

文章编号:1009-3087(2014)02-0116-05

月表环境无线电波传播分段预测模型

朱秋明^{1,2}, 黄攀¹, 陈学强¹, 王成华¹, 王凤宇³, 周生奎¹

(1. 南京航空航天大学 电子信息工程学院, 江苏 南京 210016; 2. 中国空空导弹研究院, 河南 洛阳 417009;
3. 北京空间飞行器总体设计部, 北京 100094)

摘要:针对经典无线电波传播模型不适用于月球特殊的传播环境问题,提出一种月表环境下电波传播损耗分段预测模型。该模型首先建立包含自由空间段、月面反射段和月球绕射段的理想分段预测模型,并给出不同区间内传播损耗预测算法,然后考虑传播路径剖面上多重障碍物导致的额外损耗,以及其对分段区间参数的修正方法。将其应用于美国国家航天局提供的月表实际场景,仿真结果表明,该模型预测结果与“阿波罗”登月工程获得的实测数据非常吻合,可用于辅助月表无线通信系统的参数设计和性能评估。

关键词:传播损耗;预测模型;月表环境;布莱默级数

中图分类号:TN927

文献标志码:A

A New Segment Prediction Model for Radio Propagation over Lunar Surface

ZHU Qiuming^{1,2}, HUANG Pan¹, CHEN Xueqiang¹, WANG Chenghua¹, WANG Fengyu³, ZHOU Shengkui¹

(1. College of Electronic Info. Eng., NUA, Nanjing 210016, China; 2. China Airborne Missile Academy, Luoyang 417009, China;
3. Beijing Inst. of Spacecraft System Eng., Beijing 100094, China)

Abstract: Most of the traditional radio models are invalid due to the special propagation environment on lunar. A novel path loss prediction method for lunar surface was proposed. Firstly, a theoretical segment model according to communication distance was established and three propagation scenarios were analyzed. Then the multiple isolated obstacles on propagating path were considered, which would not only lead to an additional transmission loss but also affect the segment parameters. The present method was applied on a real lunar surface scenario provided by National Aeronautics and Space Administration (NASA). The simulation results showed that the prediction results are very close to measurements by Apollo project. This segment prediction model could be very useful on system parameters design and performance analysis of lunar communication system.

Key words: propagation loss; prediction model; lunar surface; Bremmer series

中国预计在2020年前完成探月工程的“绕”、“落”、“回”3个步骤。嫦娥三号着陆后,携带探测器的宇航员和巡逻车出舱采集样本。由于月表和地球传播环境完全不同,如何保证宇航员及巡逻车和着陆器之间,进而与地球指挥中心保持无线通信链接,是未来“落月”工程亟需解决的关键问题。

针对月表环境电波传播模型和实测研究报道非

常少,大部分来源于美国国家航天局近年公开的“阿波罗”登月工程技术报告。文献[1-2]给出了月表视距范围内信号功率损耗的理论分析方法,文献[3]进一步考虑了地形起伏因素;文献[4]将 Longley-Rice 经典模型改进并应用于月表环境,但修正参数过程中需要大量实测数据;文献[5]采用射线跟踪方法建立了月表电波传播模型,该方法过于复杂且需要提供精确3维数字地图。印度学者 Pabari 等^[6]研究了月表无线传感器网络中信号的传播模型,国内航天五院、国防科技大学和南京航空航天大学等科研单位也进行了类似研究^[7-8],但大部分研究均未考虑障碍物影响。

作者基于前期研究成果^[8],对月表障碍物绕射影响进行分析,并提出了一套完整的电波传播预测方法。该方案根据通信距离和月表环境建立了一个

收稿日期:2013-09-21

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61172078);航空科学基金资助项目(20120152001);中央高校基本科研业务费专项资金资助(NZ2012012);博士后科学基金资助项目(2013M541661)

作者简介:朱秋明(1979—),男,副教授,博士后。研究方向:无线信道建模、仿真与验模;航空数据链。E-mail: zhuqi-uming@nuaa.edu.cn

分段预测模型包括自由空间段、月面反射段和球面绕射段,在此基础上考虑关键孤立或多重障碍物对损耗总值和模型参数的修正因素。

1 理论分析

1.1 理想传播损耗

当收发端距离很近时,月表真空环境下接收信号功率服从 Friis 定律^[9],即

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2 L} \quad (1)$$

式中, P_t 为发射功率, G_t 、 G_r 分别为收发天线增益, L 为系统损耗因子, λ 为波长, d 为收发天线距离。因此,传播路径损耗为:

$$L_F = 10 \lg \left(\frac{4\pi df}{c} \right)^2 \quad (2)$$

式中, f 和 c 对应信号频率和真空光速。

当月表存在反射路径信号时,接收信号可表示为:

$$E = e_0 e^{j(2\pi ft - kd)} + e_r e^{j(2\pi ft - kd - \Delta\varphi)} \quad (3)$$

式中: e_0 、 e_r 分别对应直射和反射信号场强; $k = 2\pi/\lambda$ 为波数; $\Delta\varphi$ 表示直射与反射波的相位差,根据二者几何关系可得:

$$\Delta\varphi = (4\pi h_T h_R / \lambda d) + \pi \quad (4)$$

式中, h_T 、 h_R 分别对应发射和接收天线高度。因此,额外损耗为:

$$L_R = -10 \lg \left| \frac{E}{E_0} \right|^2 = -10 \lg |R_F e^{-j\Delta\varphi}|^2 \quad (5)$$

式中, R_F 表示反射系数。考虑到月球表面粗糙,反射信号通常包含一系列散射波束,可通过引入散射损耗系数对反射系数进行修正^[10],即

$$\alpha = \exp \left[-8 \left(\frac{\pi \sigma_H \sin \psi}{\lambda} \right)^2 \right] J_0 \left[8 \left(\frac{\pi \sigma_H \sin \psi}{\lambda} \right)^2 \right] \quad (6)$$

式中, σ_H 为月表起伏度的标准差, $J_0[\cdot]$ 为第一类零阶贝塞尔函数。另外,相比镜面反射,球面将导致额外的波束扩散,可通过引入扩散系数进行修正,即

$$D = 1 / \sqrt{1 + \frac{2d_T d_R}{R_0 d \tan \psi}} \quad (7)$$

式中, d_T 、 d_R 分别对应反射点与收发天线的距离, ψ 、 R_0 表示掠射角和球半径。

1.2 障碍物绕射损耗

当电波传播路径上遇到孤立障碍物或收发天线距离过大使月表球面截断直视路径时,无线信号部分能量被阻挡,部分能量则绕过障碍物到达接收端,

对此类情况造成的额外损耗进行估计非常重要。

实际障碍物形状多样不便于理论分析,考虑到月表环境存在大量岩石和山脉,作者采用刀刃形障碍物和圆形障碍物 2 种近似形状,如图 1 所示。

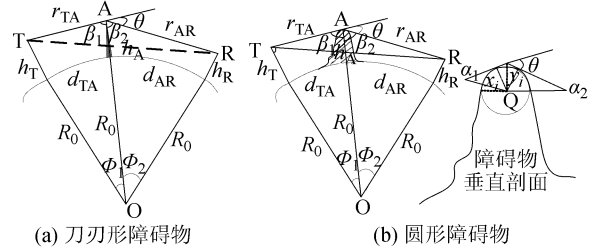


图 1 障碍物绕射几何模型

Fig. 1 Diffraction models over isolated obstacle

刃形障碍物的绕射损耗可采用半无限吸收屏绕射理论模型。根据惠更斯原理,障碍物上方可看成是次级波源,接收点场强是所有次级波源在接收端产生的场强叠加。当次级源为平面时,障碍物绕射损耗为^[9]:

$$J(v) = -20 \lg \frac{\sqrt{[1 - C(v) - S(v)]^2 + [C(v) - S(v)]^2}}{2} \quad (8)$$

式中: $C(v)$ 、 $S(v)$ 表示菲涅耳积分余弦和正弦项; v 为相对电路余隙且可由传播路径几何参数表示,即

$$v = \theta \sqrt{2r_{TA}r_{AR}/(\lambda r_{TA} + \lambda r_{AR})} \quad (9)$$

圆形障碍物用于近似顶部呈拱形的月谷,对应损耗可表示为刀刃形障碍物绕射损耗叠加一个附加衰减 $T(m, n)$, 即

$$L_d = J(v) + T(m, n) \quad (10)$$

式中, m 、 n 与几何参数满足如下关系:

$$\begin{cases} m = R \left(\frac{r_{TA} + r_{AR}}{r_{TA}r_{AR}} \right) / \left(\frac{\pi r_0}{\lambda} \right)^{1/3}, \\ n = h \left(\frac{\pi r_0}{\lambda} \right)^{1/3} / r_0. \end{cases} \quad (11)$$

式中, r_0 表示障碍物顶部近似曲率半径。

当收发天线距离过大,月球本身的球面将会阻断直射路径,文献[11]指出只要通信距离还在半阴影区宽度 $w = (\lambda R_0^2 / \pi)^{1/3}$ 内,就仍有部分电波能量经绕射到达接收端。月表表面产生的额外损耗可用 Bremmer 级数表示,当距离较大时,只要取该级数的第 1 项近似^[2],即

$$L_D = F[X(P)] + G[Y(t, P)] + G[Y(r, P)] \quad (12)$$

式中, $F[X(P)]$ 表示与距离相关的损耗, $G[Y(t, P)]$ 和 $G[Y(r, P)]$ 则为与天线高度相关的损耗。

2 分段预测模型及参数分析

2.1 传播损耗预测流程

提出的月表无线电波传播损耗分段预测流程如图 2 所示,该模型将传播损耗表示为理想传播损耗和障碍物绕射损耗的组合。

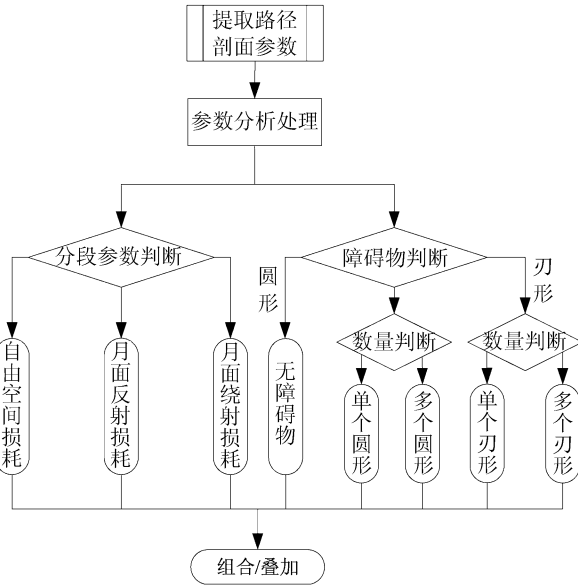


图 2 传播损耗分段预测模型

Fig. 2 Segment prediction model for propagation loss

若传播路径上不存在障碍物,预测模型仅与收发天线距离有关:1)收发天线相距很近时,传播损耗近似为自由空间损耗 L_F ; 2)随着收发距离增大,接收端来自月表反射路径的能量增加,传播损耗 $L = L_F + L_R$; 3)当传输距离进一步增加导致相对电路余隙 $v \geq -0.78$ 时,接收端进入球面绕射区,传播损耗 $L = L_F + L_D$; 4)当收发天线距离大于 w 时,即接收端越过半阴影区,此时损耗为无穷大。

值得强调的是,传播路径上的障碍物不仅要影响损耗预测值,还会对分段参数产生影响。当障碍物处在自由空间段或双径模型段时,由于障碍物阻挡了月面反射路径,障碍物背后区域的双径模型区段损耗函数将不考虑月面反射损耗而等效为自由空间损耗函数。另外,障碍物尺寸与月球球面曲率半径相比可以忽略,故障碍物不影响其背后接收区域的球面绕射损耗。

2.2 月表等效平面处理

由于月球曲率半径较大,采用双径模型进行预测时需进行平面化处理。假设收发天线 T 和 R 的高度分别为 h_T, h_R ,两天线间距离为 d ($d \gg h_T, h_R$),则月面等效平面如图 3 所示。月球半径 $R_0 \gg h_T, h_R$,利用几何关系,可证收发天线等效高度分别为:

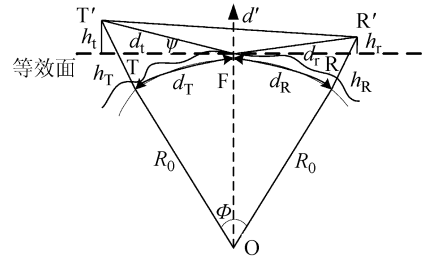


图 3 月球面等效平面图

Fig. 3 Equivalent lunar sphere model

$$\begin{cases} h_t = h_T - [d_T^2 / (2R_0)], \\ h_r = h_R - [d_R^2 / (2R_0)] \end{cases} \quad (13)$$

反射点到收发天线距离分别为:

$$\begin{cases} d_t = d / (1 + h_t / h_r), \\ d_r = d / (1 + h_r / h_t) \end{cases} \quad (14)$$

收发通信距离 $d' \approx d_t + d_r \approx d_T + d_R$, 反射线的入射角近似为 $\psi \approx (h_t + h_r) / d'$ 。

2.3 障碍物几何参数计算

孤立障碍物的额外绕射损耗计算(见式(8)和(10)),需获得 3 个重要几何参数:天线和障碍物之间的顶端距离 r 、相对电路余隙 v 和直视路径截取障碍物顶端的传播余隙 H 。

对于图 1(a)单刃形障碍物场景,可证:

$$r_{TA} = \sqrt{(R_0 + h_T)^2 + (R_0 + h_d)^2 - 2(R_0 + h_T)(R_0 + h_d)\cos\Phi_1} \quad (15)$$

式中, Φ_1 为月表距离 d_{TA} 对应的球心角,即

$$\Phi_1 = \arccos[(2R_0^2 - d_{TA}^2) / 2R_0^2] \quad (16)$$

v 可由式(9)获得,式(9)中绕射角 θ 表示线段 r_{TA} 延长线与线段 r_{AR} 的夹角且有:

$$\theta = \pi - \beta_1 - \beta_2.$$

其中,

$$\begin{cases} \beta_1 = \arccos \frac{r_{TA}^2 + (R_0 + h_d)^2 - (R_0 + h_T)^2}{2r_{TA}(R_0 + h_d)}, \\ \beta_2 = \arccos \frac{r_{AR}^2 + (R_0 + h_d)^2 - (R_0 + h_R)^2}{2r_{AR}(R_0 + h_d)} \end{cases} \quad (17)$$

传播余隙 H 可利用 β_1, β_2 在三角形 ATR 中运用正弦公式求解。

圆形障碍物场景中的几何参数求法与上述方法类似,唯一区别在于圆形障碍物中三角形 ATR 的两边 r_{TA}, r_{AR} 与障碍物顶部圆弧切相切,顶点 A 为两切线的交点。

2.4 多重障碍物简化处理

若传播路径上存在 2 个或多个障碍物如图 4 所示,首先采用交替法和主障碍法 2 种方法进行简化处理,然后利用障碍物理论损耗模型计算。

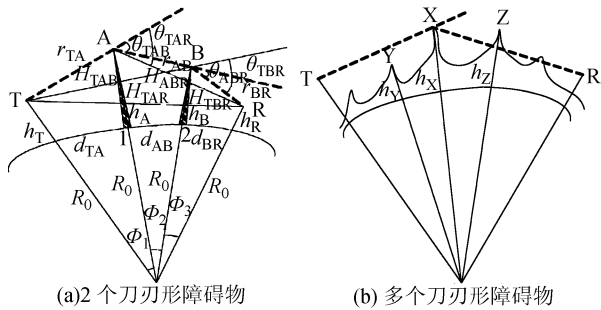


图4 多重障碍物绕射模型

Fig.4 Diffraction models over multiple obstacles

对于所有障碍物对电波造成的损耗影响大致相同的情况,可接力式地依次计算各障碍物绕射损耗。比如,图4(a)中信号从发射端T传播至障碍物B时,经历了第1个障碍物A的阻挡,余隙为 H_{TAB} ;电波从障碍物A传播至接收端R时,经历了第2个障碍物B的阻挡,余隙为 H_{ABR} 。绕射总损耗可表示为:

$$L_d = L_1(d_{TA}, d_{AB}, H_{TAB}) + L_2(d_{AB}, d_{BR}, H_{ABR}) + L_c \quad (18)$$

式中: L_1 、 L_2 可由式(8)计算; L_c 表示2个障碍物之间存在间距导致的修正项,即

$$L_c = 10 \lg \frac{(d_{TA} + d_{AB})(d_{AB} + d_{BR})}{d_{AB}(d_{TA} + d_{AB} + d_{BR})} \quad (19)$$

当某一个障碍物对电波传播阻碍作用较为显著时,可将其作为主障碍物,即具有最大 v 值的障碍物。多重障碍物情况如图4(b)所示。首先计算该障碍物损耗 $J(v_x)$;若 $v_x > -0.78$,则在发射端T到障碍物X路径上寻找下一个主障碍物Y,对应损耗记为 $J(v_y)$;在接收端R到障碍物X的路径上寻找主障碍物Z,对应损耗记为 $J(v_z)$ 。以此类推,障碍物绕射总损耗为:

$$L_d = J(v_x) + J(v_y) + J(v_z) + L \quad (20)$$

$$L = \begin{cases} 0, & v \leq -0.78; \\ J(v_x) + T[J(v_y) + J(v_z) + C], & v > -0.78 \end{cases} \quad (21)$$

式中, $T = 1.0 - \exp[-J(v_x)/6.0]$, C 为校正值且 $C = 10.0 + 0.04d$ 。

3 数值仿真与验证

3.1 仿真场景及参数

利用文献[3]实测数据对作者提出的模型进行验证,仿真参数如表1所示。不失一般性,采用3种典型场景(见图5):1)无障碍物场景。最远端存在1.83 m高的月谷或1.83 m深的月坑,与文献[3]实测场景一致。2)孤立障碍物场景。距离发射天线50 m处有一孤立障碍物。3)多重障碍物场景。距

离发射天线50 m处开始,每隔50 m处存在一个障碍物。

表1 系统仿真参数

Tab.1 Simulation parameters

| 仿真参数 | 参数值 |
|-----------------------|---------|
| 电波频率 f /MHz | 259.7 |
| 介电常数 ϵ | 3 |
| 电导率 δ | 0.000 3 |
| 月球半径 R_0 /km | 1 738 |
| 发射天线高度 h_T /m | 7.315 2 |
| 接收天线高度 h_R /m | 1.828 8 |
| 月表起伏标准差 σ_H /m | 0.001 |

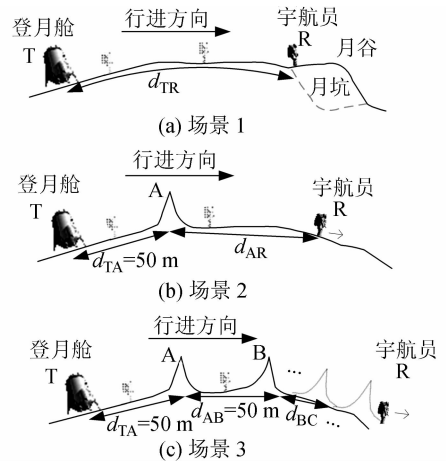


图5 3种典型月表场景

Fig.5 Three typical lunar surface scenarios

3.2 仿真结果分析

仿真场景1中行进路线末端包含一个月谷或月坑,考虑到地形起伏变化缓慢,将其近似等效为宇航员接收天线高度的变化。该场景下预测结果如图6所示,为便于比较,图6中还给出了文献[3]实测结果以及自由空间衰减(距离2次方)、4次方衰减曲线,星号表示分段预测模型的边界距离值。

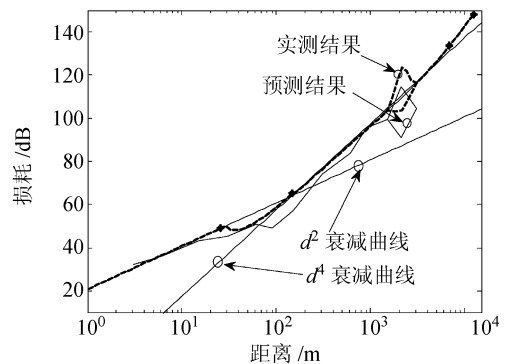


图6 场景1的预测结果比较

Fig.6 Prediction results under the first scenario
由图6可见:1)预测曲线与“阿波罗”工程实测

数据基本吻合,2 km 附近的月谷和月坑地形影响与实测曲线比较吻合,验证了提出的预测方法的可行性;2) 当距离比较近时,预测结果与距离 2 次方衰减基本一致;当超过视距传播时,损耗值与距离 4 次方衰减曲线比较吻合,这与文献[4]基于 Longley-Rice 改进模型的预测结果吻合;3) 相比理论或预测曲线,当距离大于自由空间段时,文献[3]提供的实测值偏大,原因在于作者采用的系统参数如月球半径、介电常数和电导率均为均值,与某个特定的实测场景可能存在固定偏差。

单个障碍物遮挡场景可在图 6 预测曲线基础上叠加额外绕射,而多重障碍物损耗预测比较复杂,需根据宇航员与障碍物位置灵活采用交替法和主障碍法进行简化。当宇航员越过第 1 个障碍物时,后续障碍物影响可忽略,即为单障碍物情况;当宇航员刚越过第 2 个障碍物时,其阻碍作用大于第 1 个障碍物,故选用主障碍法;随着宇航员向远处移动,2 个障碍物影响相当,此时采用交替法。

图 7 仿真比较了不同障碍物场景下的传播损耗情况。由图 7 可看出:1) 未进入障碍物阻挡区域时,损耗值与场景 1 预测值完全一致;2) 刚越过障碍物时,障碍物对信号的阻挡作用最为明显,如高度为 10 m 的单个刃形障碍物导致损耗值瞬间增加 30 dB,单个圆形障碍物则高达 60 dB 额外损耗;3) 当越过第 2 个刃形障碍物时,由于其距离发射端较远,此时产生的额外损耗约为 15 dB;3) 随着宇航员通信距离增加,远端障碍物阻挡造成的影响逐渐减小,但传播损耗值逐步增大的趋势不变。

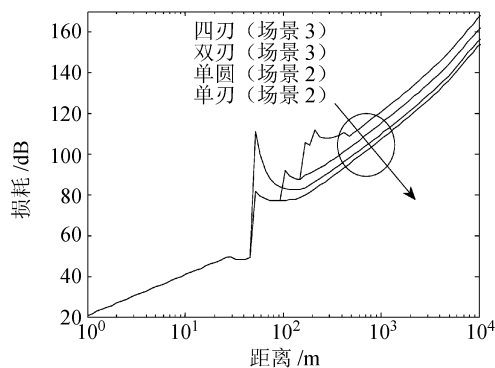


图 7 不同障碍物传播损耗比较

Fig. 7 Comparison of propagation loss with different obstacles

4 结 论

针对月表环境特点,提出了一个基于分段预测的电波传播损耗模型,该模型在理想路径损耗基础

上,综合考虑路径中可能存在的障碍物绕射及其对分段区间的影响,使预测结果更符合月表的实际情况。仿真结果表明:在障碍物阴影区内,越靠近障碍物,由障碍物绕射造成的损耗越大;当宇航员远离障碍物时,障碍物绕射影响降低,但传播损耗值递增趋势不变。

参考文献:

- [1] Hughlett J D. Ground wave propagation on the lunar surface for a lunar mobile laboratory [R]. NASA Contractor Report on Apollo Logistics Support Systems Mobile Studies, 1964: 1 - 45.
- [2] Lindsey J F. An analysis of point-to-point communication for application to the lunar flyer program [R]. NASA Internal Note (MSC-EE-R-68-15), 1970: 1 - 36.
- [3] Lindsey J F. Lunar surface transmission loss for the apollo astronaut [R]. NASA Technical Note (TND4915), 1968: 1 - 28.
- [4] Foore L, Ida N. Path loss prediction over the lunar surface utilizing a modified Longley-Rice irregular terrain model [R]. NASA Technical Note (TM214825), 2007: 1 - 12.
- [5] Hwu S, Upanavage M, Sham C C. Lunar surface propagation modeling and effects on communications [C]. 26th International Communications Satellite Systems Conference (ICSSC), San Diego, CA, 2008: 1 - 7.
- [6] Pabari J P, Acharya Y B, Desai U B, et al. Radio frequency modeling for future wireless sensor network on surface of the moon [J]. International Journal on Communications, Network and System Sciences, 2010, 3(4): 395 - 401.
- [7] Dong hai. Irregular terrain of the wireless channel model simulation and hardware design implementation [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2009. [董海. 不规则地形的无线信道模型仿真及硬件实现设计 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2009.]
- [8] Zhu Qiuming, Wang Chenhua, Chen Xueqiang, et al. path loss prediction model of radio propagation over lunar surface [C] // High Performance Networking, Computing, and Communication Systems. Heidelberg, Berlin: Springer-Verlag, 2011, 163: 556 - 562.
- [9] 谢益溪. 无线电波传播原理与应用 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2008.
- [10] Beckmann P, Spizzichino A. The scattering of electromagnetic waves from rough surfaces [M]. Elmsford, NY: Pergamum Press, 1963.
- [11] ITU-Recommendations. Recommendation ITU-R P. 526 - 11 The ITU radio communication assembly; Propagation by diffraction [S]. 2009.