

基于 ERA5 压力分层气象数据的 对流层散射传播斜延迟分析

孙浩冉, 刘 强, 胡邓华, 张 爽

(空军工程大学防空反导学院, 西安, 710051)

摘要 针对当前对流层散射湍流数值模型不能有效反映气象环境对对流层散射传播影响的问题, 将欧洲中期天气预报中心(ECMWF)的第五代全球大气再分析数据(ERA5)引入基于三维射线追踪方法的高精度对流层散射延迟计算模型, 并选择中国青藏高原、华北平原、四川丘陵、云贵山地、陇蒙荒漠和东南沿海6个典型地理区域的12条散射链路, 分别使用ERA5月平均压力分层数据(ERA5 MPL)与每小时压力分层数据(ERA5 HPL)2种数据集来计算, 分析各链路对流层散射斜延迟在不同地理环境下变化趋势, 同时对2种数据集计算的结果进行比较。结果表明, 文中给出的对流层散射传播斜延迟的计算方法对于ERA5压力分层气象数据适用性较好, 而且在不同链路上2种数据集所求得结果的最大标准差为2.9 m, 授时精度相差不超过10 ns。

关键词 对流层散射; 斜延迟; RT 3D算法; ERA5数据集; 插值与外推

DOI 10.3969/j.issn.2097-1915.2024.06.008

中图分类号 TN926; P422.3 **文献标志码** A **文章编号** 2097-1915(2024)06-0060-08

An Analysis of Troposcatter Propagation Slant Delay Based on ERA5 Pressure Level Meteorological Data

SUN Haoran, LIU Qiang, HU Denghua, ZHANG Shuang

(Air Defense and Antimissile School, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

Abstract Aimed at the problem that the current numerical model of tropospheric scattering turbulence fails to effectively reflect the influence of the meteorological environment on tropospheric scattering propagation, the fifth-generation global climate reanalysis dataset (ERA5) pressure level meteorological data of the European centre for medium-range weather forecasts (ECMWF) is introduced into the high-precision tropospheric scattering delay calculation model, and 12 scattering links in six typical geographical regions of China, i. e. Tibet Plateau, North China Plain, Sichuan hill, Yunnan-Guizhou mountain, Longmeng desert are selected. The ERA5 hourly data on pressure levels (ERA5 MPL) and ERA5 monthly averaged data on pressure levels (ERA5 MPL) are used to calculate and analyze the trend of tropospheric skew delay of each link in different geographical environments respectively, and simultaneously the results of the calculation of the two data sets are compared. The results show that the calculation method of troposcatter

收稿日期: 2024-01-31

基金项目: 国家自然科学基金(61701525)

作者简介: 孙浩冉(2000—), 男, 河南淮阳人, 硕士生, 研究方向为对流层散射延迟分析。E-mail: laoxunxun2023@163.com

通信作者: 张 爽(1990—), 男, 四川遂宁人, 讲师, 研究方向为对流层散射信道分析与建模。E-mail: zhangbai0826@163.com

引用格式: 孙浩冉, 刘强, 胡邓华, 等. 基于ERA5压力分层气象数据的对流层散射传播斜延迟分析[J]. 空军工程大学学报, 2024, 25(6): 60-67. SUN Haoran, LIU Qiang, HU Denghua, et al. An Analysis of Troposcatter Propagation Slant Delay Based on ERA5 Pressure Level Meteorological Data[J]. Journal of Air Force Engineering University, 2024, 25(6): 60-67.

propagation slant delay given in this paper is suitable for ERA5 pressure level meteorological data, the maximum standard deviation in the results obtained by the two data sets on different links is 2.9 m, and the timing accuracy difference is less than 10 ns.

Key words troposcatter; slant delay; 3D ray tracing; ERA5 dataset; interpolation and extrapolation

对流层散射通信利用不均匀对流层大气的前向散射作用,将无线电波传播到视距以外的区域,具有单跳通信距离远、越障碍能力强、抗干扰抗截获性能好等优点,是世界各国重要的军用无线通信手段之一^[1-4]。利用对流层散射通信传输时间比对信号可以实现分布式站点之间的高精度时间同步,这种方法被称为对流层散射授时^[5]。与卫星授时和光纤授时等传统方式相比,对流层散射授时能弥补卫星授时资源有限、微波授时单跳距离较短、光纤授时机动性较差等缺点,是卫星授时的重要补充。在战时,它是一种最低限度的自主授时方法^[6]。目前基于散射信道的的时间比对方法主要包括单向时间比对和双向时间比对,对流层双向时间比对系统的主要误差是对流层散射斜延迟^[7]。

目前对流层散射斜延迟计算方法按照计算原理分为两类。一是近似于卫星信号穿越对流层的斜延迟计算方法,使用对流层天顶延迟和映射函数来估计对流层散射斜延迟。文献[8]对比分析了将对流层天顶延迟分别使用 NMF、VMF1 和 GMF 3 种映射函数计算得到的对流层散射斜延迟,提出基于映射函数进行对流层散射双向时间比对斜延迟分析的方法。文献[9]使用直测站气象数据,利用 Hopfield 模型获取折射率剖面,将 CFA2.2 模型作为映射函数,对对流层斜延迟进行计算。这类方法存在 2 个问题:①卫星信道穿过整个对流层,而对流层散射仅在对流层内传播,未穿过整个对流层,通过天顶延迟和映射函数计算得到是穿越整个对流层的斜延迟;②映射函数在模型拟合时主要考虑卫星信道截止高度角以上的情况,而对流层散射通常采用低仰角沿地表视平线传播,传播仰角远小于卫星截止高度角。二是通过射线描迹法基于气象数据计算对流层斜延迟。射线描迹法自身精度较高,斜延迟的计算精度很大程度上依赖于气象数据。文献[10]和文献[11]分别利用 UNB3m 气象模型以及中纬度参考大气数值模型为射线描迹法提供气象数据,获取对流层散射路径及路径上折射率,通过折射率积分得到斜延迟。上述文献中使用的气象数据以气象模型为主,虽然能够反映气象环境的变化,但是气象环境复杂多变,与实际状况还是存在较大偏差。

随着气象观测资料的日益丰富和数据同化技术的进步,能够利用资料同化技术对气象观测数据进

行再分析,从而重建出高质量、长时间序列的历史气候数据集^[12]。以欧洲中期天气预报中心(European centre for medium-range weather forecasts, ECMWF)为代表的第五代全球大气再分析产品(the fifth-generation global climate reanalysis dataset, ERA5)已经具备了提供时间分辨率 1 h、空间分辨率 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 的气象数据的能力^[13]。

本文将 ECMWF 的 ERA5 月平均压力分层数据(ERA5 monthly data on pressure levels, ERA5 MPL)和每小时压力分层数据(ERA5 hourly averaged data on pressure levels, ERA5 HPL)与三维射线追踪法结合,计算对流层散射斜延迟并比较基于 2 个数据集计算结果的差异,验证本文提出的对流层散射斜延迟计算方法对于 ERA5 压力分层气象数据的适用性。

1 ERA5 压力分层数据集

ERA5 数据集使用 ECMWF 的 CY41R2 模型经四维数据同化方案开发生成^[14],是 CY31R2 模型生成的 ERA-Interim 数据集的替代产品,其同化过程利用了全球众多的历史气象观测数据,特别是将大量的卫星数据纳入数据同化和模式系统中,大幅提高了大气估计的准确性^[15]。自 2016 年 ERA5 数据集推出以来,诸多学者对数据集有效性进行了验证分析,通过对比基于 ERA5 数据集计算的和基于 IGS 站实测的对流层天顶延迟(zenith tropospheric delay, ZTD)确定了 ERA5 数据集的有效性,其中 ZTD 偏差为毫米量级,均方根误差为厘米量级^[16]。

图 1 为 ERA5 中包括了臭氧层、陆地表面、海浪、海面温度和海冰等的同化图原理框图^[17],其主要功能由用于大气层和臭氧层的增量四维变分(4D-VAR)、陆地数据同化系统(land data assimilations, LDAS)以及海浪最优化插值同化(ocean wave optimal interpolation, OI)组成,其中 4D-VAR 与 LDAS 和 OI 相耦合,其输出结果为再分析产品。ERA5 再分析产品分为单层级(single level)和压力分层(pressure)两大类,时间属性上分小时级(hourly data)和月平均(monthly averaged data)2 种。本文使用 ERA5 MPL,并选择其中的位势 z 、温度 T 、比湿度 q 和气压 p 4 个变量。

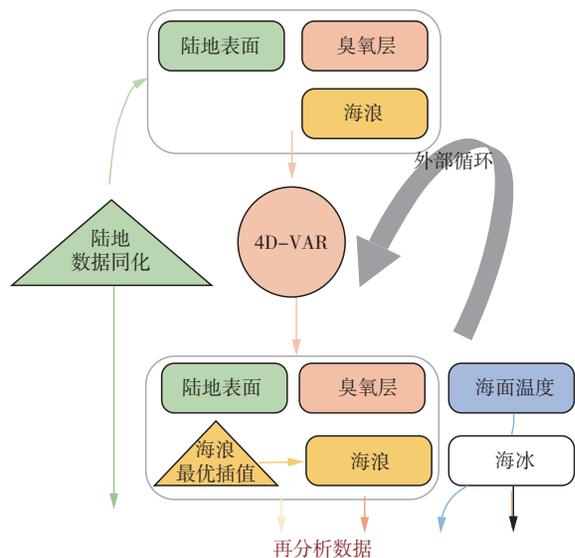


图1 ERA5 大气同化原理

Fig. 1 Schematic diagram of ERA5 atmospheric assimilation

大气折射率剖面常用于分析大气中不同高度或层次中的折射率变化,但是由于大气状态的复杂性,真实的大气折射率剖面是复杂多变的,因此使用理想化的典型大气折射率剖面来反映不同高度或层次折射率的分布特性。分别使用 ITU 全球平均参考大气和 2020 年 1 月至 2021 年 12 月的 ERA5 气象数据计算典型的折射率剖面,如图 2 所示,折射率随高度增加而减小,且在 30 km 处接近为 0,并且发现 ITU 全球平均参考大气和 ERA5 气象数据计算的折射率基本一致,但是在地表附近相差较大。

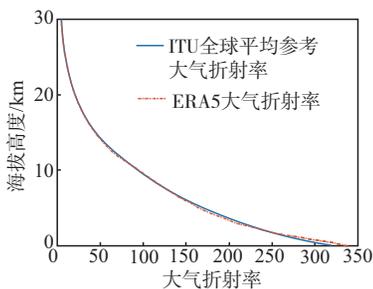


图2 典型的大气折射率垂直剖面

Fig. 2 Typical vertical profile of atmospheric refractive index

2 基于反距离加权的气象数据插值与外推

电磁波传播路径上的大气折射率变化是路径弯曲和时延的根本原因,在对流层大气中微波波段使用《ITU-R P. 453-14》中给出的大气折射率 N 和大气折射指数 n 的计算方法^[18]:

$$N = (n - 1) \times 10^6 = \left(77.6 \frac{p}{T} - 5.6 \frac{e}{T} + 3.75 \times 10^5 \frac{e}{T^2} \right) \quad (1)$$

式中: p 、 e 和 T 分别为大气压强、水汽压和温度。

ERA5 使用三维网格来储存数据,当计算指定位置的气象数据时,需要使用插值和外推方法,如图 3 所示。

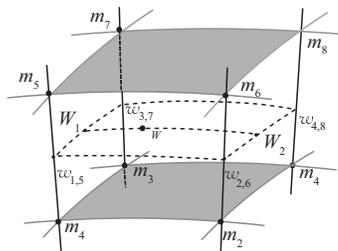


图3 三维网格插值示意图

Fig. 3 Illustration of 3D mesh interpolation

图 3 中, W 为计算点, $m_1 \sim m_8$ 为 W 临近的 8 个网格点, m_1 和 m_5 、 m_2 和 m_6 、 m_3 和 m_7 、 m_4 和 m_8 为 4 组上下相对具有相同经纬度的网格点, $w_{1.5}$ 、 $w_{2.6}$ 、 $w_{3.7}$ 、 $w_{4.8}$ 为 4 个插值点。

首先进行高程变换,将计算点几何高转为位势高^[19]为:

$$H_{gh} = \frac{R_e H_g}{R_e + H_g} \quad (2)$$

式中: H_{gh} 为位势高; H_g 为几何高; R_e 为地球半径。通过高程简便转换后,确定计算点与网络的相对位置。

在水平方向上,所有气象变量都采用双线性距离插值。在垂直方向上,如果计算点位于网格内部,则温度和湿度采用双线性距离插值:

$$S_j = S_{g_j} \frac{h_{g_{j+4}}}{h_{g_j} + h_{g_{j+4}}} + S_{g_{j+4}} \frac{h_{g_j}}{h_{g_j} + h_{g_{j+4}}} \quad (3)$$

式中: S_j 为上、下网格点竖直方向的气象数据(温度或比湿度)插值结果; S_{g_j} 和 $S_{g_{j+4}}$ 分别为上、下网格点的气象数据数值; h_{g_j} 为计算点位势高到上网格点的距离; $h_{g_{j+4}}$ 为计算点位势高到下网格点的距离, $j = 1, 2, 3, 4$ 。

如果计算点位于网格外部,则温度根据平均温度梯度 $-0.0065 \text{ } ^\circ\text{C/m}$ 进行外推计算^[20],而湿度则默认为邻近地表附近的网格点取值,在对流层顶部设为 0^[21]。大气压力则采用指数模型进行内插或外推处理^[22]:

$$\begin{cases} p = 0.01 p_0 \exp\left(-\frac{g_0 M}{R_g T_v} h_d\right) \\ T_v = T_0 (1 + 0.6077 q_0) \end{cases} \quad (4)$$

式中: P_0 、 T_0 和 q_0 分别为网格点的气压、温度和比湿度; $M = 28.965 \times 10^{-3} \text{ kg/mol}$ 为干空气的摩尔质量; $R_g = 8.3143 \text{ J/K} \cdot \text{mol}$ 为气体常数; h_d 为计算点和网格点之间的海拔差,可由式(2)得到。

通过上述的计算模型,可以计算出对流层散射传播中任意位置的温度、气压、比湿度数值大小,插

值和外推的计算流程如图 4 所示。

折射率计算需要水汽压 e , 但 ERA5 提供的气象变量是比湿度 q , 其转换公式为:

$$e \approx \frac{qp}{(0.621\ 98 + 0.378\ 02q)} \quad (5)$$

3 三维射线追踪算法

射线描述法通常用来处理全球温度气压湿度 (global pressure and temperature 2 wet, GPT2w) 一类的二维气象数据, 而对于 ERA5 此类使用三维

网格存储的数据需要使用三维射线追踪法, 在空间坐标系统中进行处理计算。

三维射线追踪原理为费马原理, 当电磁波频率满足大气折射指数在一个波长范围内变化很小时, 可使用费马原理确定射线传播路径^[23]:

$$\delta t = \delta \int_s \frac{1}{c} n dS = 0 \quad (6)$$

式中: t 为传播时间; c 为光速; n 为大气折射指数; S 为光线传播的路径; dS 为路径微分。

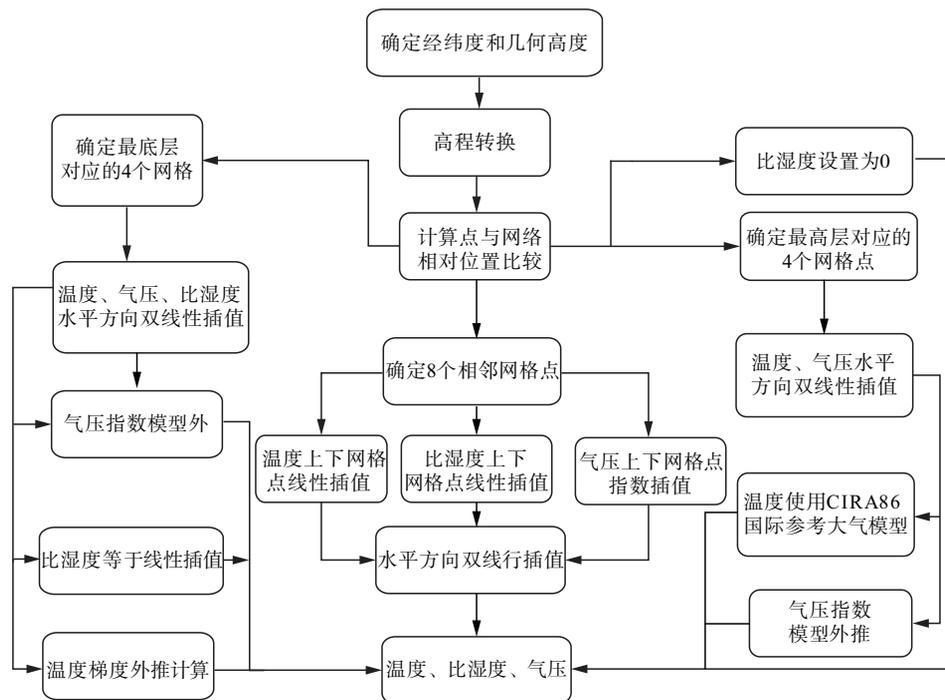


图 4 气象数据三维插值与外推计算流程

Fig. 4 Process of 3D interpolation and extrapolation of meteorological data

如图 5 所示, 在地心直角坐标系 (X, Y, Z) 基础上, 以发射天线中心为原点, 地心指向发射天线中心方向为 z 轴, 以右手螺旋定则建立局部直角坐标系 (x, y, z) , α_0 为发射天线方位角, β_0 为发射天线仰角。

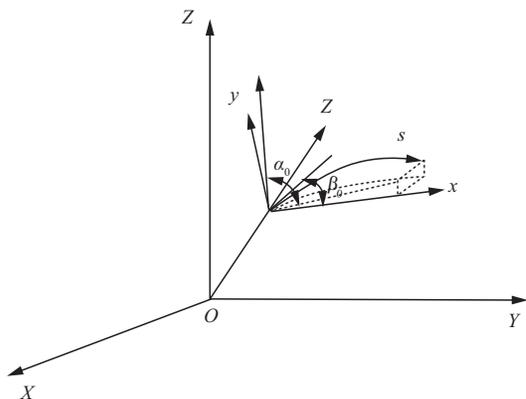


图 5 局部直角坐标系

Fig. 5 Schematic diagram of the rectangular coordinate system in the local coordinate system (x, y, z) 中, 有:

$$\begin{cases} ds = \sqrt{dx^2 + dy^2 + dz^2} = \sqrt{1 + y'^2 + z'^2} dx \\ y' = dy/dx \\ z' = dz/dx \\ F(x, y, z, y', z') = n(x, y, z) \sqrt{1 + y'^2 + z'^2} \end{cases} \quad (7)$$

由式(7)得到:

$$\delta \int_s F(x, y, z, y', z') dx = 0 \quad (8)$$

由变分法及函数 F 定义得到^[24]:

$$\begin{cases} y'' = \frac{1 + y'^2 + z'^2}{n} \left(-y' \frac{\partial n}{\partial x} + \frac{\partial n}{\partial y} \right) \\ z'' = \frac{1 + y'^2 + z'^2}{n} \left(-z' \frac{\partial n}{\partial x} + \frac{\partial n}{\partial z} \right) \end{cases} \quad (9)$$

微分方程组的初始边界条件为:

$$\begin{cases} y|_{x=0} = z|_{x=0} = 0 \\ z'|_{x=0} = \tan \beta_0 \\ y'|_{x=0} = 0 \end{cases} \quad (10)$$

由于折射指数 n 随时空变化而变化,微分方程无法直接求解,但根据三维气象数据可以计算折射指数 n 以及偏导数 $\partial n/\partial x$ 、 $\partial n/\partial y$ 和 $\partial n/\partial z$ 在指定位置的数值,此时可以通过四阶龙格库塔法在气象数据支持下求解微分方程组。

受到大气折射率影响,波束在对流层中传播时路径会发生弯曲,实际散射发生的区域要比理论散射区域低,同时考虑散射传播过程中天线仰角越小,散射角越小,传输损耗越小,因此计算对流层散射的路径通常选择紧贴视平线传播的曲线路径,而对流层散射斜延迟大小通常使用曲线路径 TP 、 PR 和 TP' 、 $P'R$ 理论路径的差值或者用电磁波通过 2 条路径的时间差来表示。A 站和 B 站之间的对流层散射传播路径如图 6 所示。

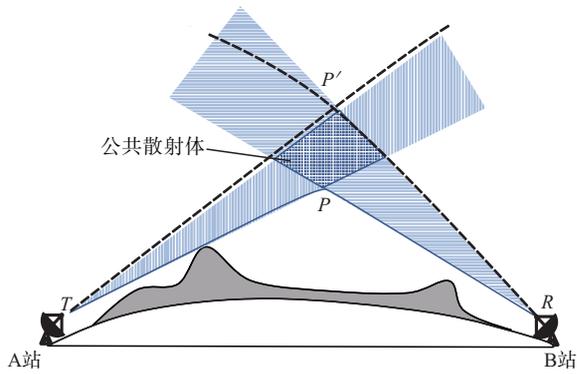


图 6 对流层散射传播路径

Fig. 6 Schematic diagram of the troposcatter propagation path

对流层散射传播斜延迟的计算式为:

$$\Delta r = \int_R n ds - R' \quad (11)$$

式中: Δr 为传播斜延迟; R 为实际弯曲的传播路径; R' 为理论直线传播路径。

4 典型区域斜延迟分析

4.1 散射链路设置

本文选择青藏高原、华北平原、四川丘陵、云贵山地、陇蒙荒漠和东南沿海 6 个不同的地理区域,每个区域各设定一条 100 km 级别和 200 km 级别的散射链路,其位置如图 7 所示,位置参数如表 1 所示。设置链路收发天线高度为 6 m,忽略地形起伏导致的波束抬高,设置天线收发仰角为 0° ,气象数据使用 2020 年 1 月至 2021 年 12 月的每月压力分层 ERA5 数据。

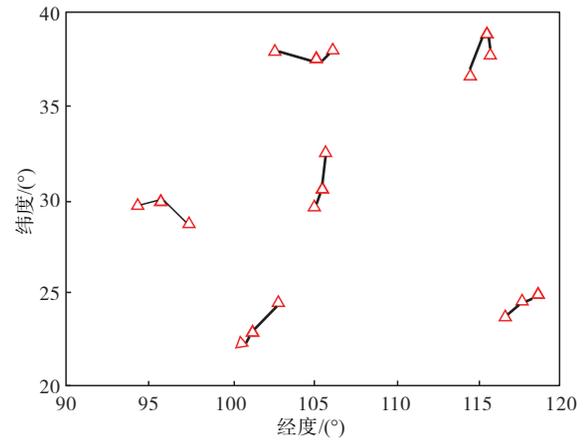


图 7 典型区域 12 条链路位置分布

Fig. 7 Location distribution of 12 links in typical areas

表 1 12 条散射链路位置参数

Tab. 1 12 Scatter links position parameters

序号	位置 区域	发射 经度/ (°)	发射 纬度/ (°)	接收 经度/ (°)	接收 纬度/ (°)	距离/ km
1	青藏高原	95.76	29.86	94.36	29.65	137
2	青藏高原	95.76	29.86	97.47	28.67	212
3	华北平原	115.52	38.85	114.51	36.60	265
4	华北平原	115.52	38.85	115.72	37.72	127
5	东南沿海	117.65	24.52	118.62	24.88	106
6	东南沿海	118.62	24.88	116.63	23.67	243
7	四川丘陵	105.55	30.53	105.06	29.57	117
8	四川丘陵	105.55	30.53	105.85	32.43	212
9	云贵山地	100.98	22.76	102.54	24.35	237
10	云贵山地	100.98	22.76	100.43	22.00	102
11	陇蒙荒漠	105.18	37.53	102.67	37.92	226
12	陇蒙荒漠	105.18	37.53	106.18	37.99	102

4.2 月平均斜延迟分析

通过文中给出的对流层散射传播斜延迟的方法,分别计算各散射链路的月平均斜延迟如图 8、图 9 所示,图中横坐标从 2020 年 1 月记为第 1 个月份,以此类推至 2021 年 12 月共计 24 个月。由图分析可得,斜延迟大小及变化特性与链路距离,地理区域有着密切关系。

每条链路最大延迟均出现在每年的 7 月~8 月,在 100 km 级别散射链路中,发现华北平原总体延迟大于其余各区域,而陇蒙荒漠的延迟普遍要小于其他区域。6 个区域的延迟基本落在 30~45 m,2021 年 7 月,华北平原出现延迟的最大值 50.57 m。在 200 km 级别散射链路中,华北平原与东南沿海的斜延迟要高于其余地区,而青藏高原的斜延迟明显低于其余区域,认为在长距离散射链路传输信号时,由于青藏高原地区较其余地区大气稀薄,大气折

射率相较与其他区域较小,而斜延迟的计算方法中大气折射率是关键,因此青藏高原地区得到的斜延迟较小。陇蒙荒漠气候干燥,湿度较低,大气折射率也相对较小,因此其斜延迟也比较低。东南沿海区域和华北平原气候较为湿润,湿度高,大气折射率较大,从而计算得到的斜延迟结果较大。对于不同区域,受温度和气压等气候因素影响,大气折射率会有一些的差异性,大气折射率越大,对流层散射传播路径弯曲越明显,从而使得计算出的斜延迟大小越大。对于同一区域而言,比较不同级别的散射链路,发现延迟随散射距离的增加而增大。其中华北平原、东南沿海区域无论是短距离(100 km 级别)还是长距离(200 km 级别)通信,其斜延迟都相对较大,而四川丘陵在短距离通信的延迟比长距离通信时更明显。

无论是四季分明的华北平原,还是季节变化不明显的青藏高原和陇蒙荒漠,散射链路的斜延迟整体变化具有季节性,呈现出夏天高冬天低的趋势。

00:00 至 2021 年 12 月 28 日 23:00 共计 16 488 个 ERA5 每小时压力分层数据计算 12 条链路散射斜延迟大小,如图 10 所示。

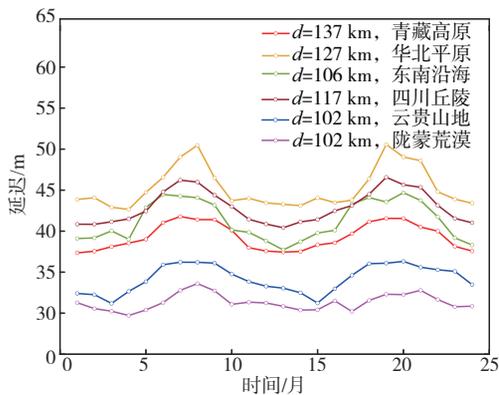


图 8 ERA5 MPL 计算的典型区域 100 km 链路级别斜延迟
Fig. 8 Typical areas 100 km link-level slant delay calculated by ERA5 MPL

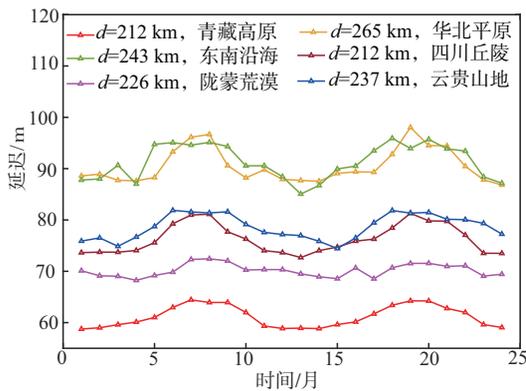
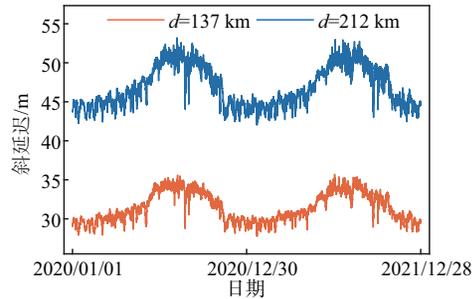
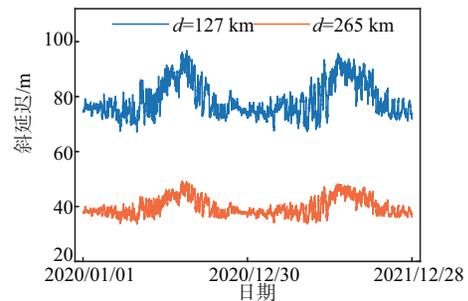


图 9 ERA5 MPL 计算的典型区域 200 km 级别链路斜延迟
Fig. 9 Typical areas 200 km link-level slant delay calculated by ERA5 MPL

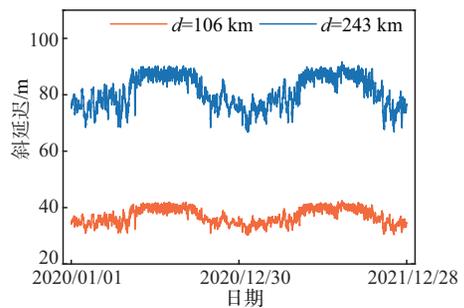
在相同假设条件下,使用从 2020 年 1 月 1 日



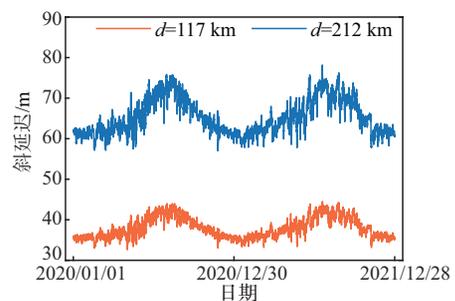
(a) 青藏高原



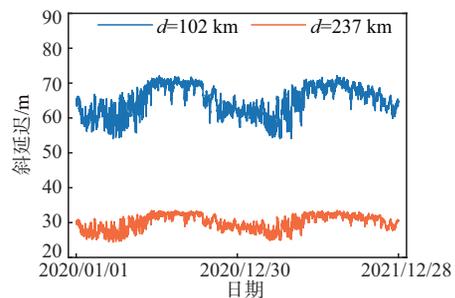
(b) 华北平原



(c) 东南沿海



(d) 四川丘陵



(e) 云贵山地

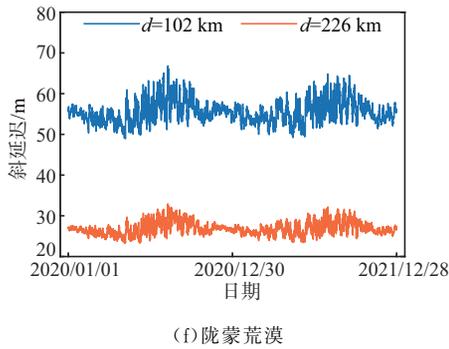


图 10 ERA5 HPL 计算的典型区域 12 条链路斜延迟

Fig. 10 12 link slant delay calculated by ERA5 HPL

由图 10 可知,计算斜延迟具有一定的随机变化抖动,经过对比发现,在同一区域内,不同距离链路的延迟随机变化趋势基本是相同的,且随着链路距离的增加,随机抖动幅度增加。对流层作为一个动态大气结构,自身具有一定的实时变化特性,其中存在的对流层湍流和大气运动会影响散射体的分布和特性,加之对流层散射信道多径效应的影响,当使用时间分辨率高的 ERA5 HPL 数据计算时,会出现由于对流层实时变化引起的随机抖动,且相同区域的随机抖动趋势基本相同。分析图 8~图 10 发现,对于本文所给出的对流层散射斜延迟计算方法,在使用 ERA5 MPL 和使用 ERA5 HPL 计算得到的斜延迟大小和变化趋势基本一致,对于 ERA5 压力分层气象数据的适用性较好,通过 2 种数据集计算得到的斜延迟标准差如表 2 所示。在本文所选的链路中,采用 ERA5 MPL 计算得到的斜延迟与使用 ERA5 HPL 的斜延迟的标准差最大值为 2.9 m,二者在授时精度上相差数值不超过 10 ns,表明本文提出的模型对 2 种数据均具有较好的适用性。

表 2 斜延迟标准差

Tab. 2 Standard deviation of slant delay

序号	位置区域	标准差/m
1	青藏高原	0.477 8
2		0.691 1
3		1.037 3
4	华北平原	2.901 0
5	东南沿海	0.778 6
6		2.230 7
7	四川丘陵	0.664 3
8		1.432 5
9	云贵山地	0.502 3
10		1.563 3
11		0.441 6
12	陇蒙荒漠	0.899 8

5 结语

本文将 ERA5 压力分层气象数据与三维射线追踪法相结合,构建了能够估计对流层散射传播延迟的数值计算方法,能够较为精确地估计斜延迟大小。根据 6 个典型地理区域的 12 条散射链路的计算结果可知,斜延迟的大小随着散射距离的增大而增大,呈现出的季节性变化为夏天高冬天低,而且华北平原和东南沿海区域在长距离散射链路中随季节变化更加明显。同时,本文分别使用 ERA5 MPL 数据集和 ERA5 HPL 数据集计算斜延迟,并对结果进行比较分析,二者的标准差为 2.9 m,在授时精度上相差不超过 10 ns,表明基于三维射线追踪的对流层斜延迟计算模型对于 ERA5 压力分层气象数据具有一定的适用性。

参考文献

- [1] 张明高. 对流层散射传播[M]. 北京:电子工业出版社,2004:1-7.
ZHANG M G. Troposcatter Propagation[M]. Beijing: Publishing House of Electronic Industry, 2004: 1-7. (in Chinese)
- [2] 陈西宏,赵宇,谢泽东,等. 对流层散射通信高速率调制解调技术[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2022:4-10.
CHEN X H, ZHAO Y, XIE Z D, et al. High-Speed Modem Technology in Troposcatter Communication [M]. Xi'an: Xidian University Press, 2022: 4-10. (in Chinese)
- [3] 陈西宏,胡茂凯,薛伦生,等. 对流层散射信道下多天线分集 OFDM 系统研究[J]. 空军工程大学学报(自然科学版),2014,15(1):53-56.
CHEN X H, HU M K, XUE L S, et al. An Analysis of OFDM System under Troposcatter Fading with Multi-Antenna Diversity[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2014, 15 (1): 53-56. (in Chinese)
- [4] 赵振维,林乐科. 对流层电波传播研究与展望[J]. 电波科学学报,2023,38(4):591-609,656.
ZHAO Z W, LIN (L/Y)K. Research and Prospect of Tropospheric Radio Wave Propagation [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2023, 38(4): 591-609, 656. (in Chinese)
- [5] 刘强,陈西宏,刘赞,等. 综合授时技术[M]. 北京:科学出版社,2022:65-67.
LIU Q, CHEN X H, LIU Z, et al. Integrated Timing Technology[M]. Beijing: Science Press, 2022: 65-67. (in Chinese)

- [6] 刘强,孙际哲,陈西宏,等. 对流层双向时间比对及其时延误差分析[J]. 测绘学报,2014,43(4):341-347.
LIU Q,SUN J Z,CHEN X H,et al. Analysis of Two Way Troposphere Time Transfer and Its Delay Errors [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica,2014,43(4):341-347. (in Chinese)
- [7] 陈西宏,刘赞,刘继业,等. 低仰角下对流层散射斜延迟估计方法[J]. 电子与信息学报,2016,38(2):408-412.
CHEN X H,LIU Z,LIU J Y,et al. Estimating Tropospheric Slant Scatter Delay at Low Elevation[J]. Journal of Electronics & Information Technology,2016,38(2):408-412. (in Chinese)
- [8] 刘强,陈西宏,薛伦生,等. 基于映射函数的对流层双向时间比对斜延迟分析[J]. 电子科技大学学报,2015,44(5):689-694.
LIU Q,CHEN X H,XUE L S,et al. Slant Propagation Delay Analysis in Two Way Troposphere Transfer Based on Mapping Functions[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China,2015,44(5):689-694. (in Chinese)
- [9] 陈西宏,刘赞,刘强,等. 对流层散射双向时间比对中对流层斜延迟估计[J]. 国防科技大学学报,2016,38(2):171-176.
CHEN X H,LIU Z,LIU Q,et al. Tropospheric Slant Delay Estimation in Two-Way Troposphere Time Transfer[J]. Journal of National University of Defense Technology,2016,38(2):171-176. (in Chinese)
- [10] 吴文溢,陈西宏,刘少伟. 低仰角对流层散射斜延迟实时估计方法[J]. 电子与信息学报,2017,39(6):1326-1332.
WU W Y,CHEN X H,LIU S W. Real-Time Estimation Method for Tropospheric Scatter Slant Delay at Low Elevation[J]. Journal of Electronics & Information Technology,2017,39(6):1326-1332. (in Chinese)
- [11] 吴文溢,钟方平,王万鹏,等. 改进射线描述的低仰角散射斜延迟实时估计[J]. 电子与信息学报,2019,41(10):2366-2372.
WU W Y,ZHONG F P,WANG W P,et al. Real-Time Estimation of Tropospheric Scattering Slant Delay of Low-Elevation Obtained by Improved Ray Tracing [J]. Journal of Electronics & Information Technology,2019,41(10):2366-2372. (in Chinese)
- [12] 赵天保,符淙斌,柯宗建,等. 全球大气再分析资料的研究现状与进展[J]. 地球科学进展,2010,25(3):242-254.
ZHAO T B,FU C B,KE Z J,et al. Global Atmosphere Reanalysis Datasets:Current Status and Recent Advances[J]. Advances in Earth Science,2010,25(3):242-254. (in Chinese)
- [13] 姜立鹏,罗岚心,张涛,等. 全球大气再分析[J]. 气象科技进展,2018,8(1):52.
JIANG L P,LUO L X,ZHANG T,et al. Global Atmospheric Reanalysis[J]. Advances in Meteorological Science and Technology,2018,8(1):52. (in Chinese)
- [14] 黄瑾芳,楼益栋,张卫星,等. 再分析资料计算中国区域对流层延迟精度[J]. 测绘科学,2018,43(5):13-17.
HUANG J F,LOU Y D,ZHANG W X,et al. The Assessment of ZTD Calculated from Reanalysis over China[J]. Science of Surveying and Mapping,2018,43(5):13-17. (in Chinese)
- [15] JIANG C H,XU T H,WANG S M,et al. Evaluation of Zenith Tropospheric Delay Derived from ERA5 Data over China Using GNSS Observations[J]. Remote Sensing,2020,12(4):663-682.
- [16] 徐康,邓兴升,邢承滨. 中国地区ERA5资料计算ZTD精度评估[J]. 测绘工程,2020,29(6):24-30.
XU K,DENG X S,XING C B. Accuracy Assessment of Zenith Tropospheric Delay Calculated from ERA5 Data over China [J]. Engineering of Surveying and Mapping,2020,29(6):24-30. (in Chinese)
- [17] HERSBACH H,BELL B,BERRISFORD P,et al. The ERA5 Global Reanalysis[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society,2020,146(730):1999-2049.
- [18] Recommendation ITU-R P. 453: The Radio Refractive Index, Its Formula and Refractivity Data[S]. Geneva: ITU,2019.
- [19] Recommendation ITU-R P. 835-6: Reference Standard Atmospheres:835[S]. Geneva:ITU,2017.
- [20] BOEHM J,HEINKELMANN R,SCHUH H. Short Note: a Global Model of Pressure and Temperature for Geodetic Applications[J]. Journal of Geodesy,2007,81(10):679-683.
- [21] ECMWF. IFS Documentation CY47R1 - Part I: Observations[EB/OL]. (2020-06-30) [2024-01-01]. <https://www.ecmwf.int/node/19745>.
- [22] YAO Y B,XU C Q,SHI J B,et al. ITG: a New Global GNSS Tropospheric Correction Model[J]. Scientific Reports,2015,5:10273.
- [23] 阮颖铮. 电磁射线理论基础[M]. 成都:成都电讯工程学院出版社,1989:95-99.
RUAN Y Z. Theory of Electromagnetic Rays [M]. Chengdu:Chengdu Institute of Telecommunication Engineering Publishing House,1989:95-99. (in Chinese)
- [24] 黄捷. 电波大气折射误差修正[M]. 北京:国防工业出版社,1999:101-105.
HUANG J. Radio Wave Atmospheric Refraction Error Correction[M]. Beijing:National Defense Industry Press,1999:101-105. (in Chinese)

(编辑:徐楠楠)