 统计结果表明, 造成掩星多路径现象的主要原因是在距近地面点水平距离300km范围内大气水汽折射率有较强的局部垂直梯度. 掩星多路径现象大多在5km影响高度下发生, 最大发生频率在3.4km影响高度附近(约1.8km几何高度). 不管是有云还是晴空条件, 多路径现象和水汽折射率局部强垂直梯度都有可能存在, 但在层积云环境下最为常见.

关键词 全球导航卫星系统掩星观测, 掩星多路径, 热带对流层低层

1 引言

在球对称大气中, 沿着同一根掩星射线传播路径的影响参数是恒定的. 但是, 如果大气折射率场不是球对称的, 影响参数在同一根传播路径上就不是常数. 由于水汽具有小尺度特征, 热带对流层低层的折射率场具有很强的局地梯度, 使得大气的分布并不总是满足球对称假定. 因此, 热带对流层低层中, 影响参数沿

射线传播路径将会发生变化. 最新发射的气象、电离层和气候星座观测系统(COSMIC-2)已经进行优化升级, 可在热带地区提供比以往更多的全球导航卫星定位系统(GPS)掩星观测资料. 热带对流层低层经常会出现大气折射率局地强梯度, 使得GPS发射的无线电信号在某一个传播路径与其上方或下方的路径相交, 这种现象被称为掩星多路径. 弯角资料同化要求给定一个影响参数, 弯角函数有一个唯一的值和它对应,

中文引用格式: 杨胜朋, 邹晓蕾. 2021. 热带地区GPS掩星观测传播路径上影响参数变化与水汽折射率局部强梯度的关系. 中国科学: 地球科学, 51(11): 1978–1989, doi: [10.1360/N072020-0392](https://doi.org/10.1360/N072020-0392)

英文引用格式: Yang S, Zou X. 2021. Relationships of along-the-track local variations of GPS RO impact parameter to strong local vertical gradient of wet refractivity in the tropics. Science China Earth Sciences, 64(11): 2015–2026, <https://doi.org/10.1007/s11430-020-9795-2>

即弯角是影响参数的单值函数. 而当弯角模拟中出现多路径现象时, 模式模拟的弯角是影响参数的多值函数. 因此, 在进行GPS掩星资料同化前, 必须先识别和剔除多路径掩星资料.

在球对称假设下, 弯角是影响参数的单值函数, 利用波动光学方法可以反演掩星的弯角. 对于掩星观测资料而言, “多路径”表示两条或者多条不同影响参数的无线电射线同时到达掩星接收器. 波动光学方法已经解决了观测资料反演过程中的“多路径”问题(Sokolovskiy, 2001). 其得到的弯角观测资料对应一个局部谱宽(LSW)来反应随机观测误差大小(Liu等, 2018; 邹晓蕾和刘辉, 2020). 多路径会增大弯角的波谱宽度, 从而影响LSW值的大小. 换句话说, LSW值越大, 多路径现象越严重.

本文研究的重点是掩星弯角模拟. 掩星观测的弯角其实是GPS卫星发射的无线电信号从GPS卫星传播到达低轨卫星(LEO)的总弯角. 由于大气折射率不一定是球对称的, 弯角的模拟需要有准确的非局地射线追踪观测算子. 影响参数沿传播路径的变化量能够反应模拟多路径的严重程度. 在本研究中, 采用Zou等(1999)提出的二维掩星平面中的GPS无线电信号追踪观测算子, 将欧洲中期天气预报中心(ECMWF)ERA5再分析资料作为输入场, 得到弯角及影响参数沿着射线传播路径的变化, 同时得到弯角近随地面点影响参数的垂直廓线. 该观测算子已经被应用到美国国家环境预测中心三维变分同化系统中, 实现了GPS/MET弯角资料同化(Zou等, 2000). Healy(2001)研究发现, 对流层中折射率水平梯度亦会引起较大的掩星弯角和影响参数的模拟误差.

本研究中采用的是2009年COSMIC掩星资料, 以及搭载在CloudSat上的94GHz云剖面雷达探测的大气中的云雨信息. 通过将COSMIC掩星资料与CloudSat掩星资料进行时空匹配, 可以把COSMIC资料按照晴空和不同云类进行分类. 本文将探讨掩星多路径是否有云和晴空条件下都有可能发生? 为了避免超折射的影响, 首先剔除折射率垂直梯度小于 $-157\text{N-unit km}^{-1}$ 的COSMIC资料(Sokolovskiy, 2003). 掩星多路径的模拟与输入场的垂直分辨率是密切相关的. 本研究中所用的ECMWF ERA5的垂直分辨率比COSMIC掩星反演过程中使用到的ECMWF分析场的高很多(Hoffmann等, 2018), 因此, 能更好地描述大气折射率

的局地强垂直梯度. 我们首先使用个例来说明当大气折射率局地强梯度出现时, 射线传播路径是如何相交的. 在此基础上, 进一步探讨掩星多路径的发生与折射率、折射率垂直梯度、折射率水平梯度、干折射率和水汽折射率的对应关系. 最后, 统计分析传播路径上影响参数的变化与总折射率与水汽折射率垂直梯度的相关性.

2 数据和模式

2.1 数据

本研究使用了2009年COSMIC掩星弯角资料(atmPrf产品)、CloudSat云产品以及ECMWF ERA5再分析资料. COSMIC掩星计划由6颗低轨卫星组成, 每天可以探测约2000根大气廓线(Anthes等, 2008). 本研究中所使用的掩星弯角资料来源于美国COSMIC数据分析和档案中心(CDAAC). COSMIC掩星弯角观测廓线是影响高度的函数. Sokolovskiy等(2009a, 2009b)和Schreiner等(2010)提供了CDAAC掩星数据处理的详细说明.

我们首先对与CloudSat匹配后得到的COSMIC廓线进行了一个简单的质量控制, 剔除了观测弯角值大于 0.2rad 或小于 0 , 或折射率大于 500N-unit 或小于 0N-unit 的COSMIC掩星观测廓线. CloudSat云产品将云分成以下7类: 层积云(Sc)、高层云(As)、雨云层(Ns)、卷云(Ci)、积云(Cu)、高积云(Ac)和深对流云(Dc)(Stephens等, 2002; Tanelli等, 2008). 将COSMIC掩星与CloudSat云产品进行时空匹配的匹配标准如下: COSMIC和CloudSat探测时间间隔小于 1h , COSMIC掩星廓线的近地点与CloudSat观测点之间的距离小于 100km . 匹配后的COSMIC掩星资料按照云的类型进行分类. 值得一提的是, 这样匹配的有云掩星资料能够保证近地点是有云的. 因此, 把晴空的掩星资料误判为有云的可能性很小. 但是, 对于哪些在近地点是晴空, 远离近地点是有云的资料, 有可能被归类为晴空资料. 在晴空和有云条件下, 2009年热带地区COSMIC RO廓线分别是1017和1689. 图1给出了匹配后得到的掩星廓线的空间分布图, 有云和晴空这两类天气条件下的掩星廓线几乎均匀地分布在全球范围内, 所得资料量足以支撑本项研究.

ERA5是ECMWF最新一代再分析资料集. 相比于

图1 2009年30°S~30°N与CloudSat匹配后的COSMIC掩星资料的空间分布

不同的颜色代表下面几种不同天空状态: 积云(Cu)、高积云(Ac)、雨层云(Ns)、卷云(Ci)、层积云(Sc)、深对流云(Dc)、高层云(As)、晴空(Clear-sky)。与CloudSat匹配后得到的COSMIC廓线共2706根, 其中晴空廓线1017根, 有云廓线有1689根

ECMWF以前的再分析资料, ERA5具有更高的空间分辨率(水平分辨率为31km, 垂直方向从地表到0.01hPa共有137层)和更高的时间分辨率(逐小时)。Hoffmann等(2018)指出ERA5再分析资料可以更好地刻画对流上升气流和大气中尺度和天气尺度特征。就本研究而言, 相比粗分辨率再分析资料, ERA5可以更好地表示大气折射率的垂直和水平梯度。利用ERA5再分析资料的温度、水汽和气压场资料, 根据以下公式可以计算中性大气中的大气折射率(N):

$$N = (n - 1) \times 10^6 = 77.6 \frac{P}{T} + 3.73 \times 10^5 \frac{P_w}{T^2}, \quad (1)$$

上式中的 n 表示折射指数, P 、 T 、和 P_w 分别表示气压、温度和水汽压, 它们对应的单位是hPa、K和hPa。等式右边的两项分别表示大气折射率的干项和湿项。一般来说, 干折射率对总折射率的贡献超过90%, 水汽折射率的贡献小于10%(Yang和Zou, 2012)。在ERA5模式层顶和120km之间, 我们利用空间研究委员会国际参考大气模式(CIRA)提供的温度和气压资料来计算大气折射率。当120km以上, 假定大气折射指数是均一的, 大气折射率设为0。

利用ERA5再分析资料和CIRA资料计算得到的大气折射率作为追踪掩星信号传播路径的观测算子的输

入场, 可以模拟GPS卫星发射的无线电信号到达低轨卫星的传播路径。我们把掩星观测的近地点作为观测算子积分的起始位置, 然后分别向GPS和LEO两个方向积分。本研究中模拟射线的垂直分辨率为100m。当模拟的某一个射线路径上的影响参数与其上方或下方的射线的影影响参数相交, 掩星多路径模拟发生。

2.2 模式

本研究中使用的二维射线追踪观测算子是Zou等(1999)年开发并测试成功的。它要完成对射线轨迹方程的数值求解:

$$\frac{d^2 \mathbf{r}}{d\tau^2} = n \nabla n, \quad (2)$$

其中 $\mathbf{r}$ 是笛卡儿坐标系 $[\mathbf{r} = (x_1, x_2, x_3)]$ 中的三维空间矢量, τ 是与射线长度(s)和大气折射指数(n)有关的一个参数, 即 $d\tau = \frac{ds}{n}$ 。方程(2)是一个二阶常微分方程。很显然, GPS RO信号传播路径是由大气折射指数(n)及其三维空间梯度(∇n)的乘积所决定的。

GPS掩星射线上某个点的位置由地球局地曲率中心到该点的半径矢量 $\mathbf{r}$ 表示。GPS和LEO卫星所在位置的半径矢量分别用 $\mathbf{r}_G$ 和 $\mathbf{r}_L$ 表示。影响参数定义为射线到地球中心的距离乘以折射指数, 即 $\alpha = rn(r)\sin\phi$ 。 ϕ 表示射线上某一点的切线方向($\mathbf{t}$)和该点的位置半径矢量 $\mathbf{r}$ 之间的夹角。近地面点 $\mathbf{r}_0$ 是射线上到地球中心最短距离的那个点。在近地点, $\phi=90^\circ$ 。因此, 近地点的影响参数 $\alpha_0=r_0n(r_0)$ 。如果大气是球对称的, 沿每条射线路径的影响参数是恒定的。GPS掩星射线发生在连接GPS卫星位置、LEO卫星位置和地球局地曲率中心的二维平面上。地球曲率中心也是坐标系的原点, 这个二维平面被称作掩星平面。影响高度定义为影响参数减去局地地球曲率半径。

除了弯角和大气折射率, COSMIC掩星观测数据集中还提供了近地点的矢量位置和该处的无线电信号传播路径的切线方向。从近地点沿着切向方向对射线方程(2)进行积分来, 得到ERA5的模拟射线。在每一个积分步, 都计算影响参数。当模拟的射线轨迹超过大气层顶时, 积分结束, 弯角可以根据近地点的影响参数进行计算。当掩星射线的近地点在地面附近时, 模式模拟的射线传播路径在离近地点大约1200km左右到达模

式层顶; 掩星射线的近地点在15km高度处, 对应射线传播路径在离近地点大约1100km左右到达模式层顶. 模式模拟的弯角定义为无线电传播路径在GPS卫星处的切线矢量($\mathbf{t}_G$)和在低轨卫星处的切线矢量($\mathbf{t}_L$)的夹角, 即 $\alpha = \angle(\mathbf{t}_G, \mathbf{t}_L)$. 弯角可以作为近地点影响参数(a_0)、GPS卫星一侧的大气层顶影响参数(a_G)、或者LEO一侧大气层顶影响参数(a_L)的函数. 射线模拟的垂直分辨率与COSMIC 掩星观测资料的垂直分辨率(100m)相同. 因此, 对应每一根与CloudSat匹配的COSMIC掩星观测廓线, 有三个弯角模拟廓线, 分别是 a_0 、 a_G 、和 a_L 的函数.

3 影响参数沿着射线传播路径的变化

我们首先利用二维射线追踪观测算子模拟COSMIC掩星射线路径和弯角, 来描述掩星多路径概念, 分析掩星多路径的发生与二维掩星平面内折射率及其梯度分布的关系, 比较有、无掩星多路径发生时大气折射率及其垂直和水平梯度分布的差异. 为此, 我们选

取4个COSMIC掩星廓线(表1), 一个发生在晴空条件下, 另外三个发生在有云条件下. 晴空掩星廓线的观测点在43.6°E, 63.79°S, 时间是2009年1月23日世界标准时间12: 30. 为方便起见, 我们将这晴空掩星廓线称为RO1. 另外一个发生在层积云中的掩星廓线称为RO2, 它的观测位置在82.7°E, 16.5°S, 时间是2009年7月16日世界标准时间19: 16.

图2给出了根据ERA5再分析资料由射线追踪观测算子模拟得到的RO1和RO2弯角随影响高度的垂直变化. 弯角可以看作是近地面点影响参数的函数[$\alpha^{2D}(a_0)$], 也可以看作是GPS或LEO卫星处的影响参数的函数关系 $\alpha^{2D}(a_G)$ 或[$\alpha^{2D}(a_L)$]. 换句话说, 如果弯角随三个不同影响参数绘制的廓线不重合, 反应非球面对称大气形引起了影响参数随射线路径有变化. 三个弯角的廓线 $\alpha^{2D}(a_0)$ 、 $\alpha^{2D}(a_L)$ 和 $\alpha^{2D}(a_G)$ 对RO1来说几乎是一样的. 但是, 对RO2来说, 三根廓线有明显差异, 特别是当影响高度小于等于4.1km时, $\alpha^{2D}(a_L)$ 与 $\alpha^{2D}(a_G)$ 两根廓线线相比于 $\alpha^{2D}(a_0)$ 有明显的上移和下移现象. 三根廓线的不一致可能是由于沿着近地面点在影响高度

表 1 选区的4根GPS掩星廓线

编号	经纬度	日期和时间	天空状况
RO1	43.6°E, 63.79°S	2009-01-23世界时12: 30	晴空
RO2	82.7°E, 16.5°S	2009-07-16世界时19: 16	层积云
RO3	169.8°W, 22.90°N	2009-10-20世界时14: 09	积云
RO4	9.4°W, 24.4°S	2009-10-18世界时03: 00	层积云

图 2 RO1(a)和RO2(b)模拟弯角随影响高度的垂直变化
黑色、红色和蓝色分别代表弯角是 a_0 、 a_G 、和 a_L 的函数

4.1km以下的射线路径, 影响参数发生较大变化而引起的. 为了证明这一点, 图3给出了 h_G 、 h_L 、 h_G-h_0 、 h_L-h_0 随近地点影响高度的变化. 对RO1来说, $|h_G-h_0|$

和 $|h_L-h_0|$ 均小于10m. 而对于RO2来说, $|h_G-h_0|$ 和 $|h_L-h_0|$ 分别是100和280m.

图4给出了利用ECMWF ERA5作为输入场模拟得

图3 GPS(蓝色实线, h_G)和LEO(蓝色虚线, h_G)卫星处的影响高度(底部x轴)随近地点影响高度的变化(y轴, h_0)
黑色实线和虚线分别表示 h_G-h_0 和 h_L-h_0 随 h_0 的变化. (a)表示RO1, (b)表示RO2

图4 RO1离近地点±480-km水平距离内的模拟射线路径、弯角、折射率和折射率梯度的空间分布

(a) 模拟射线路径(黑色曲线), 二维掩星平面相对于北方的方位角(红色曲线)和折射率(N-units, 彩色填充)随几何高度的变化; (b) 模拟射线路径(黑色曲线), 弯角 $\alpha^{2D}(a_L)$ (红色曲线)和折射率的垂直梯度(N-units km^{-1} , 彩色填充)随影响高度的变化; (c) 大气折射率的水平梯度(N-units $(100\text{km})^{-1}$, 彩色填充). GPS和LEO卫星位置分别位于x轴的左边和右边方向

到的RO1无线电信号传播路径. 在几何坐标中(图4a), 射线传播路径在近地面点两侧向上弯曲, 不同高度的射线均匀地分布在二维掩星平面中. 在距近地面点水平距离约480km处, 射线路径比近地点高度高出约13km. 大气折射率随几何高度的增加而减小, 折射率等值线在二维掩星面上几乎是水平的. 沿着近地面点影响高度为0.6km的射线, 射线路径上的大气折射率从大于275N-units降到25N-units(图4a). RO1射线路径分布均匀, 由于折射率垂直梯度均匀(图4b)和折射率水平梯度较弱(图4c), 影响参数沿着同一个射线传播路径几乎是恒定的. 这说明在RO1观测点附近大气折射率呈现球对称分布.

RO2是一个掩星多路径模拟例子(图5). RO2与

RO1情况相反, 影响高度在3.5~4km的射线路径在2D掩星平面中分布不均匀(图5a). 我们注意到有四条射线路径(图5a中的青色和蓝色实线和虚线曲线)与多条射线路径相交, 这是描述掩星多路径模拟现象的一个典型例子. 在大约4km影响高度的近地面点附近, 大气折射率有非常大的垂直梯度(图5b), 在近地面点的切线方向上, 尤其是LEO一侧, 也有一个弱的折射率水平梯度带, 模拟得到的影响参数沿射线路径有显著变化(图5c).

本文还给出了另外两个掩星多路径模拟的廓线, 简称RO3(积云)和RO4(层积云). RO3掩星观测位置在169.8°W, 22.9°N, 时间是2009年10月20日世界标准时间14: 09. RO4掩星观测位置在9.4°W, 24.4°S, 时间是

图5 RO2离近地面点 ± 480 -km水平距离内的模拟射线路径、弯角、折射率和折射率梯度的空间分布图

(a) 模拟射线路径(黑色曲线), 二维掩星平面相对于北方的方位角(红色曲线)和折射率(N-units, 彩色填充)随几何高度的变化; (b) 模拟射线路径(黑色曲线), 弯角 $\alpha^{2D}(a_t)$ (红色曲线)和折射率的垂直梯度(N-units km^{-1} , 彩色填充)随影响高度的变化; (c) 大气折射率的水平梯度(N-units $(100\text{km})^{-1}$, 彩色填充). GPS和LEO卫星位置分别位于x轴的左边和右边方向. RO2射线模拟路径由黑色实线、黑色虚线、青色实线、青色虚线和蓝色实线表示, 其中青色和蓝色是为了更清楚地表示掩星多路径的出现

2009年10月18日世界标准时间03:00. 从公式(1)可知, 大气总折射率是干空气项和水汽项的总和. 由于求梯度是一个线性算子, 因此, 大气总折射率的梯度是干空气项和水汽项的梯度之和. 这使得我们可以单独诊断干空气项、水汽项对产生掩星多路径的贡献. 具体来说, 我们将大气总折射率的垂直梯度分解为水汽折射率和干空气折射率的垂直梯度. 图6给出了由射线追踪观测算子模拟得到的RO1、RO2、RO3射线传播路径和水汽折射率垂直梯度在二维掩星平面上的分布. 图7与图6相同, 只是将图6中的水汽折射率的垂直梯度替换成干空气折射率垂直梯度. 从图5~7中可以看出, 多个传播路径相交出现在水汽折射率垂直梯度有局部大值区附近, 这与射线追踪轨迹方程(2)右侧的 $n \nabla n$ 项有关. 水汽折射率的垂直梯度(图6)是总折射率的垂直梯度的主要贡献项, 它对掩星多路径的发生起着重要的作用. 干空气折射率的垂直梯度(图7)比水汽折射率的垂直梯度小两个量级, 并且分布均匀, 即使

有局部异常, 其强度也是非常弱的.

4 统计结果

图8给出了 $30^{\circ}\text{S} \sim 30^{\circ}\text{N}$ 范围内根据ERA5再分析资料、由射线追踪观测算子模拟得到的影响参数沿着射线路径变化的统计结果. 影响参数的变化量定义为影响参数沿着射线路径在相隔60km的相邻两点上的值之差(距离LEO侧较近的点减去靠近GPS点的值). 由图可见, 影响参数在近地面点附近都会发生较大变化. 一般来说, 对于对流层低层的射线路径, 影响参数在离近地面点 $\pm 250\text{km}$ 范围内变化较大. 沿着影响高度在3.4km的射线路径, 影响参数在离近地面点 $\pm 120\text{km}$ 范围内变化较大. 在对流层下层影响高度3.1km的射线路径上影响参数变化最大.

接下来比较了大气总折射率、水汽折射率和干空气折射率的垂直梯度. 图9展示出了大气总折射率、水

图6 RO2(a)、RO3(b)和RO4(c)的射线模拟路径和水汽折射率垂直梯度

射线模拟路径由黑色实线、黑色虚线、青色实线、青色虚线、蓝色实线和虚线表示, 湿垂直梯度由彩色填充表示

图 7 RO2(a)、RO3(b)和RO4(c)模拟的射线路径和干折射率垂直梯度

射线路路由黑色实线、黑色虚线、青色实线、青色虚线、蓝色实线和虚线表示, 干垂直梯度由彩色填充表示

图 8 30°S~30°N范围内影响参数变化的平均值和标准差
数据量用黑色虚线表示(顶部x轴)

汽折射率和干空气折射率垂直梯度散点图. 大气总折射率的垂直梯度和水汽折射率的垂直梯度有显著的线性相关. 影响参数的变化越大, 这种相关性越明显(由图9中的空心圈颜色表示). 干空气折射率的垂直梯度(图9中的灰色空心圈)比大气总折射率和水汽折射率的垂直梯度都小得多. 这说明, 大气总折射率垂直梯度局部最大值主要是由热带地区对流层低层的水汽局地变化引起的. 图3~7中所示RO2、RO3和RO4三个例子也说明了这一点.

为了寻找离开近地面点的射线路径上影响参数的变化与大气折射率垂直梯度的相互关系, 图10给出了30°S~30°N范围内, 近地面点的影响高度在3.4km的射线路径上, 大气总折射率(N)、水汽折射率(N_{wet})和干空气折射率(N_{dry})垂直梯度的最大值与 $\left\{ \left| a_{r_0+360\text{km}} - a_{r_0} \right|, \left| a_{r_0-360\text{km}} - a_{r_0} \right| \right\}$ 最大值之间的散点图. 为方便起见, 我

图9 水汽折射率(彩色空心圈)和干空气折射率(灰色空心圈)垂直梯度与大气总折射率垂直梯度的散点图
影响高度为3.4km, 影响参数变化大小用不同的颜色表示

们在图10中用与图9相同的颜色和符号来表示RO1(绿色实心)、RO2(棕色点实心)、RO3(红色实心)和RO4(棕色空心)这四个个例。图10还给出了影响参数在25km范围内的平均值(带有空心圆的实曲线)和一个标准差(垂直直线)。影响参数变化随着大气总折射率(图10a)和水汽折射率(图10b)的垂直梯度增加而增加, 与干空气折射率的垂直梯度之间没有相关关系。晴空个例RO1(绿点)的垂直梯度位于大气总折射率和水汽折射率垂直梯度的平均曲线上方。实际上, 晴空RO1和有云RO3的干空气折射率的垂直梯度几乎相同, 接近平均值。

图11给出了大气总折射率、水汽折射率和干空气折射率垂直梯度在沿着射线路径的变化图。RO1、RO2、RO3和RO4在近地面点射线路径分别用绿色曲线, 棕色曲线, 红色曲线和棕色虚线表示。值得注意的是大气折射率的最大垂直梯度一般都出现在近地面点

图10 近地面点影响高度在3.4km的模拟射线路径上(a)大气总折射率(N)、(b)水汽折射率(N_{wet})和(c)干空气折射率(N_{dry})垂直梯度最大值和 $\left\{ \left| a_{r_0+360km} - a_{r_0} \right|, \left| a_{r_0-360km} - a_{r_0} \right| \right\}$ 最大值的散点图

影响参数在25km间隔内计算的平均值和标准差用黑色虚线和黑色垂直直线表示。RO1、RO2、RO3和RO4分别用绿点、棕点、红点和棕色空心圈表示

图 11 近地面点影响高度在3.4km的射线路径上(a)大气总折射率(N)、(b)水汽折射率(N_{wet})和(c)干空气折射率(N_{dry})垂直梯度在近地面点附近 ± 480 -km范围内影响参数的变化图

RO1、RO2、RO3和RO4分别用绿色曲线、棕色曲线、红色曲线和棕色虚线表示. 大气折射率垂直梯度在25km范围内的平均值和标准差用黑色实线和黑色垂直线表示

图 12 Sc、Ci和Cu (a), Ac、As、Dc和Ns (b)以及晴空条件下 (c)大气折射率垂直梯度与影响参数变化之间的散点图 (c)中的绿色实心点表示RO1. 图中表示的物理量和图10(b)相同

附近, 平均值在近地面点最大. 射线路径离开近地面点越远, 大气折射率垂直梯度越小. 但是, 在个别射线路径上, 大气折射率的最大垂直梯度不在近地面点, 而是在其附近100~200km处. 图11中RO2、RO3和RO4的彩色曲线清楚地说明了这一点. 沿着晴空个例(RO1)的射

线路径, 大气折射率垂直梯度与所有样本的平均值接近. 总的来说, 射线路径上大气总折射率垂直梯度(11a)和水汽折射率垂直梯度(11b)比干空气折射率垂直梯度(11c)大, 在近地面点的值大于射线路径其他点上的值.

图 13 Sc、Ci和Cu(a), Ac、As、Dc和Ns(b)以及晴空条件下(c)水汽折射率垂直梯度与影响参数变化量之间的散点图
(c)中的绿色曲线表示RO1. 图上表示的物理量和图11(b)相同

掩星多路径的发生是否与不同天气条件有关、在哪种云类发生频次最高? 为了回答这个问题, 图12给出了射线路径上水汽折射率(N_{wet})垂直梯度的最大值和 $\left\{ \left| a_{r_0+360\text{km}} - a_{r_0} \right|, \left| a_{r_0-360\text{km}} - a_{r_0} \right| \right\}$ 最大值之间的散点图. 图13给出了射线路径上的 N_{wet} 随着与近地面点距离的变化图. 图12和图13分别类似于图10b和图11c. 我们发现, 无论是不同云类还是晴空情况, 射线路径上水汽折射率都可能存在局地强垂直梯度, 并且影响参数都会沿着射线路径变化. 掩星多路径发生在层积云中频率最高, 这可能是由于在对流层下层层积云发生的频率比其他云类多.

5 总结和讨论

为了阐明掩星多路径是如何发生以及为什么发

生, 本文使用二维射线追踪观测算子, 以2009年ECMWF ERA5高分辨率再分析资料作为输入场, 模拟了弯角和影响参数在射线路径上的值. 无论近地面点附近是晴空还是不同云类的天气条件, 模式模拟的影响参数都会沿着射线传播路径发生变化. 当射线经过近地面点时, 如果其附近的大气折射率有局地强垂直梯度, 射线路径上的影响参数将会发生很大的变化(约50~300m). 水汽折射率的垂直梯度在掩星多路径模拟中起着主导作用.

根据以上研究, 我们可以说出现水汽折射率局地强垂直梯度是掩星多路径发生的重要指标. 但是, 确定判别掩星多路径发生的大气折射率梯度的准确阈值还需要进一步研究. 接下来的工作, 在三维大气折射率输入场中寻找一些指标, 用来进行质量控制, 不用运行二维射线追踪观测算子, 就可以剔除发生掩星多路径模拟现象.

在球对称大气中, 掩星多路径模拟在有大气折射率逆梯度的情况下也有可能发生(Beyerle等, 2002). 因此, 掩星多路径现象并不是非球对称大气独有的. 为了在热带地区获得更多的掩星观测数据, COSMIC-2进行了设计优化. LEO卫星采用了更小的轨道倾角 24° (COSMIC 72°)和更高的采样频率100Hz(COSMIC 50Hz). COSMIC-2提供了丰富的热带观测资料, 为我们研究球对称大气条件下掩星多路径的发生提供了条件, 这是我们未来的研究计划. GPS掩星接收器可以搭载在小卫星和极轨卫星上, 未来随着小卫星和极轨卫星的发展将给热带地区提供更多的掩星资料. 具有高时间和空间水平分辨率的静止卫星观测资料和洋面上丰富的掩星观测资料为研究热带气旋的成因提供了条件(Zhuge等, 2015a, 2015b). 本文的研究结果将有利于改进热带掩星资料同化效果和热带气旋的数值天气预报水平.

参考文献

- 邹晓蕾, 刘辉. 2020. 通过影响高度多路径质量控制改进热带对流层低层GPS掩星资料同化效果. *大气科学学报*, 43: 116–127
- Anthes R A, Bernhardt P A, Chen Y, Cucurull L, Dymond K F, Ector D, Healy S B, Ho S P, Hunt D C, Kuo Y H, Liu H, Manning K, McCormick C, Meehan T K, Randel W J, Rocken C, Schreiner W S, Sokolovskiy S V, Syndergaard S, Thompson D C, Trenberth K E, Wee T K, Yen N L, Zeng Z. 2008. The COSMIC/FORMOSAT-3 mission: Early results. *Bull Am Meteorol Soc*, 89: 313–334
- Beyerle G, Hocke K, Wickert J, Schmidt T, Marquardt C, Reigber C. 2002. GPS radio occultations with CHAMP: A radio holographic analysis of GPS signal propagation in the troposphere and surface reflections. *J Geophys Res*, 107: 4802
- Healy S. 2001. Radio occultation bending angle and impact parameter errors caused by horizontal refractive index gradients in the troposphere: A simulation study. *J Geophys Res*, 106: 11875–11889
- Hoffmann L, Günther G, Li D, Stein O, Wu X, Griessbach S, Heng Y, Konopka P, Müller R, Vogel B, Wright J S. 2018. From ERA-Interim to ERA5: The considerable impact of ECMWF's next-generation reanalysis on Lagrangian transport simulations. *Atmos Chem Phys*, 19: 3097–3124
- Liu H, Kuo Y, Sokolovskiy S, Zou X, Zeng Z, Hsiao L, Ruston B. 2018. A quality control procedure based on bending angle measurement uncertainty for radio occultation data assimilation in the tropical lower troposphere. *J Atmos Ocean Tech*, 35: 2117–2131
- Schreiner W, Rocken C, Sokolovskiy S, Hunt D. 2010. Quality assessment of COSMIC/FORMOSAT-3 GPS radio occultation data derived from single- and double-difference atmospheric excess phase processing. *GPS Solut*, 14: 13–22
- Sokolovskiy S. 2001. Tracking tropospheric radio occultation signals from low Earth orbit. *Radio Sci*, 36: 483–498
- Sokolovskiy S. 2003. Effect of superrefraction on inversions of radio occultation signals in the lower troposphere. *Radio Sci*, 38: 1058
- Sokolovskiy S, Rocken C, Schreiner W, Hunt D, Johnson J. 2009a. Postprocessing of L1 GPS radio occultation signals recorded in open-loop mode. *Radio Sci*, 44: RS2002
- Sokolovskiy S, Schreiner W, Rocken C, Hunt D. 2009b. Optimal noise filtering for the ionospheric correction of GPS radio occultation signals. *J Atmos Ocean Tech*, 26: 1398–1403
- Stephens G, Vane D, Boain R, Mace G, Sassen K, Wang Z, Illingworth A, O'Connor E, Rossow W, Durden S, Miller S, Austin R, Benedetti A, Mitrescu C. 2002. The CloudSat mission and the A-Train: A new dimension of space-based observations of clouds and precipitation. *Bull Am Meteorol Soc*, 83: 1771–1790
- Tanelli S, Durden S, Im E, Pak K, Reinke D G, Partain P, Haynes J M, Marchand R T. 2008. CloudSat's cloud profiling radar after two years in orbit: Performance, calibration, and processing. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 46: 3560–3573
- Yang S, Zou X. 2012. Assessments of cloud liquid water contributions to GPS radio occultation refractivity using measurements from COSMIC and CloudSat. *J Geophys Res*, 117: D06219
- Zhuge X, Guan J, Yu F, Wang Y. 2015a. A new satellite-based indicator for estimation of the western north Pacific tropical cyclone current intensity. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 53: 5661–5676
- Zhuge X, Ming J, Wang Y. 2015b. Reassessing the use of inner-core hot towers to predict tropical cyclone rapid intensification. *Weather Forecast*, 30: 1265–1279
- Zou X, Wang B, Liu H, Anthes R, Matsumura T, Zhu Y. 2000. Use of GPS/MET refraction angles in three-dimensional variational analysis. *Q J R Meteorol Soc*, 126: 3013–3040
- Zou X, Vandenberghe F, Wang B, Gorbunov M, Kuo Y, Sokolovskiy S, Chang J C, Sela J, Anthes R. 1999. A ray-tracing operator and its adjoint for the use of GPS/MET refraction angle measurements. *J Geophys Res*, 104: 22301–22318

(责任编辑: 孟智勇)