

文章编号: 2095-4980(2020)02-0175-06

## 基于大气再分析资料集的太赫兹传输衰减计算

杨晓帆, 曾勇虎, 汪连栋

(电子信息系统复杂电磁环境效应国家重点实验, 河南 洛阳 471003)

**摘要:** 为精确计算太赫兹波大气传输吸收衰减, 需建立太赫兹波传播路径模型, 而后获取沿传播路径的相关变化大气参量, 并通过国际电联(ITU)标准计算分段的吸收衰减值, 最终进行累加计算得出总的大气衰减量值。受限气象观测设备及手段, 沿传播路径完整的大气参量难以获取。由于地球重力场产生的大气折射效应, 电磁波在大气层中传播时其路径呈现曲线弯曲传播。基于区域大气再分析资料集基础数据转化的太赫兹波大气传输衰减精确计算方法, 通过ITU标准这个桥梁, 在气象数据和大气传输衰减间建立关联关系, 最终运用在飞行器太赫兹波地面探测类工程技术上, 以预估太赫兹波通信链路的大气吸收衰减值。

**关键词:** 太赫兹波; 大气观测再分析资料集; 电磁波地面探测; 大气吸收衰减

**中图分类号:** TN914.42

**文献标识码:** A

**doi:** 10.11805/TKYDA2018283

## THz wave atmospheric absorption loss calculation based on atmospheric observation re-analysis data

YANG Xiaofan, ZENG Yonghu, WANG Liandong

(State Key Laboratory of Complex Electromagnetic Environment Effects on Electronic and Information System, Luoyang Henan 471003, China)

**Abstract:** In order to calculate Terahertz(THz) wave atmospheric absorption loss accurately, THz propagation segmented path model should be established firstly, and continuous changing environmental atmospheric parameters can be obtained through the whole path. Each segment path's atmospheric absorption loss is obtained by using International Telecommunications Union-Radio communications sector(ITU-R) standard, and the whole segments are accumulated to get total atmospheric absorption loss. It is difficult to obtain complete atmospheric parameters along the propagation path due to the lack of meteorological observation equipment and methods. Besides, atmospheric refraction effect appears due to the earth's gravity, which makes curved THz propagation path. This paper discusses the calculation method of THz wave atmospheric absorption loss. Based on atmospheric observation re-analysis data, using ITU-R standard as bridge, a constructive relationship is built between meteorological data and atmospheric absorption loss. The proposed method can be used in the ground detection engineering of THz wave for aircraft, to make THz communication link's atmospheric absorption loss estimation.

**Keywords:** Terahertz wave; atmospheric observation re-analysis data; electromagnetic wave ground detection; atmospheric absorption loss

太赫兹波<sup>[1]</sup>传输科学已逐渐成为新一代无线通信产业发展的重要基础技术。美国、日本、韩国、德国等国家一直致力于发展太赫兹高速无线通信技术, 抢占太赫兹频段的通信资源。目前, 国际电信联盟已指定 0.12 THz 和 0.22 THz 频段分别用于下一代地面无线通信(移动电话)和卫星通信。据报导, 美国国防高级研究计划局(Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA)宣称美国于 2015 年其通信卫星具备 10 Gb/s 量级的传输速率, 并预计在 2020 年具备 50 Gb/s 以上的传输速率。

收稿日期: 2018-11-15; 修回日期: 2019-03-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61601472); 中国博士后科学基金资助项目(2015T81106)

作者简介: 杨晓帆(1985-), 博士, 主要研究方向为太赫兹科学与技术、智能化战场电磁博弈对抗、电波传播机理等。email:xiaofan\_uestc@sina.com

在空间飞行器进行太赫兹波地面探测应用场景下,尤其是在给定飞行器位置、对地探测俯视角和大气传播环境参量信息的前提下,如何定量预估太赫兹波在大气层中的大气吸收衰减量值,是实现通信和高速信息网、卫星间星际通信、平流层内空对空通信、高速远距离无线通信、短程安全大气通信等多类太赫兹波通信方式的基础和关键技术<sup>[2-4]</sup>。

太赫兹波传播<sup>[5-7]</sup>于大气中时,与微波相比,其骤减的波长使得太赫兹波与各类大气分子,如氧气、臭氧、二氧化碳及水蒸气共振而形成复杂的吸收衰减效应。每一类大气分子具备其独特的电磁波吸收谱特性<sup>[8-10]</sup>。此外,由于不同高度大气层温度参量呈现为非规则变化特性,兼之从对流层、平流层、中间层、热层到外层的各个大气分层其大气分子组成,以及气象状态(即气象参量,尤其是对流层)均不断变化,形成了复杂的太赫兹频段大气吸收衰减效应。

## 1 大气再分析资料集数据及其转化

大气再分析资料源于气象学研究。气象和气候研究需要大量的、各种类型与来源的、全球和区域的气象数据。大气再分析始于 20 世纪 90 年代,重点关注重建高质量、长时间系列和高分辨力的气候数据资料集。随着计算机技术的飞速发展和全球气候观测系统(Global Climate Observing System, GCOS)的逐步完善,资料同化技术(即再分析数据)已在数值天气预报等领域得到广泛应用。

到目前为止,被广泛应用的全球大气再分析资料主要来自美国国家海洋与大气管理局、美国国家航空航天局、欧洲中期预报中心和日本气象厅等机构和研究中心,其研究内容和应用情况对比如表 1 所示。国内的中国气象科学研究院、国家气象信息中心以及中国科学院大气物理研究所也从事相关研究,分别在中国东亚区域再分析资料研制、我国全球再分析系统规划搭建以及数值模式技术/资料同化技术方面开展了研究工作。大气再分析资料为大气、环境、海洋等研究提供了非常有效的基础资料。但面对局地问题研究时,上述大气再分析资料之间存在着较大的不确定性和局限性:由于研究方法、再分析系统、同化的观测资料、同化方法、关注对象等的不同,这些大气再分析资料之间有着较大的差异。

表 1 全球大气再分析资料集机构研究内容及应用对比

No.	research institution	name of re-analysis data	content of research focus	current application
1	national oceanic and atmospheric administration(USA)	north American reanalysis data	the earliest regional reanalysis data	widely used in north America
2	the Ohio state university (USA)	arctic high-resolution reanalysis data	the first high-resolution reanalysis data for arctic region	have been applied to arctic atmospheric research
3	European Center for Medium-range Weather Forecasts(ECMWF)	the European reanalysis data	the first high-resolution reanalysis data for European region	have been used in Europe recently
4	Japan meteorological agency	east Asia reanalysis data	the reanalysis data for east Asia	paid use, applied in east Asia scientific research

美国海洋气象管理局全球再分析数据呈现为  $1^\circ \times 1^\circ$  分辨网格,每 6 h 分析一次,数值模式采用 GFS 全球模式;数据垂直层次包括地面、1 000~10 hPa 共 26 个气压层次;变量包括地面气压、海平面气压、位势高度、温度、海表面温度、土壤参量、冰覆盖、相对湿度、经纬向风速、垂直运动参量、涡度和臭氧等。以美国海洋气象管理局的大气再分析资料集数据为基础,说明其中国区域数据获取和转化过程:

1) 从美国海洋气象管理局网址获取 NCEP-DOE Reanalysis 2 数据作为基础数据(NCEP-DOE Reanalysis 2 数据是在生成 NCEP-DOE Reanalysis 1 数据的数值模式经过误差订正和物理参数化过程升级后得到的,时间范围从 1979~2018 年,垂直方向 17 层,最高到 10 hPa)。

2) 美国海洋气象管理局每 6 h 再分析资料一次,即每日 00 时(世界时)、06 时、12 时、18 时各有一次数据,将每日的气压、温度和相对湿度数据加和求平均计算出日平均值,再按照月份逐月计算月平均。

3) 将得到的大气参数在中国区域内做区域平均,计算温度、气压和相对湿度在中国区域内随高度变化的平均值。由于美国海洋气象管理局资料是等压面的资料,气压和温度在垂直方向上最高延伸至 10 hPa(约 30 km)的高度,相对湿度在垂直方向上最高延伸至 100 hPa(16 km)的高度,因此设定气压和温度的高度上限为 30 km,相对湿度的高度上限为 16 km。高度大于 16 km 时,水汽含量太少,难以测定,假定其值为零。

进行完美国海洋气象管理局数据大气参数统计分析后,对数据进行数据插值,以形成曲线。不同物理量随高度变化规律不一致,须采用适合参量特点的插值方案,如表 2 所示。

已知气压、温度和相对湿度在不同高度的散点数据，采用 3 次样条插值的插值方法，并结合数值外推方法，可以得到高度范围内的任意高度处的气压、温度和相对湿度数据。3 次样条插值分析计算过程如下：以数组方式设立不同高度下的离散数据点为： $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  ( $i=1, 2, \dots, n$ )，对应大气参数的离散数据点为  $\{y_1, y_2, \dots, y_n\}$  ( $i=1, 2, \dots, n$ )，在每个子区间  $[x_i, x_{i+1}]$  上确定一个 3 次多项式，即 3 次样条插值函数  $S_i(x)(i=1, 2, \dots, n-1)$ ：

$$S_i(x) = a_i x^3 + b_i x^2 + c_i x + d_i \tag{1}$$

式中  $a_i, b_i, c_i, d_i$  待定，且 3 次样条函数满足：

$$\begin{cases} S(x_i) = y_i \\ S(x_i + 0) = S(x_i - 0) \\ S'(x_i + 0) = S'(x_i - 0) \\ S''(x_i + 0) = S''(x_i - 0) \end{cases} \tag{2}$$

式(2)给出  $n+3(n-2)=4n-6$  个条件，需要待定  $4(n-1)$  个系数，需附加 2 个边界条件，本文采用 Matlab 中 spline 函数的默认边界条件(not-a-knot 条件)：

$$\begin{cases} S'''(x_1) = S'''(x_2) \\ S'''(x_n) = S'''(x_{n-1}) \end{cases} \tag{3}$$

上述  $4(n-1)$  个方程，共有  $4(n-1)$  个未知量，求解即可得到 3 次样条差值函数  $S(x)$ ，进而可以求得任意给定的  $\min\{x_1, x_2, \dots, x_n\} \leq x \leq \max\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  对应的  $y$  值。

### 2 ITU-R P.676-11 标准大气衰减计算

参考 ITU-R P.676-11 标准<sup>[11]</sup>，最高至 1 000 GHz 频率上的无线电波在大气中的特征衰减主要由干燥空气和水汽所造成。在任何压力、温度和湿度下，采用累加氧气和水汽各自谐振线的方法，可以相当准确地计算无线电波在大气气体中的特征衰减。这一方法同时也考虑了一些其他相对影响较小的因素，如 10 GHz 以下氧气的非谐振 Debye 频谱，100 GHz 以上的主要由大气压力造成的氮气衰减和计算实验上发现的过多水汽吸收的潮湿连续带。对应 ITU-R P.676 标准，国内也发布了相关的通信行业标准 YD/T 984-1998《卫星通信链路大气和降雨衰减计算方法》<sup>[12]</sup>。根据此模型可以计算出太赫兹波在大气中的传播特性。以典型标准大气环境参量为例(即传播环境参量无变化，设定为大气压 101.3 kPa，温度 15 °C，水汽密度为 7.5 g/m<sup>3</sup>)，基于 ITU 模型编程计算得到干空气和水蒸气在太赫兹波段的特征衰减率曲线，如图 1 所示。

上节详细分析了区域大气再分析资料集数据及其转化方法，基本分析结论是可获取具体区域的相关大气统计参量，即不同高度下，大气压强  $P$ 、绝对温度  $T$  及相对湿度(或水汽压强，可由水汽密度推算)此 3 类基础传播环境参量数据，进而通过 ITU-R P.676-11 标准进行计算，最终得到大气吸收衰减量值。

### 3 太赫兹波大气折射传播路径衰减计算方法

由于地球重力场的存在，大气层质量随着高度改变而变化，形成了大气折射现象。由于大气折射率的不均匀，太赫兹波的传输路径应考虑射线弯曲效应。为了计算倾斜路径的总大气衰减，不仅需知道该路径所经过的每一点的特征衰减，还需知道整个路径的长度。

表 2 大气数据参数插值方式

meteorological elements	coordinate interpolation method(reference potential height)
atmospheric pressure	the air pressure takes logarithm firstly, then refers to the height coordinates, linear interpolation, cubic spline interpolation, cubic interpolation and nearest neighbor interpolation could be used.
temperature	refer to the height coordinates, linear interpolation, cubic spline interpolation, cubic interpolation and nearest neighbor interpolation could be used
relative humidity	refer to the height coordinates, linear interpolation, cubic spline interpolation, cubic interpolation and nearest neighbor interpolation could be used

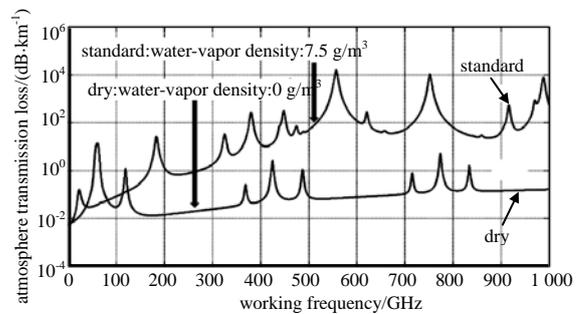


图 1 干空气和水蒸气在太赫兹波段的特征衰减率曲线(ITU)

为了保证路径衰减的计算精确度,采用非均匀分层(维持每层质量大致相等),各层的厚度(km)随高度指数增加,通常由式(4)表示:

$$\delta_i = 0.0001 \exp\left(\frac{i-1}{100}\right) \quad (4)$$

即在最低层(地面)为 10 cm,在 100 km 高度时为 1 km,各层的厚度应以指数级增大。

大气折射效应的太赫兹波大气分层传播建模如图 2 所示,将大气在垂直方向分层,  $a_n$  为无线电波束在第  $n$  层内穿越的长度,  $\delta_n$  为第  $n$  层的厚度,  $n_n$  为第  $n$  层的折射率,  $\alpha_n$  和  $\beta_n$  为第  $n$  层的入射和出射角。  $r_n$  为半径,指从地球中心到第  $n$  层起点的距离。初始的出射角,由余弦公式及 Snell 定律可知:

$$a_i = (r_i + \delta_i) \cos \alpha_i - \sqrt{(r_i + \delta_i)^2 \cos^2 \alpha_i - (\delta_i^2 + 2r_i \delta_i)}, \quad (i=1,2,\dots,N) \quad (5)$$

$$\beta_i = \pi - \arccos\left(\frac{a_i^2 - \delta_i^2 - 2r_i \delta_i}{2r_i a_i}\right), \quad (i=1,2,\dots,N) \quad (6)$$

$$\alpha_{i-1} = \arcsin\left(\sin \beta_i \frac{n_i}{n_{i-1}}\right), \quad (i=1,2,\dots,N) \quad (7)$$

$n$  为大气折射率,可由下式计算:

$$n = 1 + \frac{77.6}{T} \left( P + 4810 \frac{e}{T} \right) \times 10^{-6} \quad (8)$$

已知任意高度的大气参数值(温度  $T$ , 压强  $P$ , 相对湿度  $RH$ ),通过公式计算可得任意高度的水汽压  $e$ ,从而求得任意高度的大气折射率。求得各层的大气吸收率后,则总的大气衰减通过式(9)进行逐层累加得到:

$$A_g = \sum_{i=1}^N a_i \gamma_i \quad (9)$$

由于相对湿度的垂直延展高度只能达到 16 km,因此在计算大气的吸收对太赫兹波衰减的影响时,在 0~16 km 范围内,同时考虑氧气和水汽的吸收作用,当垂直高度大于 16 km 时,仅考虑氧气的吸收作用。

#### 4 飞行器太赫兹波地面探测大气吸收衰减预估软件及算例

基于本文论述的应用大气再分析资料集基础数据进行转化,而后建立太赫兹波大气折射传播路径模型,最终计算得到飞行器太赫兹波地面探测大气吸收衰减的方法,课题组开发了相关计算演示软件。

该演示软件的设计流程图如图 3 所示,主要用来计算和展示飞行器(包括飞机和卫星等)在利用近毫米波(包括太赫兹频段)探地时的大气衰减情况。软件包含了基础的缩放和漫游等交互功能。在地球模型方面,软件支持经纬线、国界线、海岸线、岛屿、湖泊、河流和国家名称等的分类标示,如图 4 所示。在飞行器模拟方面,本软件主要支持飞机和卫星 2 种模型,飞行高度、卫星星下点经度、飞机的经纬度和航向角可以人为设定,飞行器的经纬度和高度可实时显示。

根据本文的计算方法,结合课题组先前相关部分研究过程方法<sup>[13-15]</sup>,参考 ITU-R P.676-11 标准,基于美国国家环境预测中心美国海洋气象管理局再分析气象数据,给出 0.22 THz 工作频段卫星进行 10°~90°俯视角下地面探测的计算结果,如图 5 所示。从图 5 可以看出,0.22 THz 大气吸收衰减随着俯视角和月份变化而变化。当卫星垂直于地面,即俯视角为 90°时,电磁波传播路径最短,且其大气吸收衰减最小。在具体某月份下,电磁波传播路径长度及其大气吸收衰减量值随着俯视角的减小而增大。在具体卫星某俯视角下,在一年 12 个月份中,7 月份的大气吸收衰减量值最大。出现此类现象的原因是 7 月份处于夏季,此时段降雨概率最大,相应的

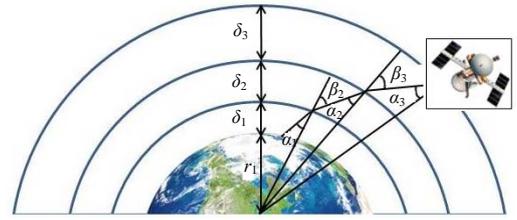


Fig.2 THz wave atmospheric stratification propagation modeling considering atmospheric refraction effect  
图 2 考虑大气折射效应的太赫兹波大气分层传播建模

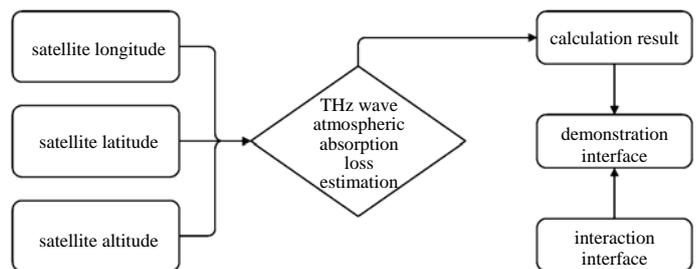


Fig.3 Flow of software design  
图 3 软件设计流程图

大气湿度及温度也较高。同样的原因，处于冬季的 1 月份大气吸收衰减最低。



Fig.4 Software interface of atmospheric absorption attenuation forecast for aircraft THz wave surface detection

图 4 飞行器太赫兹波地面探测大气吸收衰减预估软件界面

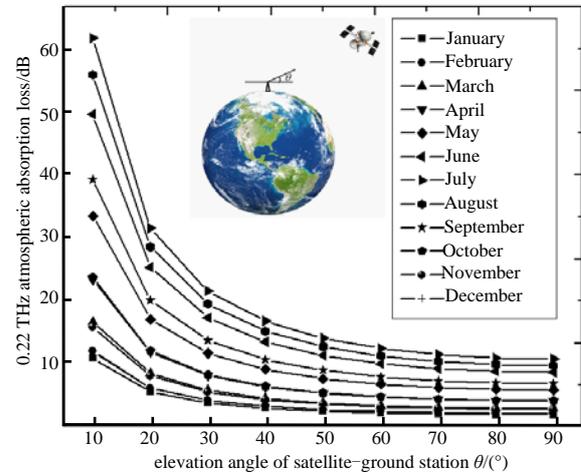


Fig.5 Atmospheric absorption attenuation of satellite ground detection by monthly changing 0.22 THz

图 5 逐月变化 0.22 THz 卫星地面探测大气吸收衰减

## 5 结论

真实的大气观测资料具有观测站点分布不均匀和探测仪器的垂直扩展高度范围小等不利因素存在，因此采用大气再分析资料集数据并加以转化插值的方法替代观测资料进行具体区域大气参数的统计分析是一种合理且有效的方法。在获取沿太赫兹波传播路径的温度、气压和水汽密度分布后，可参考 ITU-R P.676-11 标准直接计算得到最高至 1 000 GHz 频率上的无线电波在大气中的特征衰减。本文开发了飞行器太赫兹波地面探测大气吸收衰减预估软件，论述了其场景设置及基本功能。同时，给出逐月变化的 0.22 THz 工作频段卫星进行 10°~90° 俯视角地面探测的工程算例。通过计算结果比较得出，大气吸收衰减随着俯视角及月份变化而变化，且上述 2 类的变化范围均呈数倍量级。

## 参考文献：

- [1] SIEGEL P H. Terahertz technology[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory Technology, 2002,50(3):910-928.
- [2] 赵明明,余建军. 太赫兹通信系统的研究现状与应用展望[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2018,16(6):931-937. (ZHAO Mingming,YU Jianjun. Terahertz communication system: present and outlook[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2018,16(6):931-937.)
- [3] AKYILDIZA I F,JORNETB J M,HANA C. Terahertz band:next frontier for wireless communication[J]. Physical Communication, 2014(12):16-32.
- [4] PERETTI Romain,MITRYUKOVSKIY Sergey,FROBERGER Kevin,et al. THz-TDS time-trace analysis for the extraction of material and metamaterial parameters[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2019,9(2):136-149.
- [5] GAO Yong,HUANG Yankui,HUO Tingting. Improving THz wireless communication data transmission rates[J]. Electronics Letters, 2018,54(25):1462-1464.
- [6] LIU Kexin,JIA Shi,WANG Shiwei,et al. 100 Gbit/s THz photonic wireless transmission in the 350 GHz band with extended reach[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2018,30(11):1064-1067.
- [7] ZHANG Chaofeng,OTA Kaoru,JIA Juncheng,et al. Breaking the blockage for big data transmission:gigabit road communication in autonomous vehicles[J]. IEEE Communications Magazine, 2018,56(6):152-157.
- [8] 王玉文,董志伟,李瀚宇,等. 太赫兹脉冲大气传输衰减特性[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2015,13(2):208-214. (WANG Yuwen,DONG Zhiwei,LI Hanyu,et al. Atmospheric attenuation characteristics of terahertz pulse propagation[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2015,13(2):208-214.)
- [9] YANG Yihong,MANDEHGAR Mahboubeh,GRISCHKOWSKY D. Determination of the water vapor continuum absorption by THz-TDS and molecular response theory[J]. Optics Express, 2014,22(3):4388-4403.
- [10] LIEBE H J. MPM89—an atmospheric mm-wave propagation model[J]. International Journal of Infrared and Millimeter Waves, 1989,10(6):631-650.
- [11] SERIES P. Attenuation by atmospheric gases[M]. Geneva,Switzerland:International Telecommunications Union, 2016.