

# 对流层散射传输损耗与大气折射率 结构常数相关性研究

赵 强<sup>1</sup>, 张 蕊<sup>1,2</sup>, 林乐科<sup>1</sup>, 李清亮<sup>1</sup>, 张玉生<sup>1</sup>

(1. 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;  
2. 西安电子科技大学物理与光电工程学院, 陕西西安 710071)

**摘 要:** 基于大气湍流非相干散射理论, 采用泰勒方法对湍流谱函数进行近似, 推导获得了对流层散射传输损耗与大气折射率结构常数的关系, 即 L-C 模型; 开展了对流层散射传播试验, 基于 WRF (Weather Research and Forecasting) 数值模式对试验期间大气折射率结构常数进行预报; 基于预报的大气折射率结构常数数据应用 L-C 模型预测对流层散射传输损耗, 并与试验测试损耗值进行对比研究. 结果表明, 应用 L-C 模型预测的损耗值与实测值变化趋势吻合较好, 均方根误差不超过 6dB, 并且传输损耗与大气折射率结构常数间的相关系数均大于 0.7, 表明了对流层散射传输损耗与大气折射率结构常数之间较强的相关性. 这种对流层散射与大气折射率结构常数之间的相关性对于对流层散射传输的机理和建模研究都有重要意义.

**关键词:** 对流层散射; L-C 模型; 传输损耗; 大气折射率结构常数; 相关性

**中图分类号:** TN011 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2020)03-0518-06

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2020.03.014

## Research on the Correlation of Troposcatter Transmission Loss and Structure Constant of the Refractive Index

ZHAO Qiang<sup>1</sup>, ZHANG Rui<sup>1,2</sup>, LIN Le-ke<sup>1</sup>, LI Qing-liang<sup>1</sup>, ZHANG Yu-sheng<sup>1</sup>

(1. National Key Laboratory of Electromagnetic Environment, China Research Institute of Radiowave Propagation, Qingdao, Shandong 266107, China; 2. School of Physics and Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

**Abstract:** Based on the incoherent scatter theory of atmospheric turbulence, the turbulence spectrum is approximated by the Taylor method, and the relationship between the tropospheric scattering transmission loss and the atmospheric structure constant of the refractive index is obtained, that is, L-C model. The troposcatter propagation experiment was carried out, and the atmospheric structure constant of the refractive index during the test was predicted based on the numerical weather prediction model of WRF (Weather Research and Forecasting). Based on the forecasted data of the atmospheric structure constant of the refractive index, the L-C model is used to predict the troposcatter transmission loss, and compared with the measured loss. It is shown that the variation tendency of the predicted loss and the measured loss are in good agreement, and the RMS (root mean square) errors are no more than 6dB. On the other hand, the correlation coefficients between the transmission loss and the structure constant of the refractive index are all greater than 0.7. All of these show that there is indeed a strong correlation between troposcatter transmission loss and structure constant of the refractive index, and this correlation is of great value for the investigation of the mechanism and modeling on troposcatter transmission.

**Key words:** troposcatter; L-C model; transmission loss; structure constant of the refractive index; correlation

### 1 引言

对流层散射传播是一种无线电波进行超视距传播

的重要方式, 它几乎不受地理环境影响, 单跳距离可达几百公里, 传播距离最远可达上千公里. 同时, 对流层散射还具有抗核爆炸能力强、通信保密性好等诸多优点,

长久以来都是重要的军事通信和应急通信手段,受到各国军方的高度重视. 研究对流层散射的首要问题是解决其传播机理. 自上世纪中叶,各国的学者们投入到对流层散射传播的机理研究中来. 直到二十世纪七十年代,逐渐形成了三种被广泛认可的理论:湍流非相干散射、不规则层非相干反射及稳定层的相干反射. 1967年,美国国家标准局基于湍流非相干散射理论给出了对流层散射传输损耗的预测方法,即 NBS 方法. 1968年,Altshuler 等人进行了 15.7GHz, 500km 的对流层散射实验,分析了公共散射体处的大气结构. 诸多的实验结果表明,现有的理论都难以解释绝大部分实际传播现象,缺乏一种全球普适性的理论方法. 于是,上世纪七十年代,张明高根据国内外的实验数据及研究成果,结合三种传播机理,提出广义散射截面理论,并以全球对流层散射数据库为基础,提出了一种适用于全球的对流层散射传输损耗预测方法,于 1992 年形成 ITU-R P. 617-1 标准<sup>[1]</sup>. 1993 年,Hitney<sup>[2]</sup>利用 PE 方法计算了对流层散射传输损耗,他在标准大气折射高度剖面上加入了湍流引起的扰动项,计算的数值结果与实验数据对比,表明该方法可用于对流层散射传输损耗预测. 1996 年,Shen 和 Vilar 等人<sup>[3]</sup>利用 4 条 11.6 GHz 的海上超视距传播实验链路的传输损耗分析了绕射、蒸发波导及对流层散射的发生概率. 2012 年,英国科学家考虑各种传播机制的预测方法,将 ITU-R P. 617 和 ITU-R P. 452 中的频率、距离等相关项重新组合,提出了一种新的对流层散射传输损耗预测方法,形成 ITU-R P. 2001 建议书<sup>[4]</sup>. 2014 年,Bhatnagar 等人<sup>[5]</sup>利用 C 波段对流层散射链路的传输损耗实验数据分析了印度地区的日变化和季节变化特性. 2015 年,赵振维等结合全球对流层散射数据库,深入分析了对流层散射传输损耗中值与各传播参数及当地气象气候条件的相互关系,提出了新的对流层散射超视距传播预测方法,于 2017 年形成 ITU-R P. 617-4 建议书<sup>[6]</sup>;李磊等<sup>[7]</sup>还根据对流层散射公共散射体的高度和散射角,提出了一种计算散射抛物方程最大传播角和最大高度的方法,对散射抛物方程进行了改进,使其计算更加合理和简便.

对流层散射是超短波微波超视距传播主要的传播机理,而湍流非相干散射在对流层散射中占据主导地位. 该理论<sup>[8]</sup>认为,大气湍流由于受到入射电磁波的影响而形成偶极子,对入射电磁波进行二次辐射,从而达到超视距传播. 可以认为,大气湍流在对流层散射中起到关键作用. 大气折射率结构常数  $C_n^2$  是描述大气湍流特性的一个非常重要的参量,它既能表示大气湍流起伏的强弱,反映湍流谱的部分特征,又能描述湍流大气中的折射率不均匀性. 依此猜测,对流层散射传输损耗与  $C_n^2$  之间必然有一定的关联,而从近些年文献看来,关

于此类问题的研究涉及甚少. 基于此问题,本文首先推导了对流层散射传输损耗与  $C_n^2$  的关系式,将其定义为 L-C 模型;其次,开展了对流层散射传播试验,并基于 WRF 数值模式对试验期间链路对流层环境进行预报;最后,基于预报的  $C_n^2$  代入 L-C 模型预测的对流层散射传输损耗,并与实测值进行对比. 结果表明,应用 L-C 模型预测值与实测值变化趋势吻合较好,均方根误差不超过 6dB,且其传输损耗与  $C_n^2$  的相关系数大于 0.7,验证了对流层散射传输损耗与  $C_n^2$  之间确有强的相关性. 研究对流层散射传输损耗与  $C_n^2$  的关系,可为对流层散射传输损耗的确定性预测提供技术支撑. 实际应用时,可以考虑基于实测或模拟的对流层  $C_n^2$  数据,利用 L-C 模型,预测实时的对流层散射传输损耗.

## 2 L-C 模型

湍流非相干散射是对流层散射最主要的传播机理,具有严格的理论基础. 依据猜测,基于湍流非相干散射理论,探究对流层散射传输损耗与大气折射率结构常数之间的关系. 根据湍流非相干散射理论可知,湍流的作用主要表现在湍流散射截面上. 采用泰勒方法对湍流散射截面进行适当的近似,基于近似结果推导了传输损耗与  $C_n^2$  的函数关系式. 该函数关系中,当频率与传播链路固定时,传输损耗仅与  $C_n^2$  有关,将其定义为 L-C 模型. 下面给出 L-C 模型的推导过程.

已知,随机介质单位体积的微分散射截面<sup>[8]</sup>表达式为:

$$\sigma = \pi (k^2 \sin \chi)^2 \Phi(K) / 2 \quad (1)$$

其中, $k$  为波数, $K = 2k \sin(\Theta/2)$ , $\Theta$  为散射角, $\chi$  为入射电场方向与散射方向的夹角,当电磁波为水平极化时, $\chi = \pi/2$ ;垂直极化时, $\chi = \pi/2 + \Theta$ . 对流层散射中,一般情况  $\Theta \ll 1$ , $\sin^2 \chi \sim 1$ <sup>[9]</sup>.

又有科尔摩格罗夫理论<sup>[7]</sup>:

$$\Phi(K) = 0.033 C_n^2 K^{-11/3} \quad (2)$$

对式(2)进行泰勒近似,带入到式(1)中得到:

$$\sigma = 0.033 \times \frac{\pi}{2} k^{1/3} C_n^2 \Theta^{-11/3} \quad (3)$$

对流层散射信号接收功率中值<sup>[8]</sup>一般表示为:

$$P_2 = A_1 P_1 G_{10} G_{20} \left(\frac{\lambda}{4\pi}\right)^2 a \int_V \frac{g_1 g_2 K_1 K_2 \sigma}{(r_1 r_2)^2} dV \quad (4)$$

其中, $A_1$  为与信号衰落统计分布有关的常数, $G_{10}$ , $G_{20}$  为发射、接收天线增益, $a$  为大气吸收因子, $g_1$ , $g_2$  为发射、接收天线方向性函数, $K_1$ , $K_2$  为发射到散射点和散射点到接收点的地面反射因子,具体表达式<sup>[8]</sup>如下:

$$g_1 = \exp\{-a_1(\varphi_1 - \varphi_{10})^2 - b_1(\theta_1 - \theta_{10})^2\} \quad (5)$$

$$g_2 = \exp\{-a_2(\varphi_2 - \varphi_{20})^2 - b_2(\theta_2 - \theta_{20})^2\}$$

式中,

$$a_1 = 4 \ln 2 / \psi_{h_1}^2 \quad (6)$$

$$a_2 = 4 \ln 2 / \psi_{h_2}^2 \quad (7)$$

$$b_1 = 4 \ln 2 / \psi_{v_1}^2 \quad (8)$$

$$b_2 = 4 \ln 2 / \psi_{v_2}^2 \quad (9)$$

$\theta_1, \theta_2$  为发射、接收端仰角,  $\theta_{10}, \theta_{20}$  是发射、接收天线主轴仰角,  $\varphi_1, \varphi_2$  为发射、接收端方位角,  $\varphi_{10}, \varphi_{20}$  为发射、接收主轴方位角,  $\psi_{h_1}, \psi_{h_2}, \psi_{v_1}, \psi_{v_2}$  分别为发射、接收天线水平、垂直波束宽度. 这里, 角度单位为 mrad.

$$K_1 = 2[1 - \cos(2kh_{te}\theta_1)]$$

$$K_2 = 2[1 - \cos(2kh_{re}\theta_2)] \quad (10)$$

其中,  $h_{te}, h_{re}$  为发射、接收天线的有效高度(单位是 m).

一般情况下大气吸收损耗可忽略, 将式(3)代入到式(4)中, 求解积分并化简<sup>[10]</sup>, 得到:

$$L_b = 10 \lg \left( \frac{P_1}{P_2} \right) \approx 10 \lg (2.8550 \times 10^{-4} A_1 \eta \cdot \pi^{-1/6} \lambda^{5/3} C_n^2 \Theta_0^{-5/3} / d) \quad (11)$$

其中,  $\Theta_0$  为最小散射角, 单位是 mrad,  $\lambda$  为波长, 单位是 m,  $d$  为路径长度, 单位是 km. 对于瑞利分布而言,  $A_1 = \ln 2$ . 式(11)即为 L-C 模型.

L-C 模型推导过程中考虑收发双方均采用无方向性天线,  $L_b$  为基本传输损耗. 因此, 实际应用过程中还需考虑天线方向性的影响.

### 3 对流层散射传播试验

#### 3.1 试验介绍及数据处理

由于夏季湍流运动<sup>[11]</sup>较为剧烈, 试验时间选在七月至八月, 发射、接收端均采用喇叭天线, 试验传播示意图如图 1 所示.

部分试验参数见表 1.

表 1 试验参数

频率( $f$ )	5.8GHz
路径长度( $d$ )	56.2km
发射、接收天线离地高度( $h_t, h_r$ )	2.5/1.8m
发射、接收天线增益( $G_t, G_r$ )	20/20dB
发射、接收天线仰角( $\theta_t, \theta_r$ )	0/0mrad

试验链路高程剖面基于 SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) 数据获取. SRTM 是由美国太空总署 (NASA) 和国防部国家测绘局 (NIMA) 联合发射的“奋进”号航天飞机测量得到地理高程数据, 覆盖全球陆地表面的 80% 以上, 数据精度为  $3'' \times 3''$ . 根据 SRTM 数据获取试验链路高程剖面, 如图 2 所示.

对流层散射试验的传输损耗可由式(12)计算得出:

$$L = P_t + G_t + G_r + G_{LNA} - L_{cable} - P_r \quad (12)$$

其中,  $P_t$  为发射功率,  $G_{LNA}$  为低噪声放大器增益,  $L_{cable}$  为

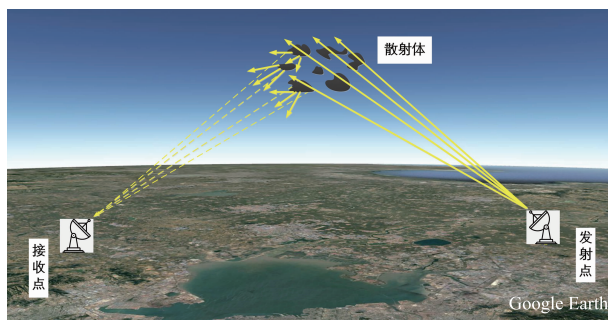


图1 试验传播示意图

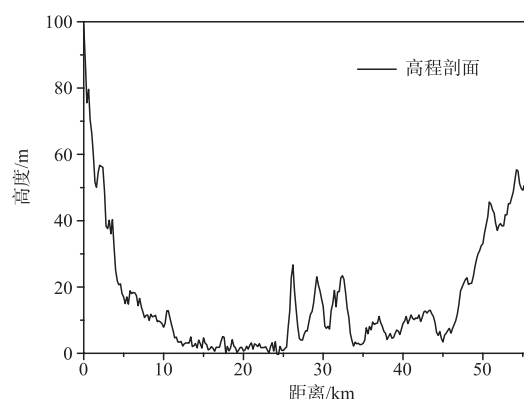


图2 试验链路高程剖面

馈线损耗,  $P_r$  为接收电平, 具体取值见表 2.

表 2 实验设备参数

发射功率( $P_t$ )	43dBm
低噪声放大器( $G_{LNA}$ )	40dB
馈线损耗( $L_{cable}$ )	6dB

图 3 给出了试验期间实测接收信号电平及其 5 分钟钟平均电平、小时中值电平随时间变化的结果. 综合三天结果可以看出, 正午时分接收信号电平衰落十分明显, 最大变化可达 30dB, 整体上电平值基本稳定在 -70dBm 左右, 下午到夜间时分电平值有所增大, 衰落幅度减小. 这可能是由于中午湍流活动较强, 多径效应显著, 信号变化幅度较大; 夜间相对白天湍流活动较弱, 信号较为平稳, 也有可能夜间为其他传播机理占主导作用, 由于夜间数据不足, 具体原因还有待研究.

根据文献[8]可知, 对流层散射信号的衰落型式分为瑞利型、广义瑞利型及瑞利矢量加反常随机矢量型三种, 不同传播机理下, 信号的衰落型式有所差异. 湍流非相干散射满足瑞利型衰落, 其 5 分钟内衰落信号应服从瑞利分布. 已知, 瑞利分布概率密度函数<sup>[12]</sup>为:

$$p_g(x) = \begin{cases} \frac{x}{\sigma_0^2} e^{-\frac{x^2}{2\sigma_0^2}}, & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases} \quad (13)$$

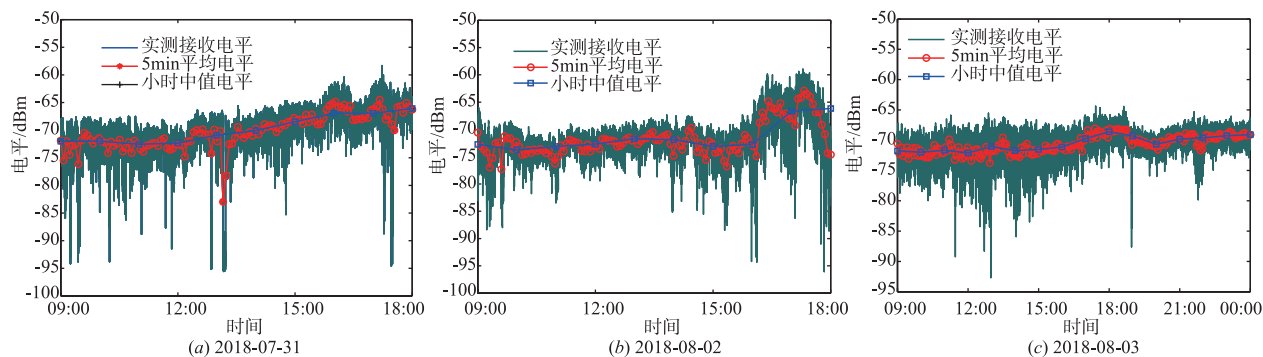


图3 电平随时间变化示意图

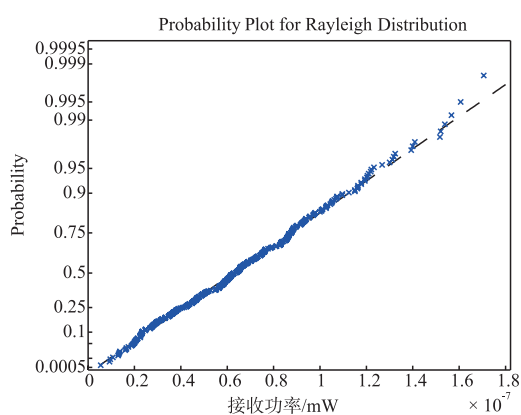


图4 某5分钟信号电平统计分布

图4给出了试验期间某5分钟信号统计分布,其横坐标接收功率,虚线为瑞利分布,从图中可以看到,试验数据较好的分布在虚线附近,可以判定试验数据符合湍流散射结果。

### 3.2 $C_n^2$ 数值模式预报

WRF 模式是美国国家大气研究中心(NCAR)、美国国家海洋和大气管理署(NOAA)和美国空军气象局(AFWA)等单位联合开发的中尺度数值预报系统<sup>[13]</sup>,它结合数据资料同化技术,可以精确预报出真实的大气环境.应用WRF数值模式<sup>[14]</sup>对试验期间链路 $C_n^2$ 进行预报.数值模式使用模式最内层嵌套数据,水平分辨

率为4km,垂直分辨率20m,网格点数据维度为时间、高度层、经度、纬度.提取链路散射点所在网格区域节点处温、压、湿、海拔高度等<sup>[15]</sup>数据,应用双线性内插方法,插值获得散射点处的温、湿、压等参数用于计算大气折射率结构常数.

由局地均匀的各向同性的平稳湍流理论<sup>[16]</sup>,可知大气折射率结构常数理论模型:

$$C_n^2 = a^2 \alpha' L_0^{4/3} M^2 \quad (14)$$

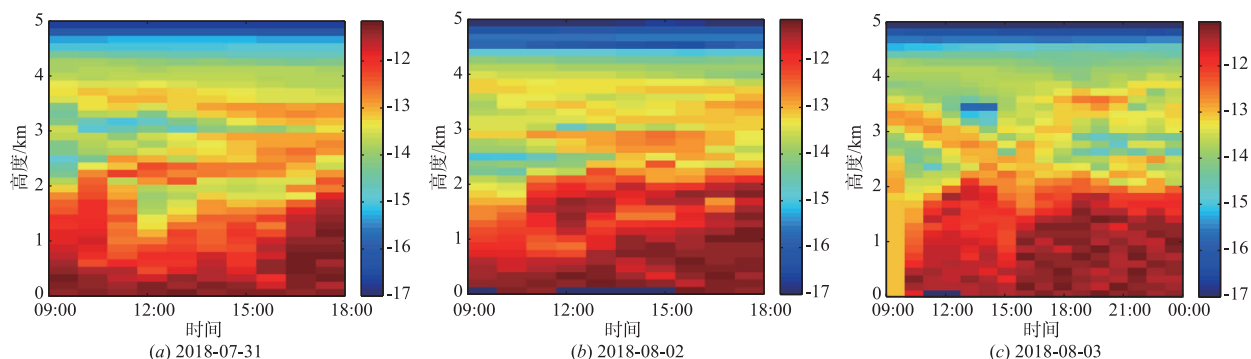
这里 $a^2$ 是普适常数,取为2.8; $\alpha'$ 为涡度扩散度的比,随着大气稳定情况稍有变化,取为1; $L_0$ 为湍流的外特征尺度,取为10m; $M$ 是折射率垂直梯度.

$$M = -77.6 \times 10^{-6} \frac{P}{T} \frac{\partial \ln \theta}{\partial h} \left[ 1 + \frac{15500q}{T} \left( 1 - \frac{1}{2} \frac{\partial \ln q / \partial h}{\partial \ln \theta / \partial h} \right) \right] \quad (15)$$

式中, $P$ 为大气压强,单位是hPa, $T$ 为热力学温度,单位是K, $q$ 为比湿, $\theta$ 为位温,单位是K, $h$ 为海拔高度,单位是m.

式(15)中的气象参数可通过数值模式的结果直接或间接获得,再结合式(14)可以获得 $C_n^2$ .

图5给出了基于WRF数值模式预报的大气折射率结构常数在不同高度上的分布,颜色代表 $C_n^2$ (取对数)值的大小.对比三天预测结果可以看出,地面以上两公里左右,大气折射率结构常数较大,湍流活动较为剧烈;高度越高,则大气折射率结构常数越小,湍流活动减弱。

图5 预报 $C_n^2$ 的高度分布图

#### 4 传输损耗与 $C_n^2$ 相关性研究

基于数值模式预报的  $C_n^2$  为 1 组/1 小时, 处理实测数据, 获取小时中值电平代入式(12)中, 计算试验传输损耗; 同时, 基于预报  $C_n^2$ , 应用 L-C 模型进行传播预测。

式(11)计算的为基本传输损耗。然而, 对流层散射传播中, 一般采用方向性天线。因此, 传播中还需考虑天线偏向损耗和天线口面介质耦合损耗。考虑到试验

中发射、接收端实际采用喇叭天线, 其天线波束宽度较宽, 天线偏向损耗影响较小, 这里可忽略。口面介质耦合损耗在一定条件下仅与收发天线增益之和有关, 表示为:

$$L_c = 0.07 \exp\{0.055(G_t + G_r)\} \quad (16)$$

将模型预测值加上口面介质耦合损耗与实测值进行对比, 结果如图 6 所示。

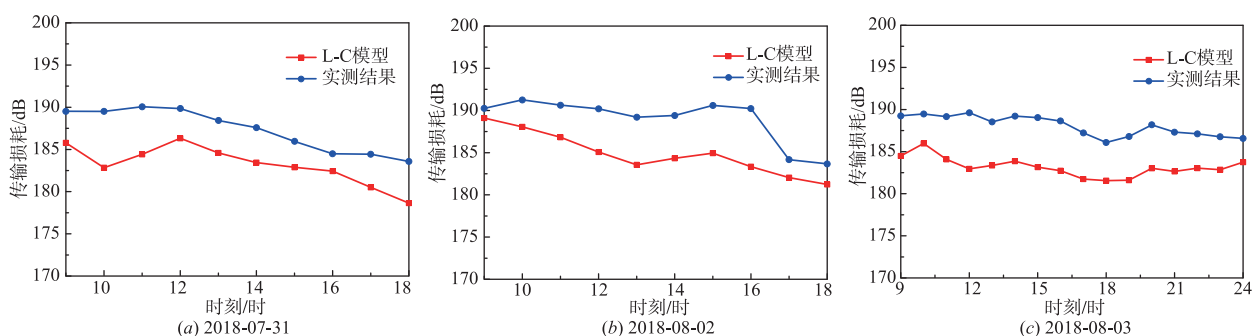


图6 L-C模型预测与试验测试传输损耗对比

将图 6 中模型预测值与实测值进行误差分析, 计算其差均值、标准差及均方根误差, 结果见表 3。

表 3 误差分析

时间	2018. 07. 31	2018. 08. 02	2018. 08. 03
误差均值	-4.1096	-4.4695	-5.7928
标准差	1.2934	1.8515	0.9662
均方根误差	4.2888	4.8022	5.8678

结合图 6 及表 3, 可以看出, 整体上模型预测值与实测值变化趋势吻合较好, 预测损耗值较为符合试验结果, 均方误差均不超过 6dB。针对对流层散射, 该误差较为合理, 验证了该模型预测结果的合理性以及正确性。

相关系数是衡量两个变量间相关程度的统计量, 分析折射率结构常数与传输损耗间的相关性, 计算其相关系数, 结果见表 4。

表 4 实测传输损耗与  $C_n^2$  的相关系数

时间	2018. 07. 31	2018. 08. 02	2018. 08. 03
相关系数	0.7615	0.7853	0.7519

一般来说, 相关系数的模值越大, 两个变量间相关程度越高。表 4 中三天的相关系数均达到 0.7 以上, 表明强相关, 且结合模型预测及实测结果的对比曲线, 可以确定对流层散射传输损耗与  $C_n^2$  间具有强的相关性。该结果对于对流层散射传播预测及湍流的影响研究具有十分重要的意义。

L-C 模型具有较好的预测结果。然而, 从图 6 和表 4 中可以看出, 模型与实测结果间仍存在误差。经分析,

误差来源可能为: ①天线低架造成误差。当天线架设高度较低时, 信号会受到天线附近地面及地面障碍物的反射、散射等, 造成误差。②数值模式预报结果存在误差。  $C_n^2$  是基于中尺度数值模式获得的, 数值预报分辨率有限, 精度不足, 造成  $C_n^2$  预测误差。③模型存在误差。目前, 大气湍流的研究还不完善, 湍流模型本身还存在误差; 同时, L-C 模型推导中进行了近似, 会造成一定的误差。

#### 5 结论

本文通过推导对流层散射传输损耗与大气折射率结构常数的关系, 提出了 L-C 模型; 基于对流层散射试验及 WRF 数值模式, 验证了对流层散射传输损耗与  $C_n^2$  间强的相关性。本文关于对流层散射传输损耗与  $C_n^2$  相关性的研究可应用于对流层散射的确定性传播预测。实际应用时考虑基于实测或模拟的对流层湍流结构常数数据, 利用 L-C 模型, 可以预测实时对流层散射传输损耗。

#### 参考文献

- [1] ITU-R, P. 617-1. Propagation Prediction Techniques and Data Required for the Design of Trans-Horizon Radio-Relay Systems[S]. Geneva, Switzerland, 1992.
- [2] HITNEY H V. A practical tropospheric scatter model using the parabolic equation[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1993, 41(7): 905-909.
- [3] SHEN X, VILAR E. Path loss statistics and mechanisms of transhorizon propagation over a sea path[J]. Electronics

- Letters, 1996, 32(3): 259 – 261.
- [4] ITU-R, P. 2001-1. A General Purpose Wide-range Terrestrial Propagation Model in the Frequency Range 30MHz to 50GHz [S]. Geneva, Switzerland, 2012.
- [5] BHATNAGAR P S, AGRAWALA S N, SINGH M D. Tropospheric scatter propagation measurements beyond the horizon in Arid Zone-A Note [J]. Defence Science Journal, 2014, 35(4): 411 – 416.
- [6] ITU-R, P. 617-4. Propagation Prediction Techniques and Data Required for the Design of Trans-horizon Radio-relay Systems [S]. Geneva, Switzerland, 2016.
- [7] 李磊. 对流层散射超视距传播预测建模与应用 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2016.  
LI L. Troposcatter Transhorizon Propagation Prediction Modelling and Application [D]. Xi'an: Xidian University, 2016.
- [8] 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: Publishing House of Electronics Industry, 2004. (in Chinese)
- [9] TATARSKI V T. 湍流大气中波的传播理论 [M]. 北京: 科学出版社, 1978.  
TATARSKI V T. The Theory of Wave Propagation in Turbulent Atmosphere [M]. Beijing: Science Press, 1978. (in Chinese)
- [10] 赵强. 基于湍流非相干散射理论的对流层散射传播特性研究 [D]. 青岛: 中国电波传播研究所, 2019.  
ZHAO Q. Research on Troposcatter Propagation Characteristics Based on the Turbulent Incoherent Scattering Theory [D]. Qingdao: China Research Institute of Radiowave Propagation, 2019. (in Chinese)
- [11] DINC E, AKAN O B. A ray-based channel modeling approach for MIMO troposcatter beyond-line-of-sight (b-LoS) communications [J]. IEEE Transactions on Communications, 2015, 63(5): 1690 – 1699.
- [12] CASELLA G, L BERGER R. Statistical Inference [M]. California: Duxbury Press, 2001.
- [13] 康士峰, 葛德彪, 罗贤云, 等. 抛物型波方程方法研究复杂环境对雷达和通信传播的影响 [J]. 电子学报, 2000, 28(6): 68 – 71.  
KANG S F, GE D B, LUO X Y, et al. Study on effects of the complex environment on radar and communication propagation with the method of parabolic equation [J]. Acta Electronica Sinica, 2000, 28(6): 68 – 71. (in Chinese)
- [14] 王石, 高山红. 一种蒸发波导的集合诊断方法及其数值预报应用 [J]. 电子学报, 2019, 47(05): 1049 – 1057.  
WANG S, GAO S H. An initial study on the applicability of Paulus-Jeske model of evaporation duct in Chinese sea areas [J]. Acta Electronica Sinica, 2019, 47(05): 1049 – 1057. (in Chinese)
- [15] 左雷, 察豪, 田斌, 等. 海上蒸发波导 PJ 模型在我国海区的适应性初步研究 [J]. 电子学报, 2009, 37(05): 1100 – 1103.  
ZUO L, CHA H, TIAN B. An ensemble diagnosis method for evaporation duct and its application in numerical prediction [J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(05): 1100 – 1103. (in Chinese)
- [16] 陈莉, 高山红, 康士峰, 等. 中国近海局部海域低空大气波导的天气学特征分析 [J]. 电子学报, 2010, 38(09): 1997 – 2002.  
CHEN L, GAO S H, KANG S F, et al. Synoptic features analysis of atmospheric ducts over chinese regional sea [J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(09): 1997 – 2002. (in Chinese)

#### 作者简介



赵 强 男, 1993 年 6 月出生, 陕西渭南人. 2019 年于中国电波传播研究所获得理学硕士学位. 主要研究方向为对流层散射传播.  
E-mail: Chrischao22s@163.com



张 蕊 女, 1979 年 12 月出生, 河北正定人. 西安电子科技大学在读博士, 中国电波传播研究所高级工程师, 研究方向为对流层电波传播、无线信道特性测试与建模等.  
E-mail: zhangr22s@163.com



林乐科 男, 1972 年 8 月出生, 山东荣成人. 南京邮电大学电磁场与微波技术专业博士, 中国电波传播研究所研究员, 张明高院士工作室科研助手. 长期从事电波环境与传播特性研究, 修订多项国际电联电波传播国际标准. 多次获国防科技进步奖. 在国内外期刊和会议合作发表论文两百余篇. 现为国际电联杂志《ITU Journal: ICT Discoveries》第三期电波传播专刊客座编辑 (Guest Editor), 中国电子学会高级会员, 中国空间科学学会会员, 《电波科学学报》编委.