

## 对流层散射最坏月转换模式研究

李磊<sup>1</sup>, 赵振维<sup>2</sup>, 吴振森<sup>1</sup>, 林乐科<sup>2</sup>, 雷园<sup>3,4</sup>, 张蕊<sup>1,2</sup>

(1. 西安电子科技大学物理与光电工程学院, 陕西 西安 710071; 2. 中国电波传播研究所电波环境特性及模化技术重点实验室, 山东 青岛 266107; 3. 宇航动力学国家重点实验室, 陕西 西安 710043; 4. 西安卫星测控中心, 陕西 西安 710043)

**摘要:** 针对目前的最坏月预测模型无法有效反映对流层散射传输损耗的最坏月时间概率分布随地域和气象气候条件变化的特点, 结合 ITU-R P.617-3 和 ITU-R P.841-4 建议书给出的最坏月预测模型, 提出了一种对流层散射传输损耗最坏月时间概率预测方法。通过合理的数学推演和数值优化, 该方法得到了对流层散射最坏月与年平均传输损耗的时间概率转换与地面折射率  $N_s$  的对应关系。该方法不仅解决了上述 2 种 ITU 模型的缺点, 而且更加简单实用, 适用范围更广。随后, 为了验证该方法的准确性和全球适用性, 利用该方法模拟了全球对流层散射数据库中各实验链路典型概率(50%、90%、99%)下的最坏月传输损耗, 并与实测值和 ITU-R P.841 模型进行了对比验证。研究结果对对流层散射传播的发展和應用有一定的参考价值。

**关键词:** 对流层散射; 最坏月; 转换模式; 传输损耗; 时间概率

中图分类号: TN011

文献标识码: A

## Conversion model of annual statistics to worst-month statistics of troposcatter

LI Lei<sup>1</sup>, ZHAO Zhen-wei<sup>2</sup>, WU Zhen-sen<sup>1</sup>, LIN Le-ke<sup>2</sup>, LEI Yuan<sup>3,4</sup>, ZHANG Rui<sup>1,2</sup>

(1. School of Physics and Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China;

2. National Key Laboratory of Electromagnetic Environment, China Research Institute of Radio Wave Propagation, Qingdao 266107, China;

3. State Key Laboratory of Astronautic Dynamics, Xi'an 710043, China;

4. Xi'an Satellite Control Center, Xi'an 710043, China)

**Abstract:** The present worst-month prediction model, however, cannot reflect the meso-scale characteristics of troposcatter propagation accurately. Hence, based on the worst-month prediction models introduced in the recommendation ITU-R P.617-3 and ITU-R P.841-4 respectively, a conversion model of annual statistics to worst-month statistics of troposcatter was presented. The corresponding relation between the conversion of annual statistics to worst-month statistics of troposcatter and the refractivity  $N_s$  at the earth's surface was derived with the rational numerical calculation and optimization method. This model not only solves the disadvantages of the ITU models mentioned above, but also has a better practicability and applicability. Then, using the new model and the trans-horizon propagation loss data banks released by the international telecommunication union (ITU), the worst-month transmission loss for the non-exceedance time percentages (50%, 90%, 99%) of interest are calculated. The prediction results are compared with the recommendation ITU-R P.841 and the trans-horizon propagation loss data banks. The conclusions are helpful for the development and the application of the troposcatter propagation.

**Key words:** troposcatter, worst-month, conversion model, transmission loss, time percentage

收稿日期: 2015-08-01; 修回日期: 2016-02-24

通信作者: 吴振森, wuzhs@mail.xidian.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No.61471329, No.61401410, No.41175012)

**Foundation Item:** The National Natural Science Foundation of China (No.61471329, No.61401410, No.41175012)

### 1 引言

对流层散射传播是超短波、微波等无线电波通过大气湍流、水平层结等对流层现象进行超视距传输的一种传播方式<sup>[1]</sup>。由于对流层散射传播具有抗核爆、安全保密性和机动性好等众多优点，既可以用于超视距通信、超视距信号的侦测、分析和大气结构探测等领域，同时也是远距离同频系统之间产生相互干扰的重要原因，因此，自 20 世纪 50 年代起，国内外对对流层散射传播进行了大量的理论和实验研究，建立了多种传播预测模式<sup>[2-5]</sup>。20 世纪 80 年代，国际电信联盟(ITU)对全球上百条对流层散射链路进行筛选和验证后，颁布了全球对流层散射数据库<sup>[6]</sup>并将部分对流层散射传输损耗的预测方法经检验纳入国际电联建议书<sup>[7-9]</sup>，如 ITU-R P.452、ITU-R P.617、ITU-R P.2001 等，分别应用于干扰分析和对流层散射通信系统的设计。

最坏月分布特性是无线电通信系统设计和研制过程中需要考虑的重要指标，同时也是对流层散射传输损耗预测必不可少的重要组成部分<sup>[10]</sup>。针对最坏月的统计分布特性，ITU 给出了最坏月的明确定义并提出了几种最坏月预测方法，如 ITU-R P.617-3 建议书和 ITU-R P.841-4 建议书<sup>[11]</sup>。其中，ITU-R P.617-3 建议书中给出了最坏月对流层散射传输损耗的预测方法，以图表的形式给出了不同散射气候区典型时间概率(50%、90%、99%)下最坏月与年平均的传输损耗差。在 ITU-R P.841-4 建议书中，则以指数模式为基础，提出了最坏月的转换模式，并给出了适用于降雨模式的不同气候区的转换参数以及部分国家和地区的转换参数，针对超视距传播，ITU 也给出了全球统一的参考参数。

对流层散射传播与公共散射体位置处的气象气候条件有着十分密切的关系，因此，最坏月对流层散射传输损耗及其概率分布也与气象气候条件密切相关。ITU-R P.841-4 建议书针对超视距传播只给出了全球统一的参考参数，这显然无法准确地反映出对流层散射或超视距传播与当地气象气候条件的关系，ITU-R P.617-3 建议书虽然给出了不同散射气候区最坏月与年平均的传输损耗差，但图表的形式不利于最坏月的计算，并且，ITU 提出的这 2 种最坏月预测模型无论在表现形式还是在计算结果上都存在着较大差异。因此，本文综合考虑上述 2 种模型的优缺点，提出了一种最坏月转换模式，给出了最坏月概率分布

与地面折射率的关系。随后利用该方法计算了全球对流层散射数据库中各实验链路典型时间概率下最坏月的传输损耗。通过与实测数据相比较，结果表明该方法的预测精度较高且适用于全球多数地区。

### 2 最坏月预测模型的 ITU 方法

#### 2.1 ITU-R P.617 模型

根据全球对流层散射气候区的划分，ITU-R P.617-3 建议书给出了不同散射气候区在典型时间概率值下对流层散射最坏月与年平均的传输损耗差<sup>[8]</sup>，如图 1 所示。

对于上述典型概率值之外的时间概率  $q$  值(概率记为  $q\%$ ，下同)，相应的传输损耗差  $dL(q)$ 可按对数正态分布进行内插或外推得到。

利用 ITU-R P.617-3 建议书给出的年平均对流层散射传输损耗预测模型，结合图 1 可以得到不同时间概率下的最坏月传输损耗

$$L_w(q) = L(q) + dL(q) \tag{1}$$

其中  $L_w(q)$ 为时间概率  $q$  下的最坏月传输损耗  $L(q)$ 为时间概率  $q$  下的年平均传输损耗， $dL(q)$ 则为时间概率  $q$  下最坏月与年平均传输损耗差。

虽然上述方法简单直观地给出了不同散射气候区下最坏月与年平均的传输损耗差，但是这种图表的表示形式并不利于最坏月预测在计算机上的应用，并且散射气候区的划分仅能反映出最坏月分布特性在全球各大气候区的不同，并不能精确地反映出其区域性变化，

#### 2.2 ITU-R P.841 模型

ITU-R P.841-4 建议书给出了一种年平均到最坏月的超过时间概率转换的统计模型<sup>[11]</sup>

$$p_w = Qp \tag{2}$$

其中， $p_w$ 为最坏月的超过概率， $p$ 为年平均超过概率， $Q$ 为分段函数且  $1 < Q < 12$ 。

$$Q(p) = \begin{cases} 12, & p < \left(\frac{Q_1}{12}\right)^{\frac{1}{b}} \\ Q_1 p^{-b}, & \left(\frac{Q_1}{12}\right)^{\frac{1}{b}} < p < 3 \\ Q_1 3^{-b}, & 3 < p < 30 \\ Q_1 3^{-b} \left(\frac{p}{30}\right)^{\frac{\log(Q_1 3^{-b})}{\log(0.3)}}, & p > 30 \end{cases} \tag{3}$$

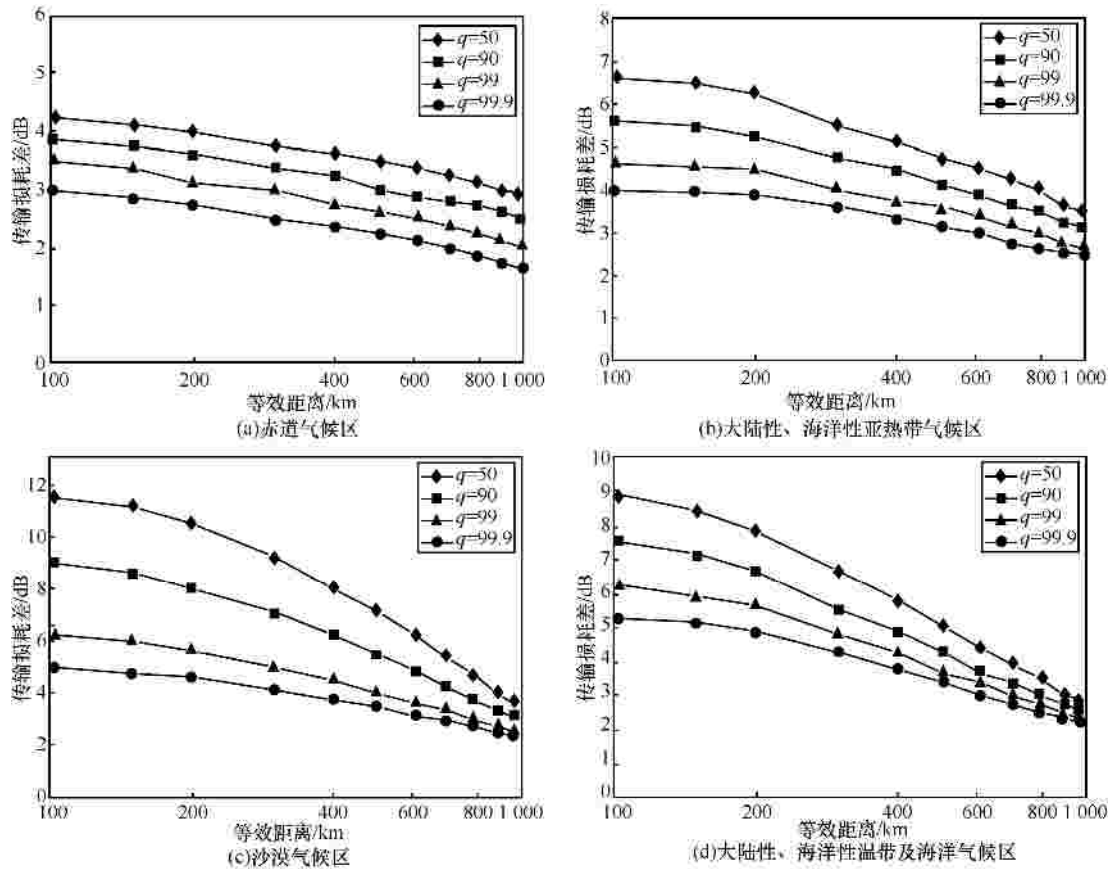


图 1 各散射气候区最坏月与年平均传输损耗差

其中,  $Q_1$  和  $\beta$  为  $Q$  的 2 个参量, 随气候区或地域而变, 针对对流层超视距传播, ITU 给出了其全球平均值

$$Q_1 = 2.85, b = 0.13 \tag{4}$$

由式(3)可以看出,  $Q_1$  和  $b$  为年平均到最坏月超过时间概率转换的重要参量。ITU-R P.841 建议书主要给出了降雨率、降雨引起的陆地链路的衰减以及斜路经衰减在全球不同地区的这 2 个参量的值。而对对流层超视距传播而言, 其仅给出了西北欧地区和全球平均的  $Q_1$  和  $b$  值, 这显然无法满足此模型在全球对流层超视距传播中的应用。

### 3 新的最坏月预测模型

由第 2 节可以看出, ITU-R P.617 模型以图表的形式给出了不同时间概率下最坏月与年平均的传输损耗差随气候区和传播距离的变化关系, 而 ITU-R P.841 模型则以形式更加简单的公式形式给出了年平均与最坏月的百分时间概率转换关系。因此, 针对上述 2 种模型的优缺点, 本节提出了一种改进的最坏月时间概率转换模型。根据 ITU-R

P.617-1 建议书对各对流层散射气候区的描述, 各散射气候区与年平均地面折射率  $N_s$  值的对应关系如表 1 所示。

表 1 对流层散射气候区及其  $N_s$  值

气候区	$N_s$
1	360
2	320
3	370
4	280
5	320
6、海洋	320

表 1 中所列气候区: 1 为赤道; 2 为大陆性亚热带; 3 为海洋性亚热带; 4 为沙漠和地中海气候; 5 为大陆性温带; 6 为海洋性温带陆地; 海洋为海洋性温带海面。有关散射气候区的详细定义见 ITU-R P.617-1 建议书<sup>[8]</sup>。

结合表 1 可得到图 1 中各散射气候区传输损耗差曲线所对应的  $N_s$  值, 其中, 图 1(b)所对应的  $N_s$  值可设为气候区 2 和 3 的  $N_s$  的平均值, 即  $N_s=345$ 。

因此，图 1 中各气候区最坏月与年平均传输损耗差曲线与  $N_s$  的对应关系如表 2 所示。

表 2 最坏月与年平均传输损耗差的气候区划分及其  $N_s$  值

气候区	$N_s$
1	360
2、3	345
4	280
5、6、海洋	320

ITU-R P.841 模型给出了年平均到最坏月的超过时间概率转换的统计模型，而对对流层散射传播而言，通常需要用到的年平均和最坏月的未超过概率，即

$$q_w = 100 - p_w \quad (5)$$

$$q = 100 - p \quad (6)$$

其中  $q_w$  为最坏月未超过规定门限值的时间概率， $q$  为年平均未超过规定门限值的时间概率， $p_w$  为最坏月超过规定门限值的时间概率， $p$  为年平均超过规定门限值的时间概率。对式(2)和式(3)进行转换可得

$$q_w = 100 - Q(100 - q) \quad (7)$$

$$Q(q) = \begin{cases} 12, & q > 100 - \left(\frac{Q_1}{12}\right)^{\frac{1}{b}} \\ Q_1(100 - q)^{-b}, & 97 < q < 100 - \left(\frac{Q_1}{12}\right)^{\frac{1}{b}} \\ Q_1 3^{-b}, & 70 < q < 97 \\ Q_1 3^{-b} \left(\frac{100 - q}{30}\right)^{\frac{\log(Q_1 3^{-b})}{\log(0.3)}}, & q < 70 \end{cases} \quad (8)$$

由式(7)、式(8)以及表 2 可以看出，只要求出  $Q_1$ 、 $\beta$  与  $N_s$  的关系即可得到全球适用的对流层散射传输损耗最坏月时间概率预测模型。

为了简化模型，对图 1 中每条概率曲线取平均值，即设年平均和最坏月的时间概率转换与传播距离无关，从而得到不同散射气候区分别在  $q=50$ 、90、99、99.9 时的传输损耗差均值，如表 3 所示。

设频率  $f=3$  GHz，路径长度  $d=200$  km，发、收天线增益  $G_t=G_r=35$  dB，利用 ITU-R P.617-3 建议书分别计算了不同气候区，即不同  $N_s$  下  $q=50$ 、90、99、99.9 的年平均传输损耗  $L_y$ ，并根据式(1)和表 3 得到不同  $N_s$  下  $q_w=50$ 、90、99、99.9 的最坏月传输

损耗  $L_w$ ，随后利用年平均传输损耗公式进行反推，得到年平均未超过  $L_w$  的百分时间概率  $q_{wy}$ ，结果如图 2 所示。

表 3 不同散射气候区的传输损耗差均值

气候区	$N_s$	时间概率/%			
		50	90	99	99.9
1	360	3.5	3.1	2.7	2.3
2、3	345	5.0	4.3	3.6	3.2
4	280	7.4	5.8	4.2	3.6
5、6、海洋	320	5.6	4.8	4.1	3.7

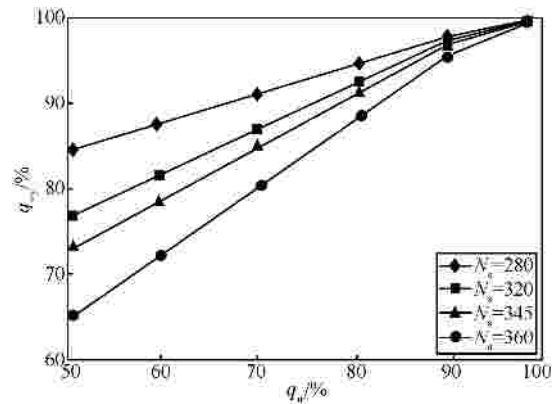


图 2 不同气候区下最坏月与年平均百分时间概率的对应关系

将图 2 中不同  $N_s$  下的  $q_w$  和  $q_{wy}$  值分别代入式(7)和式(8)，并利用优化算法<sup>[12]</sup>寻求  $Q_1$  和  $b$  的最优解，从而得到不同散射气候区的最优  $Q_1$  和  $b$  值，如表 4 所示。

表 4 不同散射气候区的最优  $Q_1$  和  $\beta$  值

$N_s$	$Q_1$	$\beta$
280	4.44	0.13
320	3.61	0.13
345	2.99	0.13
360	2.17	0.13

根据表 4，可设  $\beta=0.13$ ，并对  $N_s$  和  $Q_1$  进行公式拟合，可得  $N_s$  与  $Q_1$  的关系为

$$Q_1 = 5.8 - 0.03 \exp\left(\frac{N_s}{75}\right) \quad (9)$$

将式(9)和  $\beta=0.13$  代入式(8)并且结合式(7)即得到新的全球适用的对流层散射传输损耗最坏月时间概率转换模型。

通过和上述 2.2 节的 ITU-R P.841 模型相比较可以看出，新模型采用了年平均和最坏月未超过概率

$q$  和  $q_w$  的转换,在形式上更加适用于目前较为流行的对流层散射传输损耗的计算,并且新模型中参数  $Q_1$  的变化与地面折射率  $N_s$  有关,从而表达了对对流层散射时间概率转换与全球各区域及各散射气候区气象气候条件的关系,解决了 ITU-R P.841 模型无法有效反映对流层散射传输损耗的最坏月时间概率分布随地域和气象气候条件变化的缺点,更加有利于对流层散射区域性变化特点以及机理的研究。

#### 4 模型验证

20 世纪 80 年代,为了对当时已有的对流层散射传输损耗预测方法进行标准化测试并且为研究新的预测方法提供便利,ITU 通过对全球上百条对流层散射实验链路进行筛选和验证后,颁布了全球对流层散射数据库<sup>[6]</sup>。该数据库包含了分布于全球各地共 8 个散射气候区的 202 条实验链路,实验时间从 1950 年 1 月 1 日至 1989 年 8 月 31 日,跨度约 39 年,实验总时长 1 900 176 h,平均每条链路实验时长约为 11 047 h。该数据库主要介绍了各实验链路不超过  $p\%$  时间概率下的年平均对流层散射传输损耗以及各实验连路的传播条件,如路

径长度、散射角以及频率等。其中,该数据库中各实验链路的平均路径长度为 298 km,最低频率为 0.09 GHz,最高频率为 29 GHz。

虽然该散射数据库包含了 200 多条实验链路,但很多实验链路缺少了对流层散射传输损耗计算所必需的实验参数,如收发站点经纬度、天线增益等。因此,本文选取了该数据库中 13 条实验参数较全的可用于计算对流层散射最坏月传输损耗的实验链路,如表 5 所示。其中,7 条位于亚洲(其中一条位于东南亚,赤道附近),3 条位于北美洲,3 条位于欧洲,平均路径长度为 309 km,最低频率为 0.505 GHz,最高频率为 4.48 GHz。所选链路基本代表了全球各区域和各散射气候区不同频段对流层散射传播的特点。

由于 ITU 提供的全球对流层散射数据库仅给出了大部分实验链路在年平均不同时间概率下未超过的传输损耗,并未给出最坏月传输损耗,如果将数据库和图 1 中各气候区最坏月与年度传输损耗差相结合,利用式(1)虽然可得到实测的最坏月不同时间概率下未超过的传输损耗,但是却无法得到此传输损耗下对应的年平均百分概率值。而 ITU-R P.617-3 建议书中给出了不同散射气候区的年平均

表 5 时间概率转换的模拟与实测比较

电路序号	$N_s$	预测误差( $q_{wym} - q_{wys}$ )/%					
		新方法			ITU-R P.841 模型		
		$q_w=50$	$q_w=90$	$q_w=99$	$q_w=50$	$q_w=90$	$q_w=99$
1440	312	3.87	1.77	0.10	9.24	2.85	0.19
1441	312	1.87	1.67	0.09	7.24	2.75	0.18
2272	304	0.96	0.93	0.08	7.04	2.15	0.18
2273	304	0.96	1.53	0.08	7.04	2.75	0.18
2304	308	2.30	1.70	0.10	8.04	2.85	0.20
2305	302	1.01	1.50	-0.12	7.24	2.75	-0.02
2306	308	2.50	1.70	0.08	8.24	2.85	0.18
2307	308	1.50	1.70	0.08	7.24	2.85	0.18
9034	306	6.83	1.97	0.11	12.74	3.15	0.21
9041	313	1.97	1.69	0.09	7.24	2.75	0.18
9042	375	20.80	6.36	0.52	-1.76	1.85	0.11
9045	312	5.87	1.77	0.10	11.24	2.85	0.19
9046	312	2.87	1.77	0.10	8.24	2.85	0.19
均值		4.10	2.01	0.11	7.61	2.71	0.17
均方根值		6.84	2.47	0.18	8.59	2.84	0.18

传输损耗计算方法，因此，本文利用其年平均传输损耗公式计算数据库中各链路在  $q=50、90、99$  时的年平均传输损耗  $L_y$ ，然后结合图 1 得到各链路在最坏月  $q_w=50、90、99$  时的传输损耗  $L_{wm}$ ，并利用年平均传输损耗公式进行反推，得到未超过  $L_{wm}$  的年平均百分时间概率  $q_{wym}$ 。同样，利用式(7)~式(9)与 ITU-R P.841 方法分别对散射数据库中各链路最坏月  $q_w=50、90、99$  进行概率转换，得到对应的年平均百分时间概率值  $q_{wys1}$  和  $q_{wys2}$ ，并利用 ITU-R P.617-3 建议书分别计算了  $q_{wys1}$  和  $q_{wys2}$  时的年平均传输损耗  $L_{wys1}$  和  $L_{wys2}$ 。最坏月  $q_w=50、90、99$  时对应的年平均百分时间概率的模拟与实测结果比较如表 5 所示，传输损耗的模拟与实测结果比较如表 6 所示。

由表 5 和表 6 可以看出，在不同时间概率下，新方法预测误差的均值和均方根值都要优于 ITU-R P.841 方法。虽然在 9042 链路上新方法的时间概率预测值出现了较大误差(见表 5)，但并没有影响该链路传输损耗的预测(见表 6)，这是由于该链路位于赤道气候区， $N_s=375$ ，受当地气候条件的影响，对流层散射传输损耗在全年的变化范围很小，因此，较大的时间概率预测误差并未对最坏月

传输损耗的预测产生较大的影响。总体上，新方法的预测值与实测值的误差较小，从而验证了此方法的全球适用性。

### 5 结束语

本文通过深入分析和研究 ITU-R P.617-3 和 ITU-R P.841-4 建议书中超视距传播的最坏月时间概率预测模型，将 ITU-R P.617-3 建议书中最坏月预测随气候区变化的特点与 ITU-R P.841-4 建议书中最坏月转换模式简单易用、便于计算的优点相结合，提出了一种对流层散射传输损耗最坏月转换模式。该方法不仅克服了以往的模型不能准确反映对流层散射传播区域性变化的缺点，得到了最坏月转换与地面折射率的关系，而且公式简单实用，十分利于工程计算。并且，通过与全球对流层散射数据库中各链路实测数据和 ITU-R P.841 模型的对比，进一步验证了该方法的全球适用性。

### 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.  
ZHANG M G. Tropospheric scatter propagation[M]. Beijing: Publish-

表 6 传输损耗的模拟与实测比较

电路序号	$N_s$	预测误差( $L_{wm}-L_{wys}$ )/%					
		新方法			ITU-R P.841 模型		
		$q_w=50$	$q_w=90$	$q_w=99$	$q_w=50$	$q_w=90$	$q_w=99$
1440	312	1.22	2.64	1.52	2.58	3.61	2.39
1441	312	0.52	2.23	1.22	1.77	3.13	2.02
2272	304	0.28	1.10	1.11	1.72	2.13	2.03
2273	304	0.27	2.03	1.08	1.66	3.03	1.96
2304	308	0.60	2.21	1.40	1.87	3.11	2.25
2305	302	0.31	2.24	-1.15	1.92	3.39	-0.16
2306	308	0.64	2.13	1.00	1.86	3.00	1.82
2307	308	0.43	2.47	1.16	1.85	3.48	2.11
9034	306	2.11	2.84	1.60	3.42	3.76	2.44
9041	313	0.76	3.16	1.70	2.47	4.37	2.82
9042	375	1.64	1.77	1.32	-0.16	0.75	0.44
9045	312	2.51	3.34	1.93	4.22	4.57	3.03
9046	312	1.12	3.34	1.93	2.83	4.57	3.03
均值		0.95	2.42	1.22	2.15	3.30	2.01
均方根值		1.23	2.60	1.49	2.47	3.59	2.29

ing House of Electronic Industry, 2004.

- [2] BOOKER H G, BETTENCOURT J T. Theory of radio transmission by tropospheric scattering using very narrow beams[J]. Proceedings of the IEEE, 1955, 43(3):281-290.
- [3] FRIIS H T. A reflection theory for propagation beyond horizon[J]. Bell Labs Technical Journal, 1957, 36(5): 627-644,.
- [4] BULLINGTON K. Reflections from an exponential atmosphere[J]. Bell Labs Technical Journal, 1963, 42(6): 2849-2867.
- [5] DAY J P, TROLESE L G. Propagation of short radio waves over terrain[J]. Proceedings of the IEEE, 1950, 38(1):165-175.
- [6] ITU Document 5/370. Data banks used for testing prediction methods[R]. CCIR documents [1982-1986].
- [7] Recommendation ITU-R P.452-15. Prediction procedure for the evaluation of interference between stations on the surface of the Earth at frequencies above about 0.1GHz[S]. 2013.
- [8] Recommendation ITU-R P.617-3. Propagation prediction techniques and data required for the design of trans-horizon radio-relay systems[S]. 2013.
- [9] Recommendation ITU-R P.2001-1. A general purpose wide-range terrestrial propagation model in the frequency range 30 MHz to 50GHz[S]. 2013.
- [10] 林乐科, 赵振维, 刘玉梅. 降雨率的最坏月分区转换模式研究[J]. 通信学报, 2004, 25(8): 135-138.  
LIN L K, ZHAO Z W, LIU Y M. Study on conversion model of annual to worst-month statistics of rain rate[J]. Journal on Communications, 2004, 25(8): 135-138.
- [11] Recommendation ITU-R P.841-4. Conversion of annual statistics to worst-month statistics[S]. 2005.
- [12] WANG X, CAO L, GENETIC M. algorithm: theory, application and software implementation[M]. Xi'an: Publishing House of Xi'an Jiaotong University, 2002.

#### 作者简介：



李磊 (1987-), 男, 河北邯郸人, 西安电子科技大学博士生, 主要研究方向为电磁波在随机介质中的传播和散射建模及仿真。



赵振维 (1965-), 男, 河北保定人, 博士, 中国电波传播研究所研究员, 主要研究方向为电波环境及传播特性。



吴振森 (1946-), 男, 湖北沙市人, 西安电子科技大学教授、博士生导师, 主要研究方向为随机介质波传播和电磁散射等。



林乐科 (1972-), 男, 山东荣成人, 博士, 中国电波传播研究所研究员, 主要研究方向为对流层电波传播及其环境特性等。



雷园 (1986-), 男, 陕西西安人, 西安卫星测控中心工程师, 主要研究方向为电磁波散射及其应用等。



张蕊 (1979-), 女, 河北正定人, 西安电子科技大学博士生, 主要研究方向为对流层电波传播及其信道特性等。