

文章编号: 2095-4980(2016)02-0175-05

太赫兹波大气衰减的抛物方程模型

盛楠^{1,2}, 廖成¹, 张青洪¹, 刘强³, 周海京³

(1.西南交通大学 电磁场与微波技术研究所, 四川 成都 610031; 2.中国电子科技集团公司 第10研究所, 四川 成都 610036; 3.北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100094)

摘要: 抛物方程是一种模拟电波传播特性的高效模型, 但目前抛物方程模型在模拟电波传播时, 主要考虑大气的折射效应而忽略了其吸收作用, 然而太赫兹波的大气衰减较为严重。通过引入大气分子吸收的复折射率, 实现了应用抛物方程模型计算太赫兹波的大气衰减。该模型考虑了大气压强、温度和水汽密度等气象参数随高度变化对大气衰减的影响, 且能够针对不同地区和季节的气象条件对大气衰减进行计算, 与真实环境更加符合。最后利用该模型仿真分析了 0.14 THz 波的传播特性, 给出了传播损耗随距离和高度的变化, 并与忽略大气衰减的结果进行了对比, 结果表明抛物方程模型能同时体现太赫兹的大气吸收效应和多径传播效应。

关键词: 太赫兹波; 抛物方程模型; 大气衰减; 大气复折射率

中图分类号: TN124

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201602.0175

Parabolic equation model for calculating atmospheric attenuation of THz wave

SHENG Nan^{1,2}, LIAO Cheng¹, ZHANG Qinghong¹, LIU Qiang³, ZHOU Haijing³

(1. Institute of Electromagnetics, Southwest Jiaotong University, Chengdu Sichuan 610031, China;
2. 10th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Chengdu Sichuan 610036, China;
3. Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100094, China)

Abstract: Parabolic equation is an efficient model to simulate the characteristic of wave propagation. The atmospheric absorption is ignored by parabolic equation model in present; however, the atmospheric attenuation is an important limiting factor of terahertz(THz) communication. Based on the complex refractive index in atmosphere, the parabolic equation model for estimating atmospheric attenuation of THz wave is proposed. The model takes into account the effects of meteorological parameters variation with height and calculates the atmospheric attenuation in different seasons and regions, which matches with the actual environment. Finally, the model is applied to simulate the transmission characteristic of 0.14 THz wave. The propagation losses versus range and height are presented and compared with the results of ignoring atmospheric attenuation.

Key words: terahertz wave; parabolic equation model; atmospheric attenuation; complex refractive index of atmosphere

太赫兹(THz)波一般指频率在 0.1 THz~10 THz 范围内的电磁波, 其波段介于微波和远红外线之间, 是光子学技术与电子学技术宏观与微观的过渡区域。THz 波有非常宽的尚未分配的频带, 并且具有传输速率高、方向性好、安全性高、散射小及穿透性强等特性, 在无线通信领域存在巨大的应用潜力^[1]。因此, 对 THz 波的传播特性开展研究具有重要意义。THz 波在通过大气时, 大气中的水汽和氧气分子会吸收其能量而产生能级跃迁, 从而引起严重的电波衰减^[2-3], 为保证 THz 通信系统的性能, 大气衰减是必须考虑的重要因素。抛物方程(Parabolic Equation, PE)是一种模拟电波传播特性的高效模型, 其本身就能体现电波在均匀媒质中的传播效应, 因此不需要引入额外的传播修正机制, 近年来得到国内外学者的广泛关注和研究^[4-9]。但目前抛物方程在模拟电波传播时, 主要考虑大气的折射效应而忽略了其吸收作用。针对这一问题, 本文结合大气分子吸收的复折射率模型, 根据大气压强、温度和水汽密度随高度的变化, 给出了垂直高度上的大气复折射率剖面。同时, 基于该大气复折射率剖面, 实现了应用抛物方程模型计算 THz 波的大气衰减, 为 THz 波在复杂环境中传播特性的实验提供了理论支持。

收稿日期: 2014-10-29; 修回日期: 2015-04-09

基金项目: 国家自然科学基金委-中国工程物理研究院联合基金资助项目(U1330109); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(No.2682014ZT32)

1 抛物方程模型

直角坐标系中, x, y, z 分别表示传播方向、横向和高度方向, 设电磁场的时谐因子为 $e^{-i\omega t}$, 以标量 u 表示与 y 方向无关的任一电磁场分量, 在电波传播过程中, 若只考虑电波的向前传播, 则由二维亥姆霍兹方程可以得到如下形式的宽角抛物方程(Wide-Angle Parabolic Equation, WAPE)^[5]

$$\frac{\partial u}{\partial x} = ik_0 \left[\sqrt{\frac{1}{k_0^2} \frac{\partial^2}{\partial z^2} + 1 + n - 1} \right] u = 0 \quad (1)$$

式中: $k_0 = 2\pi/\lambda$ 为真空中的传播常数, λ 为波长; n 为大气的复折射指数。为便于研究和应用, 通常采用折射率 N 来代替 n , 其关系为:

$$N = (n - 1) \times 10^6 \quad (2)$$

若考虑地球球面曲率的影响, 则需引入修正折射率参数 M :

$$M = N + 0.157h \quad (3)$$

式中 h 为垂直高度。WAPE 可利用分步傅里叶变换(Split-Step Fourier Transform, SSFT)快速算法求解, 其解的形式为^[7]:

$$u(x + \Delta x, z) = e^{ik_0 \Delta x (n-1)} \mathfrak{F}^{-1} \left[e^{i \Delta x \sqrt{k_0^2 - p^2}} \mathfrak{F}(u(x, z)) \right] \quad (4)$$

式中: $\mathfrak{F}, \mathfrak{F}^{-1}$ 分别表示傅里叶正变换和逆变换; $p = k_0 \sin \alpha$ 为傅里叶变换的频域变量, α 为电波的掠射角。SSFT 算法利用快速傅里叶变换结合步进方法, 且其空间步长几乎不受电磁波波长的限制, 非常适合求解大尺度范围内的电波传播问题。

从式(4)抛物方程解的形式可以看出, 折射指数项 $e^{ik_0 \Delta x (n-1)}$ 反映了大气环境对电波传播的影响, 因此本文在利用抛物方程法计算 THz 波的大气衰减时, 首先研究大气复折射率模型。

2 大气复折射率

大气复折射率 N 由常折射率 N_0 和与频率相关的色散项 2 部分组成^[10]:

$$N = N_0 + N(f) \quad (5)$$

式中常折射率 N_0 可表示为:

$$N_0 = \frac{77.64 \times P}{T} + \frac{3.73 \times 10^5 e_w}{T^2} \quad (6)$$

式中: P 为大气压强; T 为大气绝对温度; e_w 为水汽压强。

大气吸收复折射率的实部和虚部取决于大气分子中氧气和水汽分子所有吸收谱线贡献的总和, 因此色散项 $N(f)$ 的实部 $N'(f)$ 和虚部 $N''(f)$ 的解析式可表示为:

$$\begin{cases} N'(f) = \sum_i S_i F_i' + N_D'(f) \\ N''(f) = \sum_i S_i F_i'' + N_D''(f) \end{cases} \quad (7)$$

式中: S_i 为第 i 条吸收谱线强度; F_i' 和 F_i'' 分别为第 i 条吸收谱线形状因子的实部和虚部; $N_D'(f)$ 和 $N_D''(f)$ 分别为大气压力造成的氮气吸收和 Debye 频谱的干燥连续带的实部和虚部。文献[11]详细给出了上述参数的求解方法, 这里不再叙述。

因此, 根据式(5)~式(7)可求出任意气象条件下不同频率的大气复折射率 N 。图 1 给出了标准海平面气象条件下($P=1013 \text{ hPa}$, 温度 $t=15 \text{ }^\circ\text{C}$, 水汽密度 $\rho=7.5 \text{ g/m}^3$)大气复折射率 N 随频率的变化情况, 其中频率在 $1 \text{ GHz} \sim 1000 \text{ GHz}$ 范围内。图 1(a)显示了实部与频率的关系, 从图中可以看出, 大气复折射率的实部由若干个反常色散区和正常色散区组成。在反常色散区, 实部随频率增加而急剧降低; 在正常色散区, 实部随频率增加而增大。图 1(b)显示了大气复折射率的虚部 $N''(f)$ 与频率的关系, 可以知道大气复折射率的虚部出现若干尖峰, 其尖峰为大气的吸收峰。折射率的反常色散通常与吸收峰相对应, 在图 1(a)所表示的折射率中, 有 3 个很明显的反常色散区, 它们对应了图 1(b)中 3 个很强的吸收峰。而图 1(b)中其他吸收峰对应的反常色散区相对于 3 个明显反常色散区的数值较小, 因此在图 1(a)中没有明显表示。

大气复折射率 N 与大气压强、温度和水汽密度 3 个气象参数相关, 事实上气象参数通常随着海拔高度、季

节、昼夜、地理位置和大气活动等变化, 研究大气吸收衰减时应该以当地气象参数为准。若无法获取更可靠的气象参数时, 可根据国际电联无线电通信部门(International Telecommunications Union-Radio Communications Sector, ITU-R)推荐使用的全球各地区不同季节的气象参数^[12]。在海拔高度为 11 km 的对流层以内, 全球年度平均分布的气象参数 P, T 和 ρ 随高度 h 的变化关系为:

$$\begin{cases} P(h) = P_0 [T_0 / (T_0 + L_0 h)]^{34.163/L_0} \\ T(h) = T_0 + L_0 h \\ \rho(h) = \rho_0 \exp(-h/h_0) \end{cases} \quad (8)$$

式中: P_0, T_0 和 ρ_0 为标准海平面气象参数; $L_0 = -6.5$ K/km 是温度梯度; $h_0 = 2$ km 为大气水汽密度标高。式(8)说明: a) 由于重力的作用, 大气压强随高度的增加而逐渐递减; b) 在对流层, 温度随高度的增加而呈线性减小; c) 水汽密度随高度的增加而呈指数衰减。

文献[12]同时给出了不同地区气象参数随季节的变化情况, 其中在海拔高度为 10 km 以内, 中纬度(在 22°和 45°之间)地区夏季气象条件可由以下公式计算:

$$\begin{cases} P(h) = 1012.8186 - 111.5569h + 3.8646h^2 \\ T(h) = 294.9838 - 5.2159h - 0.07109h^2 \\ \rho(h) = 14.3542 \exp(-0.4174h - 0.0229h^2 + 0.001007h^3) \end{cases} \quad (9)$$

根据气象参数 P, T 和 ρ 随高度的变化情况, 并考虑地球曲率的影响, 可以得到大气复折射率垂直剖面。图 2 给出了全球年度平均和中纬度夏季气象条件下, 大气窗口频率 0.14 THz 的大气复折射率垂直剖面。可以看出: a) 由于气象参数随高度的变化, 在高度 1 km 以内, 大气复折射率的虚部随高度升高而减小, 但由于受到地球曲率的影响, 其实部随高度线性增加; b) 不同地区、季节的大气复折射率存在差异, 中纬度夏季条件明显高于全球年度平均值, 但差值随高度的增加逐渐减小。

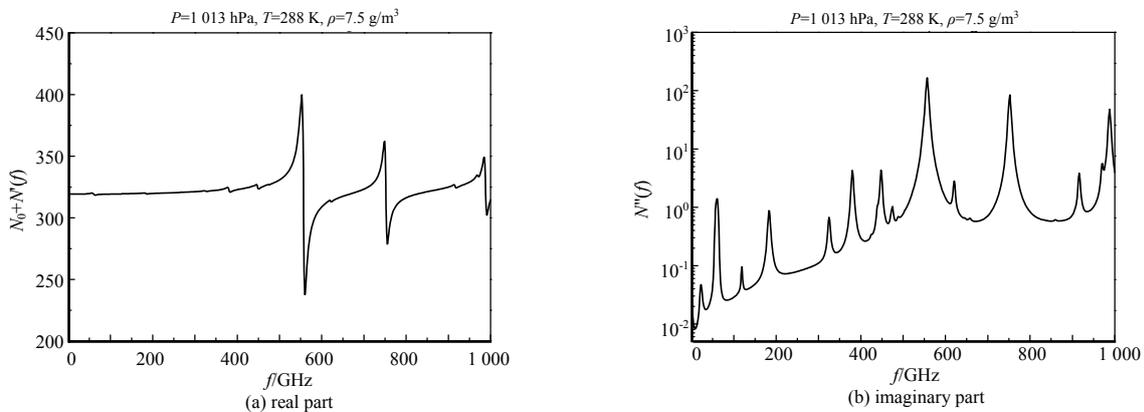


Fig.1 Complex refractive index of atmosphere versus frequencies

图 1 大气复折射率随频率变化情况

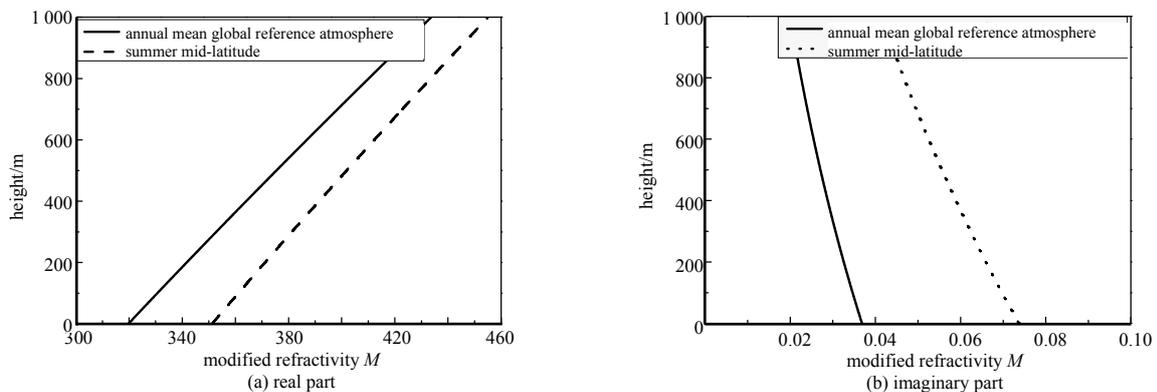


Fig.2 Complex refractive index of atmosphere versus heights

图 2 大气复折射率垂直剖面

3 太赫兹波大气衰减特性分析

基于大气吸收的复折射率，利用抛物方程模型可模拟 THz 波在复杂环境中的传播特性。本文以典型的大气窗口 0.14 THz 波为例，假设发射天线放置在距地表高 10 m 的位置，波束宽度为 1°，水平极化方式，地表为平坦的中等干燥地面。本文选择 2 种情况进行模拟：a) 不考虑大气衰减；b) 中纬度夏季气象条件(折射率剖面如图 2 所示)。图 3 为利用抛物方程模型得到的在发射天线高度(10 m)上传播损耗随距离的变化。图 4 和图 5 分别为在传输距离 5 km 处 2 种情况下的传播损耗以及其差值随高度的变化情况。

从图 3 可以看出:a) 本文的抛物方程模型同时体现了电波的多径传播效应和大气衰减效应；b) 随着传播距离的增加，0.14 THz 波的大气衰减逐渐增大，在距离 5 km 和 10 km 处由大气吸收引起的衰减分别达到 9 dB 和 18 dB 左右。图 4 和图 5 表明大气衰减随着高度的增加逐渐减小，这与理论分析结果一致，因此采用固定衰减率会给计算结果带来一定的误差。同时，从图 4 可以看出，在垂直高度上，电波损耗随着与发射天线距离的增加而增大。

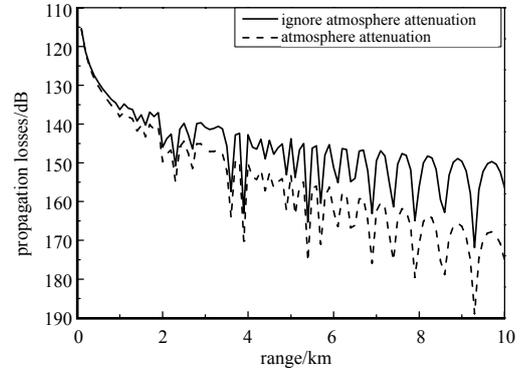


Fig.3 Propagation losses versus ranges
图 3 传播损耗随距离的变化

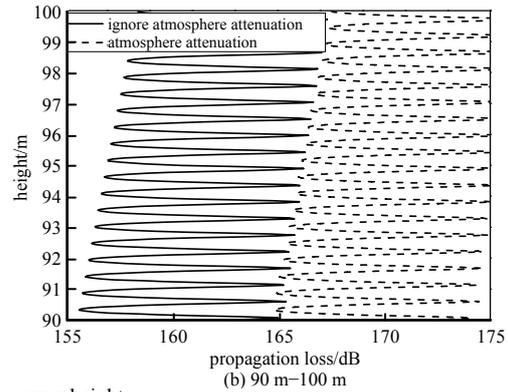
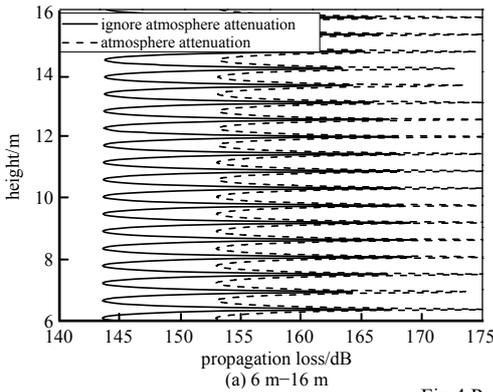


Fig.4 Propagation losses versus heights
图 4 传播损耗随高度的变化

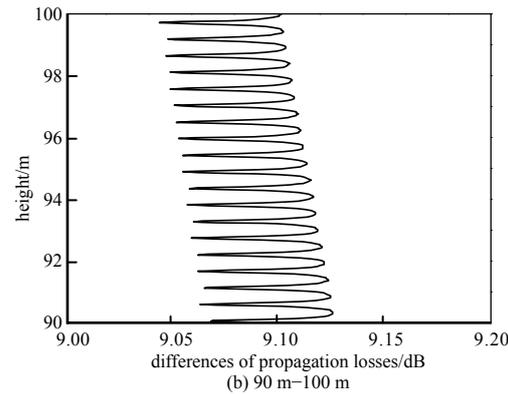
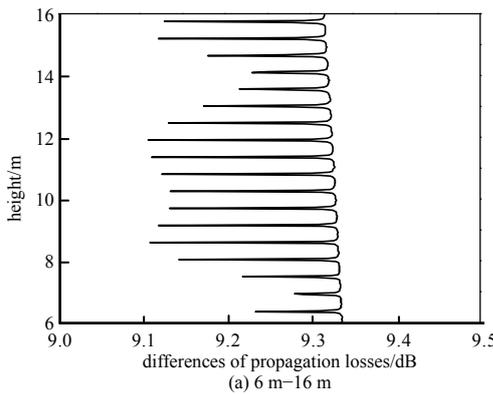


Fig.5 Differences of propagation losses versus heights
图 5 传播损耗差值随高度的变化

4 结论

太赫兹通信是一个极具应用前景的技术，而大气衰减严重影响 THz 通信系统的性能。本文通过引入大气吸收的复折射率，根据大气压强、温度和水汽密度随高度的变化，实现了应用抛物方程模型模拟 THz 波的大气衰减。利用该模型模拟分析了 0.14 THz 波的传播特性，仿真结果表明，该模型：a) 可同时体现电波的多径传播效应和大气衰减效应；b) 考虑了气象参数随高度变化对大气衰减的影响，与真实环境更加符合；c) 能够针对不同

地区和季节的气象条件对大气衰减进行计算,更真实准确地描述了电磁波的大气衰减特性。本文提出的模型可快速求解 THz 波在复杂环境中的传播特性,为 THz 通信系统的设计提供了重要的参考依据。

参考文献:

- [1] 姚建铨,迟楠,杨鹏飞,等. 太赫兹通信技术的研究与展望[J]. 中国激光, 2009,36(9):2213-2233. (YAO Jianquan,CHI Nan,YANG Pengfei,et al. Study and outlook of terahertz communication technology[J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(9):2213-2233.)
- [2] 王成,林长星,邓贤进,等. 140 GHz 高速无线通信技术研究[J]. 电子与信息学报, 2011,33(9):2263-2267. (WANG Cheng,LIN Changxing,DENG Xianjin,et al. 140 GHz data rate wireless communication technology research[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2011,33(9):2263-2267.)
- [3] 李瀚宇,董志伟,周海京,等. 太赫兹电磁波大气吸收衰减逐线积分计算[J]. 强激光与粒子束, 2013,25(6):1445-1449. (LI Hanyu,DONG Zhiwei,ZHOU Haijing,et al. Calculation of atmospheric attenuation of THz electromagnetic wave through line by line integral[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013,25(6):1445-1449.)
- [4] APAYDIN G,SEVGI L. Two-way propagation modeling in waveguides with three-dimensional finite-element and split-step Fourier-based PE approaches[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2011,10:975-978.
- [5] SHENG Nan,LIAO Cheng,LIN Wenbin,et al. Modeling of millimeter wave propagation in rain based on parabolic equation method[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2014,13:3-6.
- [6] 张青洪,廖成,盛楠,等. 森林环境电波传播抛物方程模型的改进研究[J]. 物理学报, 2013,62(20):204101. (ZHANG Qinghong,LIAO Cheng,SHENG Nan,et al. Improved study on parabolic equation model for radio wave propagation in forest[J]. Acta Phys Sin, 2013,62(20):204101.)
- [7] 盛楠,廖成,张青洪,等. 预测毫米波雾衰减的抛物方程模型研究[J]. 电子学报, 2013,42(5):958-962. (SHENG Nan, LIAO Cheng,ZHANG Qinghong,et al. The parabolic equation model for estimating fog attenuation at millimeter wavelengths[J]. Acta Electronica Sinica, 2013,42(5):958-962.)
- [8] 盛楠,廖成,张青洪,等. 基于 OpenMP 的多辐射源二维电波传播预测方法[J]. 电波科学学报, 2013,28(4):611-615. (SHENG Nan,LIAO Cheng,ZHANG Qinghong,et al. Approach for modeling 2-D radio wave propagation of multi radiation sources based on OpenMP[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2013,28(4):611-615.)
- [9] 张青洪,廖成,盛楠,等. 抛物方程方法的亚网格模型及其应用研究[J]. 电子与信息学报, 2014,36(8):2005-2009. (ZHANG Qinghong,LIAO Cheng,SHENG Nan,et al. Study on subgridding model of the parabolic equation and its application[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2014,36(8):2005-2009.)
- [10] 熊皓. 无线电波传播[M]. 北京:电子工业出版社, 2000:487-501. (XIONG Hao. Radiowave Propagation[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2000:487-501.)
- [11] ITU-R. Attenuation by atmospheric gases[S]. ITU-R Recommendation P.676-9, Geneva, 2012.
- [12] ITU-R. Reference Standard Atmospheres[S]. ITU-R Recommendation P. 835-5, Geneva, 2012.

作者简介:



盛楠(1986-),男,吉林省公主岭市人,博士,主要从事电波传播理论与系统级电磁兼容研究.email:Aaronsheng@my.swjtu.edu.cn.

张青洪(1986-),男,湖南省邵阳市人,在读博士研究生,主要从事电波传播理论与电磁场数值计算研究.

刘强(1987-),男,重庆市人,硕士,主要从事系统级电磁兼容、超材料应用、天线设计等方面的研究.

廖成(1964-),男,重庆市人,教授,博士生导师,主要从事计算电磁学、电磁散射与逆散射和天线理论及应用研究.

周海京(1970-),男,江苏省建湖市人,博士,研究员,主要从事高功率电磁学及计算电磁学的应用研究.