

DOI:10.19651/j.cnki.emt.1802344

基于抛物方程的湍流散射研究*

樊文科 冯菊 周亮 廖成

(西南交通大学 电磁场与微波技术研究所 成都 610031)

摘要: 在远距离的电磁信号传输过程中,大气散射会对微波传输产生不可忽视的影响。为了定量分析这种影响,从大气湍流的结构出发,在同时考虑湿度以及温度的基础上得到电波波段的湍流大气结构常数,然后基于统计随机理论建立了湍流大气散射模型,采用抛物方程模拟并分析了大气湍流对微波传输的影响。仿真结果表明,大气湍流引起的散射效应在超视距区域才趋于明显;随着传播距离的增加,沿传播方向的场强幅度出现随机的起伏;大气散射效应会随着高度的增加而减弱。

关键词: 大气湍流;大气结构常数;抛物方程方法;湍流散射;超视距传播

中图分类号: TN926 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1015

The study of turbulent scattering based on parabolic equation

Fan Wenke Feng Ju Zhou Liang Liao Cheng

(School of Physical Science and Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: In the process of long-distance electromagnetic signal transmission, atmospheric scattering will have a negligible effect on microwave transmission. In order to analyze this effect quantitatively, the turbulent atmospheric structure constant of the microwave section is obtained on the basis of the structure of atmospheric turbulence, and the humidity and temperature are considered simultaneously. Then the turbulence atmospheric scattering model is established based on the statistical random theory. The effect of atmospheric turbulence on the microwave transmission is simulated and analyzed by the parabolic equation. The simulation results show that the scattering effect caused by atmospheric turbulence tends to be obvious in the over the horizon. With the increase of the propagation distance, the amplitude of the field intensity along the propagation direction fluctuates randomly, and the atmospheric scattering effect will weaken with the increase of height.

Keywords: turbulent; atmospheric structure constant; parabolic equation; atmospheric scattering; beyond-the-horizon propagation

0 引言

目前,微波中继通信已成为长途干线的主要传输方式之一。一般在设计微波线路时由非正常视距传播方式(如大气散射、大气波导传播等)产生的干扰会对系统性能产生明显影响。处理大气环境中电波传播问题的方法主要有射线跟踪法、几何光学法和模式理论等^[1]。这些模型在处理大气环境中的电波传播问题时难以考虑大气湍流的影响。由波动方程推导而来的抛物方程(parabolic equation, PE)方法^[2]能同时考虑到大气环境的变化以及地形媒质引起的电磁波绕射、反射、折射等效应,在采用快速傅里叶变换后,能够对整个空间区域的电磁态势分布快速地做出预测,基

于这些优点,抛物方程算法在大尺度电波传播特性预测中得到了广泛的应用^[3]。

大气对电波传播的影响主要取决于大气折射指数。在一般情况下,大气环境的温度、气压和水汽密度都是随海拔高度的增加而减小的,从而导致大气折射指数不断减小。当大气中存在一种不规则的涡旋性大气湍流运动时,就会形成许多涡旋气团;在湍流运动中,气团本身的温度和水汽密度几乎不变,而其周围大气的温度和湿度却不断发生变化,从而使涡旋气团内部及其周围大气的介电常数分布产生随机起伏,导致介质特性的团状不均匀性,团状不均匀的大气媒质会显著改变大气媒质的电参数,在宏观上表现为大气折射指数的异常变化^[4]。

收稿日期:2018-11-29

* 基金项目:国家自然科学基金(61801405)项目资助

目前人们对大气湍流散射的研究主要集中在湍流大气对激光传输的影响^[5],在微波频段,戴无惧^[6]采取固定站点间年均中值的方法来预测大气湍流散射,这种过程估算对固定站点虽然可行,但是却不能实时、灵活、机动地预测任意站点间散射损耗;孙方等^[7]、温亚萍等^[8]结合湍流非相干散射理论与 PE 方法预测湍流大气及大气波导内散射传输损耗;Li 等^[9]通过选择最大计算高度和最大传播角的方法,提出了分步对流层散射广角抛物方程。但是这些研究均没有考虑复杂地形以及具体的大气折射指数的分布情况,并不能反映复杂地形上空湍流在梯度上的变化。因此,研究了电磁波频段内更实用、考虑不规则地形上空的湍流散射模型。

本文研究了大气湍流的机理,同时考虑了温度、湿度以及风速等参数对大气结构常数分布的影响,得到了电磁波的大气结构常数模型。在此基础上将随机散射理论引入地形抛物方程模型,通过文献结果对比验证了提出模型的正确性,并模拟分析了不规则地形上的大气湍流散射效应。结果表明,大气散射主要对远距离的低空位置产生影响,并能形成超视距传播。

1 抛物方程模型

在二维直角坐标系 (x, z) 中,假设电磁场的时谐因子为 $e^{-i\omega t}$,电场或磁场分量 $\psi(x, z)$ 满足如下形式的二维标量 Helmholtz 方程^[10]。

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} + k_0^2 n^2\right) \psi(x, z) = 0 \quad (1)$$

式中: k_0 为自由空间的传播常数; n 为媒质的折射指数。令沿 x 轴正方向传播的波函数为 $u(x, z) = e^{-ik_0 x} \psi(x, z)$,代入式(1)并对其进行因式分解可得:

$$\left[\frac{\partial}{\partial x} + ik_0(1-Q)\right] \left[\frac{\partial}{\partial x} + ik_0(1+Q)\right] u(x, z) = 0 \quad (2)$$

式中: Q 称为伪微分算子。

$$Q = \sqrt{\frac{1}{k_0^2} \frac{\partial^2}{\partial z^2} + n^2(x, z)} \quad (3)$$

这里仅考虑电磁波的前向传播,得到前向抛物方程。

$$\frac{\partial u(x, z)}{\partial x} = -ik_0(1-Q) \quad (4)$$

对算子 Q 采用 Feit-Fleck 近似,并代入式(4)中可得到如下形式的宽角抛物方程。

$$\frac{\partial u(x, z)}{\partial x} = -ik_0 \left[\sqrt{1 + \frac{1}{k_0^2} \frac{\partial^2}{\partial z^2}} + n(x, z) - 2 \right] u(x, z) \quad (5)$$

对式(5)采用分布傅里叶变换(split-step fourier transform, SSFT)算法进行求解,可以得到如下形式的递推公式^[11]。

$$\psi(x + \Delta x, z) = e^{-ik_0(m-2)\Delta x} \mathfrak{S}^{-1} \{ e^{i\Delta x \sqrt{k_0^2 - p^2}} \mathfrak{S}[\psi(x, z)] \} \quad (6)$$

式中: $\mathfrak{S}$ 和 $\mathfrak{S}^{-1}$ 分别表示傅里叶正变换和逆变换, $p = k \sin \theta$ 为空间频率, $m = n + h/R_e$ 为考虑地球曲率影响后的等效折射指数, h 为距地面高度, R_e 为等效地球半径。

2 湍流大气结构模型

由于太阳辐射产生的大气温度、气压和湿度等因素的变化导致大气流动速度随机改变,使得气体内各部分速度不一样的随机混沌现象叫做大气湍流。大气湍流中的大气密度随机变化,从而导致大气折射率的随机变化。这些变化的累积效应使得折射率轮廓明显不均匀。量度大气折射率起伏强度的量,称为大气折射率结构常数 C_n^2 。电磁波在湍流大气中传播时,大气结构常数 C_n^2 模型至关重要。小尺度的湍流表现出衍射效应,大尺度湍流便显现出折射效应^[12]。大气湍流模型如图 1 所示。

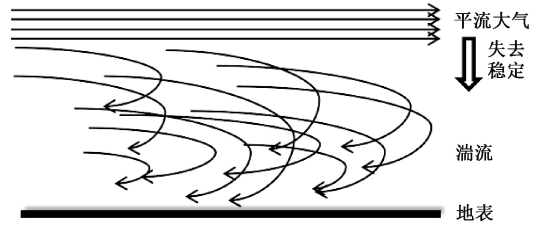


图 1 湍流模型

由于温度和湿度对大气折射率结构常数影响较大,因此 C_n^2 在电波波段上可以表示为下面两项之和^[13]。

$$C_n^2 = C_{nT}^2 + C_{nU}^2 \quad (7)$$

式中: C_{nT}^2 和 C_{nU}^2 分别是温度和湿度因素项。结合 ITU-R 和 Karasawa 经验模型,得到^[14]:

$$C_n^2 = 8.148 \times 10^{-56} v_{rms}^2 h^{10} \exp(-h/1000) + C_0 \exp(-h/100) + 6.4048 \times 10^{-12} h^{-11/6} N_{wet}^2 + 2.7 \times 10^{-16} \exp(-h/1500) \quad (8)$$

$$v_{rms}^2 = v_g^2 + 30.69 v_g + 348.91 \quad (9)$$

式中: v_g 为近地面风速; v_{rms}^2 为沿垂直路径的均方根风速,单位为 m/s; C_0 为一常量。

$$C_0 = 3.9 \times 10^{-12} m^{-2/3} \quad (10)$$

N_{wet}^2 为 ITU-R 模型中随高度变化的湿度项,表示为:

$$N_{wet}^2 = \frac{22790 U e^{\frac{18.75}{T-273}}}{(T+273)^2} \quad (11)$$

由相关文献给出温度 T 与湿度 U 关于高度 h 变化的关系^[15]。

$$T = t_0 - 0.006047h \quad (h < 12970 \text{ m}) \quad (12)$$

这里 $t_0 = 28.85^\circ\text{C}$ 为近地面温度。

$$U = \begin{cases} u_0 - 0.0096h & h \leq 5000 \\ 28.8 & 5000 \leq h \leq 10000 (\%) \\ 28.8 - 0.00566(h - 10^4) & 10^4 \leq h \leq 1.5 \times 10^4 \end{cases} \quad (13)$$

式中: $u_0 = 76.8\%$ 为近地面的相对湿度值。

大气湍流会引起折射率的随机起伏,根据统计随机理论,给出随机扰动^[16]。

$$n_f = \frac{r - 0.5}{0.408} \sqrt{S_N(k)}$$

(14)

式中: r 为 $[0, 1]$ 之间的均匀分布的随机数; k 为湍流尺度大小; 折射率功率谱 $S_N(k)$ 如下。

$$S_N(k) = 0.249 C_n^2 k^{-5/3}$$

(15)

在处理湍流大气时,根据实际测得的近地面温度 t_0 , 近地面的相对湿度值 u_0 和为近地面风速 v_g , 从而得到实时的大气大气折射率结构常数 C_n^2 , 利用式(14)求得大气湍流导致的折射率变化, 加上标准大气的折射率 n 代入 PE 方程进行仿真计算。

3 仿真模拟分析

为了验证本文 PE 算法处理大气湍流以及地形散射的正确性, 采用 PE 法计算水平地表传播损耗随距离的变化情况。设初始场为高斯波源, 3 dB 带宽 5° , 发射天线高度为 $H_t = 23.5$ m, 频率 $f = 220$ MHz, 地表电磁参数为 $\epsilon_r = 80, \sigma = 4.0$ S/m, 电波水平极化。如图 2 所示的最大传播距离为 $R_{\max} = 700$ km。如图 3 所示最大传播距离为 2 000 m。从图 2 可以看出, PE 方法和文献[16]中的测量的数据非常吻合, 验证了大气散射抛物方程的正确性, 从结果对比中也可以看出, 不考虑大气散射的抛物方程模型在计算距离较远时会产生较大的计算误差。图 3 所示为在地形高度为 300 m, 传播距离为 2 000 m 时场值大小随水平距离的变化, PE 法与矩量法^[17] (method of moments, MoM) 计算得到场值变化趋势基本一致, 验证算法处理地形的正确性。

表 1 所示为电波传播不同距离后 PE 散射模型的计算、测量数据以及 PE 不考虑散射的传播损耗的对比。从

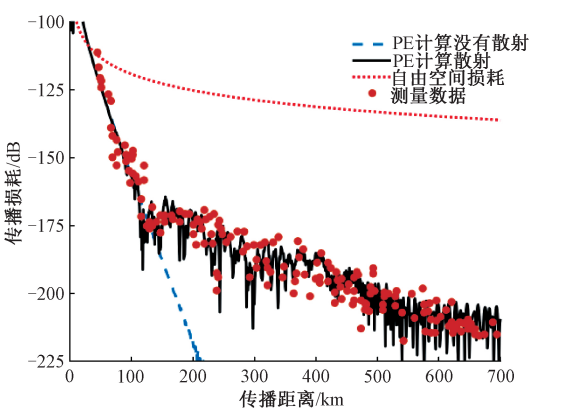


图 2 PE 大气算法验证

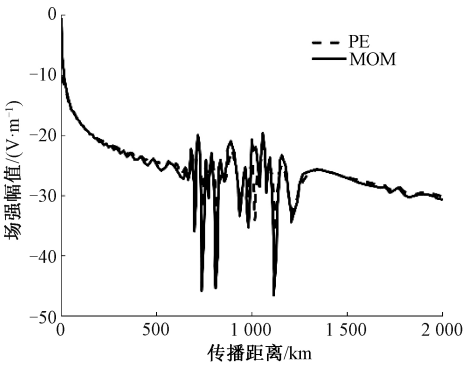


图 3 PE 地形算法验证

表 1 中可以看出, 不考虑散射的情况下, PE 计算与传播距离远处 (>200 km) 测试误差极大; PE 散射模型计算结果与测量结果差距很小, 即证明算法的正确性。

表 1 PE 法与测量数据对比

PE 法与 测量数据	传播经过不同距离处的传播损耗/dB						
	100 km	200 km	300 km	400 km	500 km	600 km	700 km
PE 有散射	-157.01	-173.54	-194.75	-185.26	-201.01	-210.22	-209.83
测量数据	-150.46	-176.47	-183.21	-188.70	-199.14	-208.60	-214.08
PE 无散射	-156.68	-218.38	-236.69	-239.80	-244.56	-248.08	-251.64

为了研究湍流对微波传播的影响, 考虑地球曲率以及标准大气, 采用湍流大气散射模型对某一地形上电波传播进行预测。发射天线高度为距离地面 100 m, 频率 $f = 300$ MHz。近地面风速 $v_g = 2$ m/s, 近地面温度 $t_0 = 20^\circ\text{C}$, 近地面的相对湿度 $u_0 = 75\%$ 。

图 4(a) 和 (b) 所示为没有湍流和存在湍流情况下的电波传播模拟。由于大气湍流对微波传播产生的影响具有累积效应, 也要考虑地球曲率和地形的遮挡效应, 所以从伪彩图上可以看出: 1) 电波大约传播了 50 km 之后大气散射的作用逐渐趋于明显; 2) 在传播至 200 km 处低空上, 大

气湍流所产生散射效应成为传播机制之一, 存在湍流散射时能接收到较强的电波信号。

图 5 所示为电波在 200 m 高度上传播损耗随距离变化的关系。电波在传播至 200 km 处后, 含有地形的传播损耗比水平地面的传播损耗约衰减 15 dB; 含有湍流散射能提高约 30 dB, 说明在远距离传输中, 湍流散射能量衰减更少。

图 6 所示为 200 m 高度上是否含有湍流的传播因子分布情况, 由图 6(a) 可看出, 受地球曲率的影响, 电波在没有湍流散射的地形上空能量迅速衰减, 在传播较远距离

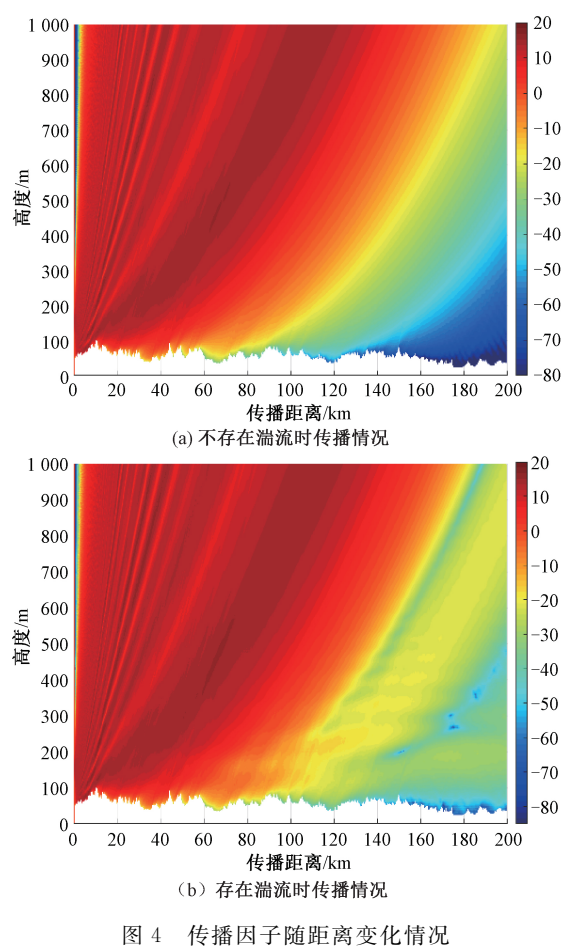


图 4 传播因子随距离变化情况

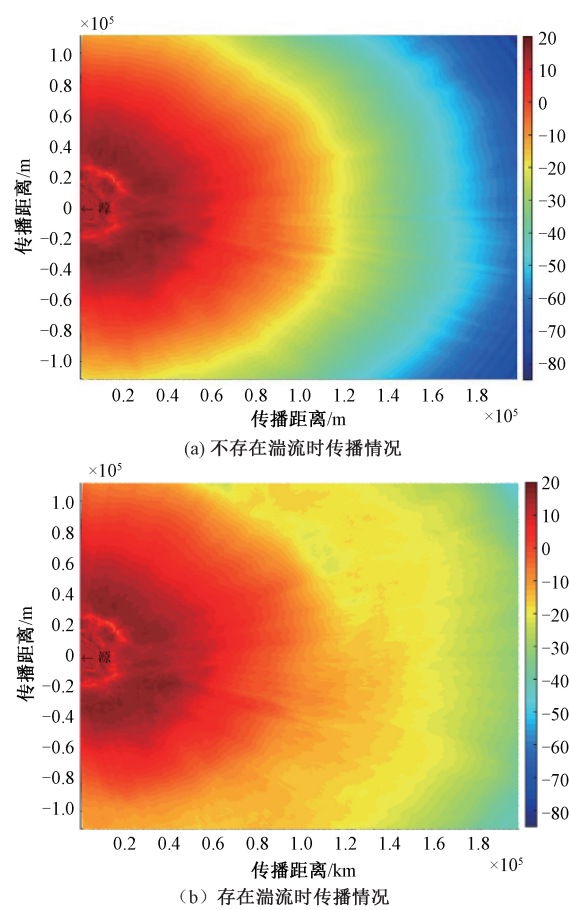


图 6 200 m 高度传播因子分布

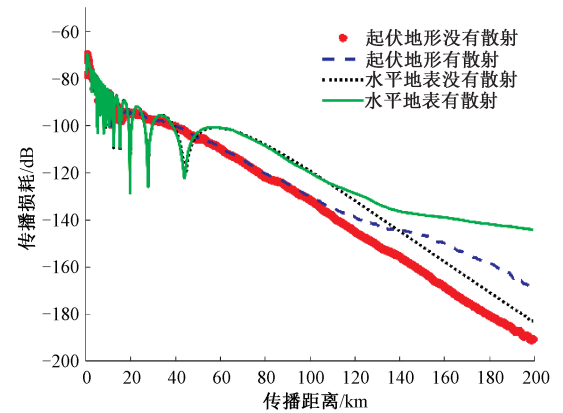


图 5 传播损耗随距离变化(200 m 高度)

后能接收到的能量很少。由图 6(b)可看出,湍流散射对距离源较近范围内传播影响不显著,随着距离继续增加,电波的随机起伏抖动变得越加明显,在传播至一定距离后衰减减缓,在大于 200 km 时成为重要的传播机理之一,产生显著的超视距传播现象。

图 7 所示为在传播距离 200 km 处的传播损耗随高度的变化情况。由于地球曲率影响,随着高度的增加,电波

传播损耗会显著降低;可以看出,地形遮挡效应会导致低空(200 m 以下)的电场衰减较大;由于高空大气稀薄,大气折射指数变化较小,同时,大气散射效应会随着高度的增加而降低,所以在 1 600 m 高度以上,是否考虑大气散射效应差别不大。大气散射主要对远距离的低空位置产生影响。

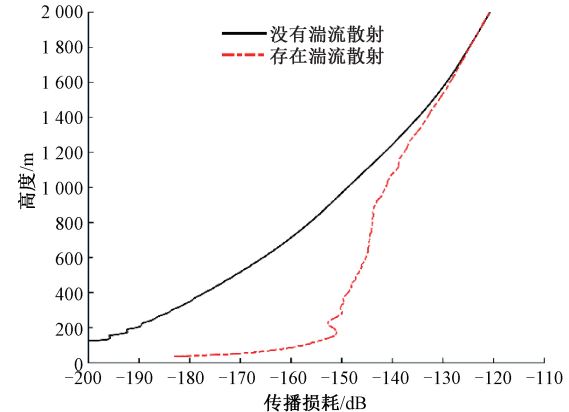


图 7 传播损耗随高度变化(200 km 处)

4 结 论

本文研究了包含复杂地形的大气湍流散射对电波传播的影响。相比以往的研究,考虑了包含复杂地形的湍流情况,并且给出了电波波段上的大气结构常数模型,本文模型能考虑到温度与湿度的影响且能很好地运用在电波频段上。对地形上空大气湍流的电波传播过程进行模拟仿真,结果表明,在视距区大气湍流对路径损耗的影响较小,而在超视距区,大气湍流引起的电磁散射显著影响信号接收电平,产生超视距现象;随着传播距离的增加,电波的多径效应趋于明显,沿传播方向的场强幅度出现随机的起伏;大气散射效应会随着高度的增加而减弱。大气散射主要对远距离的低空位置产生影响。下一步工作重点是在现有基础上,研究电波在降雨、大雾或者沙尘暴等环境下引起的大气散射问题。

参考文献

- [1] ZHANG X Q, NEERAJ S, COSTAS D S, et al. Propagation modeling in complex tunnel environments: A comparison of vector parabolic equation and ray-tracing solutions[C]. International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications, 2017: 1676-1679.
- [2] LEONTOVICH M, FOCK V. Solution of the problem of propagation of electromagnetic waves along the earth's surface by the method of parabolic equation[J]. Journal of Physics USSR, 1946(7):557-573.
- [3] 王亚伟,廖成,张东民,等.基于谷歌地球的二维电波传播预测[J].电子测量技术,2018,41(6):40-44.
- [4] 徐春燕,詹国伟,青春,等.陆地和近海面大气光学湍流估算与测量[J].强激光与粒子束,2018,30(2):27-31.
- [5] 刘兵,王巨胜,杨泽后,等.基于非视线红外激光大气散射通信技术研究[J].激光技术,2014,38(6):854-858.
- [6] 戴无惧.微波通信中大气散射干扰的工程估算[J].无线通信技术,1996(2):7-10.
- [7] 孙方,赵振维,王红光,等.海上湍流效应对大气波导传播的影响[J].现代雷达,2011,33(2):13-17.
- [8] 温亚萍,刘丽哲,赵显超,等.一种基于抛物方程的散射传输损耗预测方法[J].无线电通信技术,2014,40(5):27-29.

- [9] LI L, LIN L K, WU Z S, et al. Study on the maximum calculation height and the maximum propagation angle of the troposcatter wide-angle parabolic equation method [J]. Iet Microwaves Antennas & Propagation, 2016, 10(6): 686-691.
- [10] HARDIN R H, TAPPERT F D. Application of the split-step Fourier method to the numerical solution of nonlinear and variable coefficient wave equations[J]. Siam Review, 1973, 15(423): 423.
- [11] LEVY M. Parabolic equation methods for electromagnetic wave propagation [J]. IEE Electromagnetic Waves, 2000, 26(1-4): 352.
- [12] BOURLIER C. Propagation and scattering in a ducting maritime environment from a fast method of moments[C]. International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications, 2017: 368-371.
- [13] 魏浩,胡明宝,艾未华.微波波段大气折射率结构常数的仿真研究[J].气象科学,2016,36(5):667-673.
- [14] YANG R, WU Z, LI Y, et al. Model for estimating the atmosphere structure constant at millimeter-wave on earth-space paths [J]. International Journal of Infrared & Millimeter Waves, 2002, 23 (11): 1603-1610.
- [15] CUCCOLI F, FACHERIS L, TANELLI S, et al. Microwave attenuation measurements in satellite-ground links: the potential of spectral analysis for water vapor profiles retrieval[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2001, 39 (3): 645-654.
- [16] HITNEY H V. A practical tropospheric scatter model using the parabolic equation[J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 1993, 41(7): 905-909.
- [17] 耿方志,董丽娟,邓发升.雷达散射截面的矩量法计算[J].光电技术应用,2005(1):30-32,42.

作者简介

樊文科,1993 年出生,硕士研究生,主要研究方向为天线理论与电波传播。

E-mail:786977175@qq.com