

中低纬度电离层偶发E层电波传播建模

郝书吉 张文超 张雅彬 杨巨涛 马广林

Modeling of radio wave propagations under sporadic-E influence at low and middle latitudes

Hao Shu-Ji Zhang Wen-Chao Zhang Ya-Bin Yang Ju-Tao Ma Guang-Lin

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 66, 119401 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.119401

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.119401>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2017/V66/I11>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

人工沿场不均匀体对短波垂直探测影响的理论分析

Theoretical analysis of effects on high frequency vertical sounding by artificial field-aligned irregularities

物理学报.2017, 66(5): 059401 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.059401>

双频双波束加热电离层激发甚低频/极低频辐射理论分析

Theory of very low frequency/extra low frequency radiation by dual-beam beat wave heating ionosphere

物理学报.2017, 66(1): 019401 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.019401>

电离层调制加热产生极低频/甚低频波定向辐射的理论分析

Theory of ELF/MLF wave directional radiation by modulated heating of ionosphere

物理学报.2013, 62(22): 229402 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.229402>

不同释放高度的化学物质的电离层扰动特性

Ionospheric disturbances produced by chemical releases at different release altitudes

物理学报.2013, 62(20): 209401 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.209401>

电离层钡云释放早期动力学行为的数值模拟

Numerical simulation on the early dynamics of barium clouds released in the ionosphere

物理学报.2012, 61(8): 089401 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.089401>

## 中低纬度电离层偶发E层电波传播建模\*

郝书吉 张文超† 张雅彬 杨巨涛 马广林

(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, 青岛 266107)

(2017年1月4日收到; 2017年3月8日收到修改稿)

基于电离层偶发E层 (sporadic-E, Es) 对电波传播的多条链路实测数据, 认为电离层Es对入射电波的作用是反射和散射两种机制, 且反射/散射的比例常数随着电离层Es临界频率的变化而变化, 进而建立了包含反射、散射以及反射与散射共同作用的三段式电离层Es电波传播模型, 并与国际电联 (International Telecommunications Union, ITU) 给出的Es层传播的电波场强预测模型进行了对比, 验证了本文所建模型的正确性. 该模型尤其适用于中低纬地区甚高频信号经Es层的传播研究.

**关键词:** 电离层Es, 电波传播, ITU模型

**PACS:** 94.20.Vv, 94.30.Tz

**DOI:** 10.7498/aps.66.119401

## 1 引言

偶发E层 (sporadic-E, Es) 是电离层内一种短暂而不规则的强电离薄层, 其高度范围为90—140 km, 厚度从数百米至1 km不等, 水平尺度从几十千米到几百千米不等<sup>[1]</sup>. 电离层Es电子密度非常高, 可达到常规E层电子密度的100倍<sup>[2]</sup>. 利用Es层可以实现单跳2000 km的超短波超视距通信, 这对于建立超短波超视距应急通信保障系统具有重要意义.

研究人员从20世纪40年代就开始关注电离层Es对入射电波的影响及其信道特性, 主要基于电离层探测器, 通过甚高频 (very high frequency, VHF) 后向和斜入射链路对不同纬度的Es层进行观测和统计研究. 但由于观测手段和统计方法的不同, 结论也不尽相同. 早在1964年, 日本学者Kobayashi<sup>[3]</sup>通过长1100 km的VHF链路观测, 初步认为电离层Es的反射损耗与电波入射角( $\theta$ )和电离层Es临界频率( $f_{oEs}$ )的关系为 $\Gamma = 25[f \cos(\theta)/f_{oEs}]^{2.67}$ , 其中 $\theta$ 为高度105 km的镜反射入射角; 1972年, Bramley<sup>[4]</sup>认为电离

层Es中VHF信号传播的反射系数与 $(f_{oEs}/f)^j$ 成正比, 其中 $j$ 的值在7—30之间; 1972年, Althouse和Davis<sup>[5]</sup>研究了Es层的散射特性, 并对其后向散射进行了评估; 1978年, 日本的Miya和Shimizu<sup>[6]</sup>通过Tokyo-Wakkanai链路观测, 得到经电离层Es的电波传播经验公式; 1980年, Kerblay和Makarenko<sup>[7]</sup>研究了Es层的大尺度水平不均匀性对反射系数的影响, 并给出了中间点位置的反射系数; 1999年, 国际电联 (International Telecommunications Union, ITU) 在ITU-R p.1240建议书中给出了Es的临界频率发生概率分布图, 可以预测世界各地Es的发生; 2007年, Sherstyukov和Akchurin<sup>[8]</sup>对中纬度Es层单跳传播方式建模, 用来预测Es层传播的可用频率分布; 2012年, ITU发布了计算经过Es层电波场强的建议书, 在建议书中给出了经过Es传播的电离层Es衰减经验公式, 其衰减值是入射电波频率与电离层临界频率比值的二次方成正比; 2015年, Sherstyukov等<sup>[9,10]</sup>通过对高频 (HF) 和VHF频段的无线电波测量数据的统计分析, 也获得了电离层Es的反射损耗.

上述研究主要从反射角度并基于大量实验观

\* 中国电科技术创新基金 (批准号: A171601C01) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zhangwenchao0726@126.com

测数据研究电离层Es对入射电波的作用, 从电离层Es对电波的反射系数和传播损耗方面进行了分析和建模研究. 本文基于多条链路实验数据, 认为电离层Es对入射电波的作用很难用单一的反射或散射作用机制进行解释, 结合中低纬地区电离层Es电子密度分布特性及其中各向异性结构的尺度关系, 判断电离层Es对入射电波的作用可能是散射作用和反射作用两者机制都存在, 并且反射作用的比例常数随着电离层Es临界频率的变化而变化. 据此, 根据不同链路上的测量数据, 建立了包含反射、散射以及反射与散射共同作用的三段式电离层Es电波传播模型, 并与ITU模型进行了对比, 验证了本文所建模型的正确性.

## 2 电离层Es电波传播理论

理论和实验研究表明: 电离层Es电子密度非常高, 会对入射的VHF波段信号产生反射作用, 同时Es层内部存在大量电子密度不规则体, 会对入射的信号产生散射作用.

### 2.1 反射理论

理论和试验研究表明 [2,11]: 电离层Es层电子密度梯度在垂直方向上相对比较陡峭, 据此特点, 可假定Es层是由水平方向上为有限尺度的、垂直方向上具有不同介电常数的无数个薄介电层组成, 针对每一个薄介电层, 其VHF信号经过Es层的反射示意图见图1. 其中  $d$  为发射点和接收点的距离;  $\theta$  为掠射角;  $a$  和  $b$  为两个方向上的水平尺度,  $a > \sqrt{\lambda d}$ ,  $b > \sqrt{\lambda d}/\theta$  ( $\lambda$  是入射波波长). 若相邻层的介电常数的增量为  $d\epsilon$ , 且满足  $1 \gg \theta^2 \gg d\epsilon$ , 则薄层间的反射系数为  $d\rho = d\epsilon/(4\theta^2)$ .

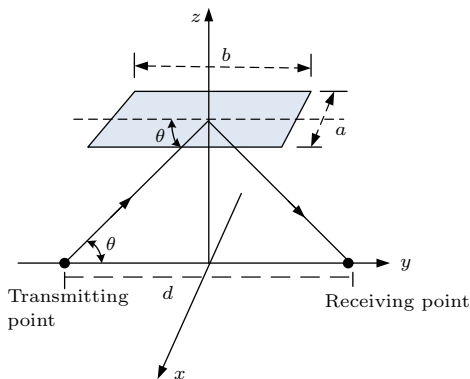


图1 薄层反射几何示意

Fig. 1. Geometry of a thin layer model.

目前, 普遍认为“风剪切”理论是中纬度Es层形成的物理机制. 设Es层电子密度在“风剪切”的作用下其垂直分布满足如下分布 [12]:

$$N = N_{\max} \left[ 1 - \left( \frac{z'}{\Delta h} \right)^{2n} \right], \quad (1)$$

其中,  $N_{\max}$  是电离层Es最大电子密度;  $\Delta h$  是Es层半厚度;  $z' = z - h$ ,  $h$  为Es的中心高度,  $|z'| \leq \Delta h$ ;  $n = 1, 2, 3, \dots$ . 通常Es层介电常数  $\epsilon$  可写为 [13]

$$\epsilon = 1 - \frac{Ne^2}{m_e \epsilon_0 \omega^2} = 1 - \frac{f_N^2}{f^2} \left[ 1 - \left( \frac{z'}{\Delta h} \right)^{2n} \right], \quad (2)$$

其中  $f_N$  是Es层最大等离子体频率,  $f_N = \sqrt{N_{\max} e^2 / (4\pi^2 m_e \epsilon_0)}$ ;  $\epsilon_0$  是自由空间介电常数,  $f$  是入射波频率,  $\omega = 2\pi f$ ;  $e$  是电子电量,  $m_e$  是电子质量. 根据反射理论, 总反射系数为

$$\begin{aligned} \rho &= 2 \int_0^{\Delta h} d\rho \exp \left[ -j \frac{4\pi z'}{\lambda} \sin \theta \right] dz' \\ &= \frac{n(2n-2)! f_N^2}{f^2 \theta^2 L^{2n}} \left[ (-1)^n \sum_{k=0}^{n-1} \frac{L^{2k}}{2k!} (-1)^k \right. \\ &\quad \left. \times \left( \cos L + \frac{L \sin L}{2k+1} \right) + 1 \right], \end{aligned} \quad (3)$$

其中  $\lambda$  为入射波波长;  $L = 4\pi \sin \theta \Delta h / \lambda$ . 根据雷达方程, 则经过Es层反射的VHF信号接收功率为

$$P_r = P_t \frac{G_r G_t \lambda^2}{(4\pi)^2 D^2} \rho^2, \quad (4)$$

其中  $P_t$  为发射功率,  $G_t$  和  $G_r$  分别为发射和接收天线在指向Es高度方向的增益,  $D$  为传播路径.

### 2.2 散射理论

与对流层或常规F层不规则体相比 [14,15], 电离层Es不规则体尺度要大得多 [16,17], 因此可用其电子密度自相关函数来分析其散射现象 [18]. 一般Es层电子密度自相关函数为

$$C_m(p) = C(0) \left[ \frac{2^{1-m}}{\Gamma(m)} \right] p^m K_m(p), \quad p = \frac{\gamma}{l}, \quad (5)$$

其中:  $C(0)$  是大气折射系数的时间方差, 在Es中  $C(0) = (\lambda/\lambda_N)^4 (\Delta N/N)/4$ ;  $\Gamma$  为伽马函数,  $\gamma$  为Es不规则体尺度,  $l$  为一般湍流的尺度,  $p$  为常数因子,  $K_m(p)$  为二类高阶修正贝塞尔函数. 由于电离层Es电子密度通常比一般散射体的要大, 用高阶修正贝塞尔函数可更好地反映其散射特性 [19].

根据散射理论 [20], 电离层Es不规则体散射截面积为

$$\begin{aligned} \sigma_n &= \frac{k^4 \sin^2 \chi}{16\pi^2 v} \operatorname{Re} \left[ \frac{16\pi j v l}{q} \int_0^\infty r C_m(p) \exp(-jqpr) dr \right] \\ &= \frac{\left(\frac{\Delta N}{N}\right)^2 \left(\frac{\lambda}{\lambda_N}\right)^4 \Gamma\left(m + \frac{3}{2}\right) (p)^{2m} L_1 L_2 L_3 \left[1 + \left(\frac{p\lambda}{4\pi L_3 \sin \theta}\right)^2\right]^{-(m+\frac{3}{2})}}{2^{2m+4} \sqrt{\pi} \Gamma(n) k^{2m-1} [L_3 \sin \theta]^{2m+3}}, \end{aligned} \quad (6)$$

其中  $q = 2kl \sin \theta$ ;  $\chi$  为散射方向与入射电场方向的夹角;  $L_1, L_2$  是 Es 层不规则体在水平方向上平行、正交于水平漂移的不同尺度,  $L_3$  是 Es 不规则体在垂直方向的尺度.

根据 (5) 式, Es 层不规则体尺度可表示为  $\gamma = pl$ ,  $p$  由 Es 层电子密度自相关函数和修正贝塞尔函数的阶数决定, 通常电子密度自相关函数<sup>[21]</sup> 取值为 0.5, 按照中低纬地区的经验取值, 修正贝塞尔函数的阶数  $m$  取 5<sup>[12]</sup>, 由 (5) 式可确定出  $p = 3.5, \gamma = 3.5l$ . 则电离层 Es 不规则体散射截面进一步表示为

$$\begin{aligned} \sigma_5 &= 1.03 \times 10^2 \\ &\times \frac{\left(\frac{\Delta N}{N}\right)^2 \left(\frac{f_N}{f}\right)^4 L_1 L_2 \left[1 + \left(\frac{3.5\lambda}{4\pi L_3 \sin \theta}\right)^2\right]^{-\frac{13}{2}}}{\left(\frac{2\pi L_3}{\lambda}\right)^9 L_3^3 [\sin \theta]^{13}}. \end{aligned} \quad (7)$$

根据雷达方程, 则经电离层 Es 散射的 VHF 信号接收功率为

$$P_r = \frac{P_t \Delta h G_t G_r \lambda^2}{2\pi^2 D^2 \sin^2 \theta} \sigma_5(\theta, \lambda). \quad (8)$$

### 3 电离层 Es 电波传播模型

为了深入研究中纬度地区电离层 Es 层 VHF 传播特性, 选择在夏季 Es 高发的时段开展了电离层 Es 层 VHF 信号测量试验, 实验共进行了 20 余天, 有效实验数据约 100 h. 为覆盖不同的区域和距离, 试验采用南北和东西两种链路布局. 其中南北布局为昆明-西安的链路 1, 距离为 1065 km; 东西布局有两条链路, 其中德宏-怀化链路 2, 距离为 1240 km, 德宏-郴州链路 3, 距离为 1590 km. 试验使用了多个测量频率, 并在每条链路中重点使用了一个频率, 分别为 50.5, 45.5, 31 MHz. 测量链路布局如图 2 所示.

实验期间典型 VHF 信号接收功率以及对应的频高图如图 3 所示. 由图 3 可以看出: 在无 Es 期间 VHF 接收信号大多淹没在噪声中, 且信号起伏较大, 不稳定; 随着电离层 Es 由弱变强, 接收信号逐渐增强. 因此判定正常 E 区以及 F 区不规则结构相对突发 Es 层的散射能力很弱, 本文有效数据要求: 1) 明显出现 Es 且持续至少 1 min 时段; 2) 信号至少高于背景噪声 10 dB. 同时参照信道时延功率谱将较强的 F 层不均匀体散射的数据剔除. 经上述数据筛选后, 三条测量链路的 VHF 信号平均接收功率随着 Es 层临界频率与入射频率的比值  $f_{oEs}/f$  的变化如图 4 所示.

由图 4 可以看出: 在三条测量链路中 VHF 信号平均接收功率随着  $f_{oEs}/f$  的增长而上升. 但 VHF 信号接收功率低端增长缓慢, 中间段快速上升, 高端增长又变缓. 利用第 2 节给出的反射和散射理论对链路 1 进行仿真, 根据电离层 Es 的厚度通常在几百米到 1 km, 其不规则体水平方向尺度在几十米到几百米, 垂直方向尺度几十米, 选择反射作用机制中的  $n = 5$ , 电离层 Es 半厚度  $\Delta h$  取 50 和 500 m, 散射作用机制中垂直尺度  $L_3$  取 30 m, 水平方向尺度  $L_1$  取 50 和 300 m, 仿真结果如图 5 所示.

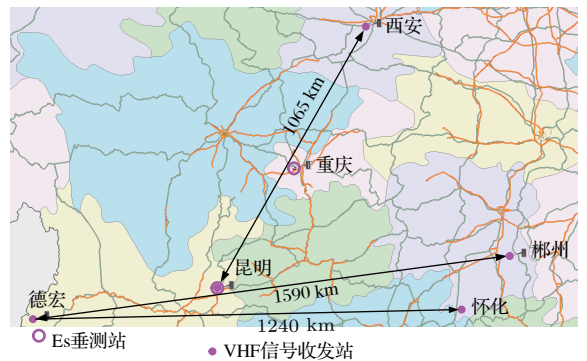


图 2 实验测量链路布局

Fig. 2. Link-arrangement of test and measurement.

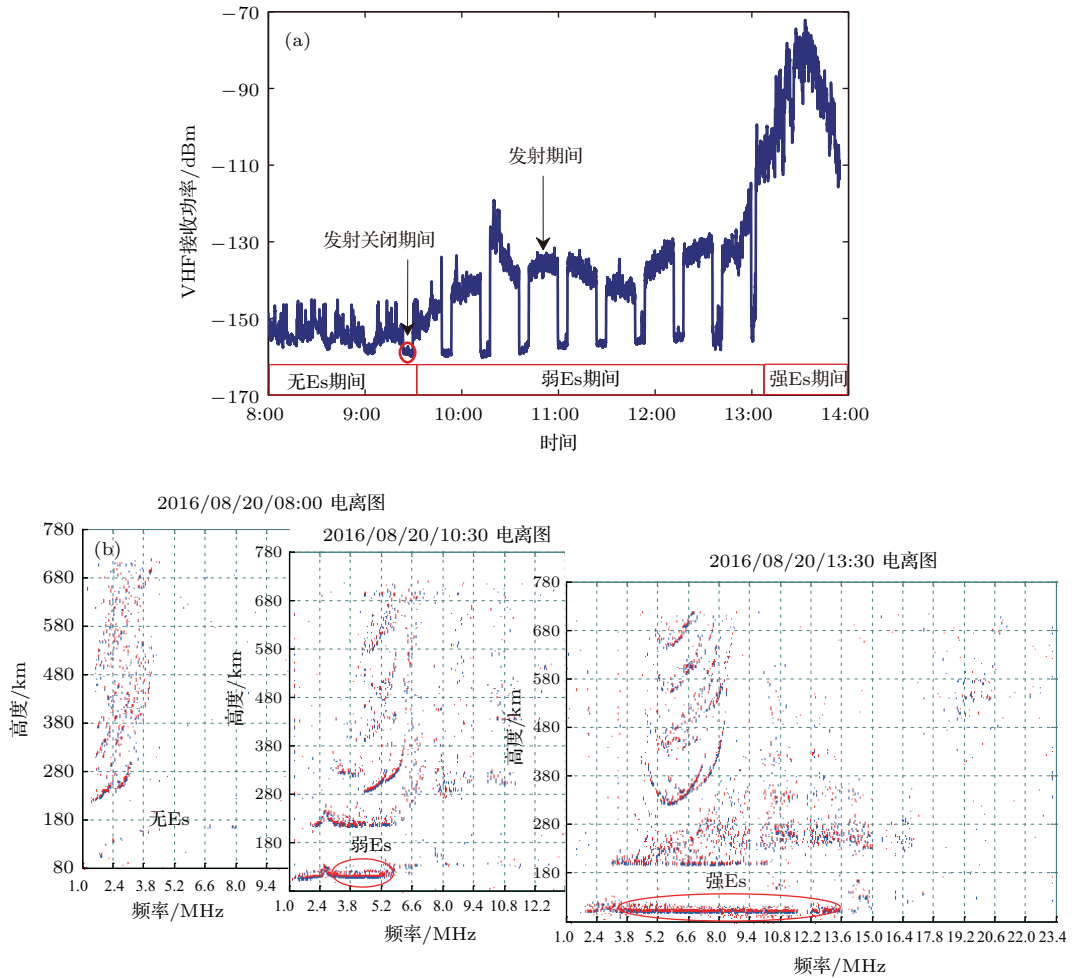


图3 (网刊彩色) 实验期间典型测量结果 (a) VHF 接收信号功率; (b) 链路中点垂测仪观测结果

Fig. 3. (color online) Typical measurement results during the test: (a) Received power of VHF signal; (b) results of ionosonde in midpoint of measurement-link.

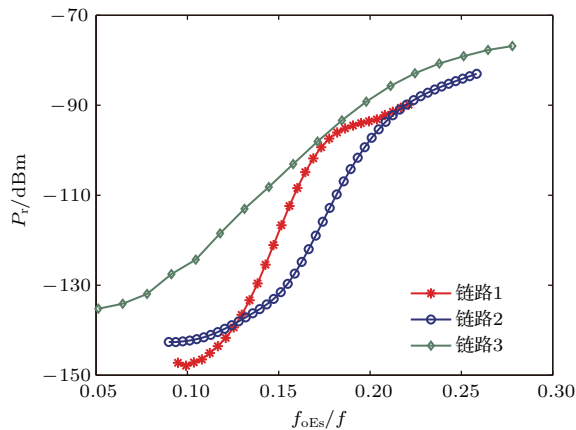


图4 VHF 信号接收功率随  $f_{oEs}/f$  的变化

Fig. 4. Received power of VHF signal changed with  $f_{oEs}/f$ .

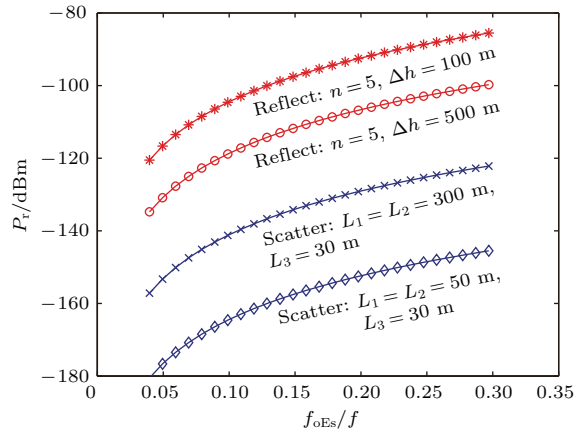


图5 VHF 信号接收功率仿真

Fig. 5. Simulation of the received power of VHF signal.

由图5可以看出, 在  $f_{oEs}/f$  高端, VHF 接收信号平均功率与反射作用机制相符, 在低端与散射机制相符. 而在中间过渡区, VHF 信号接收功率快速

上升, 其斜率和  $f_{oEs}/f$  较高和较低区域明显不同, 即在该区域已经不能用单一的反射作用或散射作用机制解释, 据此可初步判断在该区域可能是反射

与散射的共同作用机制, 并且随着  $f_{oEs}/f$  的上升, 反射作用机制逐渐增强.

下面通过实测数据并结合电离层 Es 对无线电波的反射和散射作用机制, 研究并建立电离层 Es 电波传播模型. 首先定义实测数据与仿真结果(基于反射作用机制或散射作用机制)之间的平均误差  $\bar{\delta}$  为

$$\bar{\delta} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{P'_{ri} - P_{ri}}{P_{ri}} \right|, \quad (9)$$

其中,  $N$  是在考察区域内样本点的个数;  $P_r, P'_r$  是实测接收功率和仿真接收功率. 为均衡不同链路中的误差, 定义本次测量试验中三条链路实测数据与仿真结果之间的总平均误差  $\bar{\delta}_{\text{总}}$  为

$$\bar{\delta}_{\text{总}}(\Delta h) = \frac{1}{3} [\bar{\delta}_1(\Delta h) + \bar{\delta}_2(\Delta h) + \bar{\delta}_3(\Delta h)]. \quad (10)$$

### 3.1 反射作用分析

根据 (3) 式, 对于入射到电离层 Es 单一频率电波, 在收发两点距离、Es 层高度确定后, 影响反射信号强度的主要是 Es 层的半厚度  $\Delta h$  和电离层 Es 的电子密度分布指数  $n$ . 当  $n$  相同时,  $\Delta h$  越大, 电波衰减越大, 接收功率越小. 事实上, 相同电离层 Es 反射系数具有多组  $n$  和  $\Delta h$  的组合, 本文按照中低纬地区的经验 [22] 取值  $n = 5$ , 通过实验数据确定等效半厚度  $\Delta h$ . 根据前面论述, 经 Es 传播的 VHF 接收信号在  $f_{oEs}/f$  高端主要是 Es 反射作用, 设这一区间为  $f_{oEs}/f > f_r$ ,  $f_r$  为完全可用反射作用机制解释的阈值. 图 6 给出了不同等效半厚度下, 三条链路经电离层 Es 反射的实测结果与基于反射作用机制仿真结果的平均误差  $\bar{\delta}$  随  $f_r$  的变化, 表 1 给出了三条链路中均满足实测数据与仿真结果  $\bar{\delta} < 2\%$  时的不同链路阈值  $f_r$  和总平均误差  $\bar{\delta}_{\text{总}}$ .

通常  $\bar{\delta} < 2\%$  在实际测量中已经是比较苛刻的要求, 由图 6 可以看出满足此要求的条件为: 链路 1 中  $90 \text{ m} < \Delta h < 140 \text{ m}$ , 链路 2 中  $80 \text{ m} < \Delta h < 130 \text{ m}$ , 链路 3 中  $110 \text{ m} < \Delta h < 150 \text{ m}$ . 综合三条链路测试结果, 当  $\Delta h$  在  $110\text{--}130 \text{ m}$  区间取值时, 三条链路中可同时满足实测数据与仿真结果的误差  $\bar{\delta} < 2\%$ . 此时, 从表 1 中可以看出, 当  $\Delta h$  取值为  $115 \text{ m}$  时三条链路总平均误差  $\bar{\delta}_{\text{总}}$  最小, 对应的阈值依次是  $0.14, 0.21, 0.25$ . 而在低于这个阈值时,

基于反射作用机制的仿真结果与实测结果之间误差  $\bar{\delta}$  随着  $f_r$  的减小逐渐增大, 表明电离层 Es 对电波的反射作用机制已经不能很好地解释实测数据.

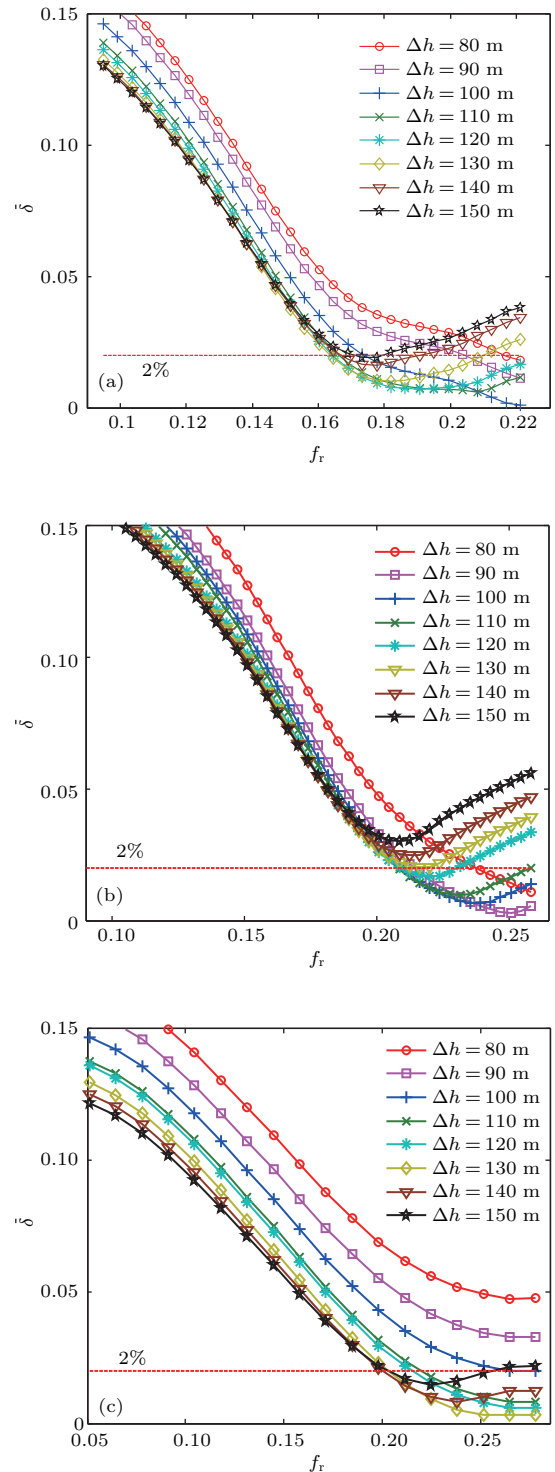


图 6 (网刊彩色) 不同等效半厚度下平均误差  $\bar{\delta}$  随  $f_r$  的变化 (a) 链路 1; (b) 链路 2; (c) 链路 3

Fig. 6. (color online) Average error  $\bar{\delta}$  under different half-thickness changed with  $f_r$ : (a) Link 1; (b) Link 2; (c) Link 3.

表1 实测数据与基于反射作用仿真结果误差  $\bar{\delta}$  均小于 2% 的门限值与平均误差

Table 1. The threshold and total average error under the average error  $\bar{\delta}$  between measured power and simulated power based on reflecting process less than 2%.

$\Delta h$	链路1		链路2		链路3		$\bar{\delta}_{\text{总}}$
	$f_r$	$\bar{\delta}$	$f_r$	$\bar{\delta}$	$f_r$	$\bar{\delta}$	
110	0.14	0.0057	0.21	0.0104	0.25	0.0126	0.0118
115	0.14	0.0064	0.21	0.0146	0.25	0.0126	0.0112
120	0.14	0.0064	0.21	0.0182	0.25	0.0102	0.0116
125	0.14	0.0097	0.21	0.0182	0.22	0.0063	0.0114
130	0.14	0.0133	0.21	0.0227	0.22	0.0063	0.0144

如果在整个电离层 Es 持续时间内  $\Delta h$  变化不大, 上述结果表明: 某一频率的 VHF 电波入射 Es 层, 当  $f_{\text{oEs}}/f$  达到某个门限值时, 接收端接收到的信号主要来自于 Es 层对 VHF 电波的反射. 当  $f_{\text{oEs}}/f$  大于此门限值时, 可用电离层 Es 反射作用机制进行解释, 此时 Es 反射系数等效表示为

$$\rho = 2.016 \times 10^5 \frac{f_N^2}{f^2 \theta^2 L^{10}} \left[ - \sum_{k=0}^4 \frac{L^{2k}}{2k!} (-1)^k \times \left( \cos L + \frac{L \sin L}{2k+1} \right) + 1 \right], \quad (11)$$

当  $f_{\text{oEs}}/f$  低于该值时, 需寻求其他机制去解释.

### 3.2 散射作用分析

根据 (10) 式, 电离层 Es 中不规则体水平尺度相同时, 垂直方向上尺度越大, 衰减越大; 而当垂直方向上尺度相同时, 水平尺度越大, 衰减越小. 根据前面的论述, 经 Es 传播的 VHF 接收信号在  $f_{\text{oEs}}/f$  低端主要是 Es 散射作用, 设这一区间为  $f_{\text{oEs}}/f < f_s$ ,  $f_s$  是完全可用散射作用解释的门限值. 如果测量期间 Es 层的厚度变化不大, 按照中低

纬地区的经验取值, 通常垂直方向尺度  $L_3$  取 30 m, 水平方向上两个尺度  $L_1$  和  $L_2$  相差不大, 即认为  $L_1 \approx L_2$ , 在垂直尺度固定情况下, 通过实验数据确定  $L_1$  和  $L_2$ . 图 7 给出了不同水平尺度下三条链路基于 Es 散射作用的仿真结果与实测数据平均误差随  $f_s$  的变化, 表 2 给出了三条链路中均满足实测数据与仿真结果  $\bar{\delta} < 2\%$  时的不同链路门限值  $f_s$  和总平均误差  $\bar{\delta}_{\text{总}}$ .

根据 3.1 节中  $\bar{\delta} < 2\%$  的误差要求, 由图 7 可以看出满足此要求的条件为: 链路 1 中  $160 \text{ m} < L_1 < 240 \text{ m}$ , 链路 2 中  $160 \text{ m} < L_1 < 200 \text{ m}$ , 链路 3 中  $160 \text{ m} < L_1 < 280 \text{ m}$ . 综合三条链路测试结果, 当  $L_1$  或  $L_2$  在 160—200 m 区间取值时, 三条链路中可同时满足实测数据与仿真结果的误差  $\bar{\delta} < 2\%$ . 此时, 从表 2 中可以看出, 当  $L_1$  或  $L_2$  取值为 190 m 时三条链路总平均误差  $\bar{\delta}_{\text{总}}$  最小, 对应的门限值依次是 0.11, 0.14, 0.13. 而在低于这个门限值时, 基于散射作用机制的仿真结果与实测结果之间的误差  $\bar{\delta}$  随着  $f_s$  的增大逐渐增大, 表明电离层 Es 对电波的散射作用机制已经不能很好地解释实测数据.

表2 实测数据与基于散射作用仿真结果误差  $\bar{\delta}$  均小于 2% 的门限值与总平均误差

Table 2. The threshold and total average error under the average error  $\bar{\delta}$  between measured power and simulated power based on scattering process less than 2%.

$L_1$	链路1		链路2		链路3		$\bar{\delta}_{\text{总}}$
	$f_s$	$\bar{\delta}$	$f_s$	$\bar{\delta}$	$f_s$	$\bar{\delta}$	
170	0.10	0.0111	0.15	0.0064	0.12	0.0201	0.0376
180	0.11	0.0081	0.15	0.0085	0.13	0.0160	0.0326
190	0.11	0.0061	0.14	0.0117	0.13	0.0126	0.0294
200	0.11	0.0075	0.14	0.0160	0.13	0.0119	0.0354
210	0.11	0.0102	0.14	0.0201	0.13	0.0119	0.0422

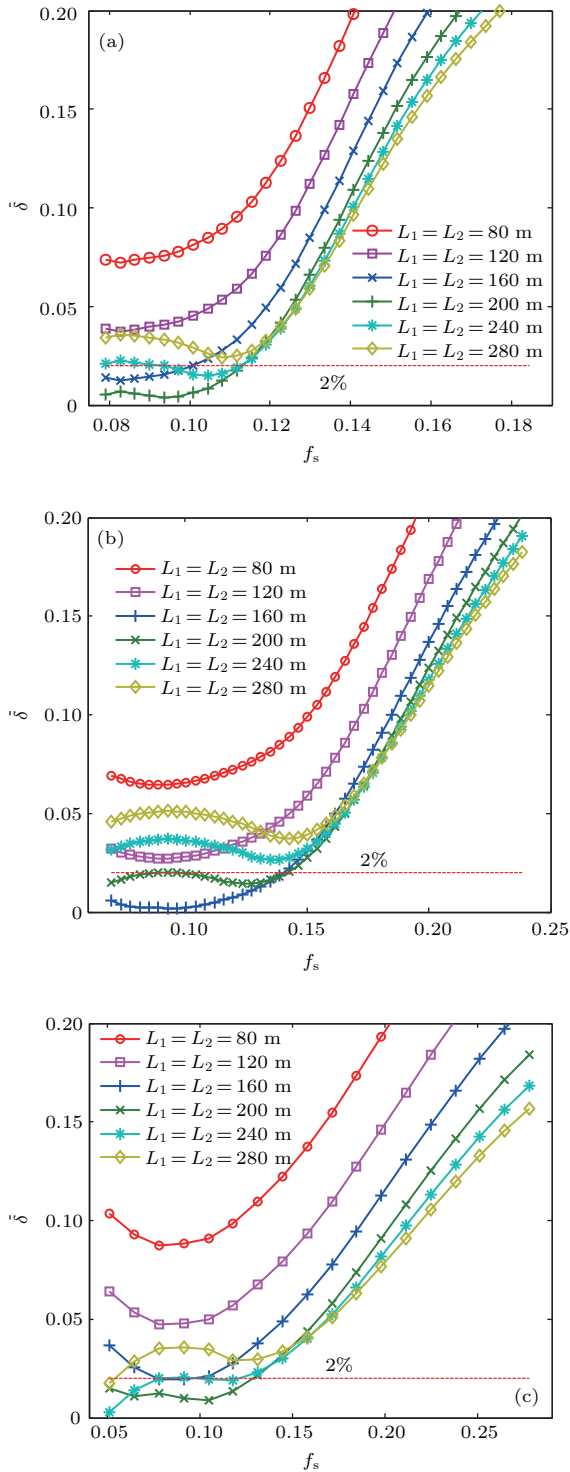


图7 (网刊彩色) 不同水平尺度下平均误差  $\bar{\delta}$  随  $f_s$  的变化 (a) 链路1; (b) 链路2; (c) 链路3  
 Fig. 7. (color online) Average error  $\bar{\delta}$  under different scale changed with  $f_s$ : (a) Link 1; (b) Link 2; (c) Link 3.

如果在整个电离层Es持续时间内  $L_1, L_2, L_3$  变化不大, 上述结果表明: 当某一频率的VHF电波入射Es层, 当  $f_{oEs}/f$  低于某个门限值时, 接收端接收到的信号主要来自于Es层对VHF电波的散射, 此时Es散射截面可以等效表示为

$$\sigma = 1.42 \times 10^{15} \lambda^9 \left( \frac{f_N}{f} \right)^4 \times [(120\pi \sin \theta)^2 + (3.5\lambda)^2]^{-\frac{13}{2}}, \quad (12)$$

当  $f_{oEs}/f$  大于该门限值时, 需寻求其他机制去解释.

### 3.3 电离层Es电波传播模型

综合分析3.1节和3.2节仿真结果, 发现在链路1中当  $f_{oEs}/f$  在0.11—0.14区间时, 链路2中  $f_{oEs}/f$  在0.14—0.21区间时, 链路3中  $f_{oEs}/f$  在0.13—0.25区间时, 利用反射作用机制和散射作用机制都不能有效解释实测结果. 根据前面的分析, 电离层Es对入射的电波既有反射作用机制, 又有散射作用机制, 两种作用随电离层的背景条件而发生变化. 设反射作用机制与散射作用机制比例常数为  $k_r, k_s$ , 且  $k_r + k_s = 1$ , 则此时接收端VHF信号强度  $P_r$  可表示为

$$P_r = k_r H_r P_t + k_s H_s P_t, \quad (13)$$

其中,  $P_t$  是VHF信号发射功率;  $H_r, H_s$  为对应Es层对VHF信号反射作用和散射作用机制的传输参数.

根据上述分析, 此区间即为  $f_s < f_{oEs}/f < f_r$ , 据此判断, 当  $f_{oEs}/f$  在某个区间取值时, 可能是反射作用机制和散射作用机制共同起作用. 将在此区间内  $f_{oEs}/f$  归一化, 令  $f' = (f_{oEs}/f - f_s)/(f_r - f_s)$ . 假定该区间内反射/散射参数不变, 则三条测量链路反射作用机制比重  $k_r$  及其指数拟合、线性拟合如图8所示.

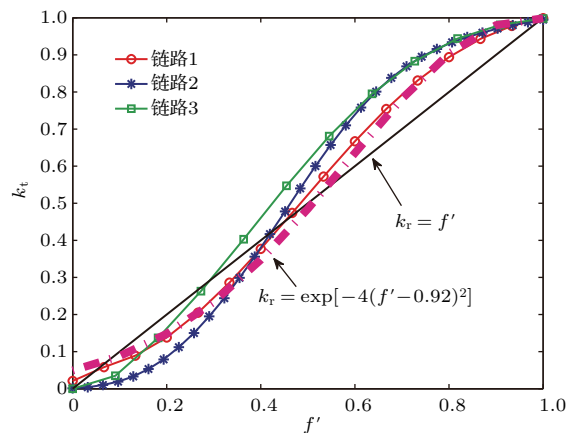


图8 (网刊彩色) 过渡区域内反射作用所占比重的拟合结果  
 Fig. 8. (color online) The fitting result of coefficient reflection process in transition section.



由图 8 可以看出, 在此区间内反射作用所占比重随着  $f'$  的上升而逐渐增大, 并且反射作用所占比重更符合指数分布,

$$k_r = \exp\{-4(f' - 0.92)^2\}. \quad (14)$$

确立过渡区域反射作用和散射作用所占比重后, 整个 Es 存在期间内电离层 Es 对电波的作用随  $f_{oEs}/f$  变化的作用机制即确定. 根据上面的分析, 将 (11), (12) 和 (14) 式代入 (13) 式, 建立由散射作用、散射与反射共同作用、反射作用三段式电离层 Es 电波传播模型, 表示为

$$P_r = P_t \frac{G_r G_t \lambda^2}{(4\pi)^2 D^2} \left(\frac{f_N}{f}\right)^4 \left\{ 4.06 \times 10^{10} \frac{k_r}{\theta^4 L^{20}} \times \left[ -\sum_{k=0}^4 \frac{L^{2k}}{2k!} (-1)^k \left( \cos L + \frac{L \sin L}{2k+1} \right) + 1 \right]^2 + 2.61 \times 10^{18} (1 - k_r) \sec \theta \lambda^9 [(120\pi \sin \theta)^2 + (3.5\lambda)^2]^{-\frac{13}{2}} \right\}, \quad (15)$$

其中:  $P_t$  为发射功率;  $G_t$  和  $G_r$  分别为发射和接收天线在指向 Es 高度方向的增益;  $D$  为传播路径;  $\lambda$  是入射波波长;  $\theta$  为掠射角,  $L = 460\pi \sin \theta / \lambda$ .  $k_r$  是反射信号所占比重, 符合如下分布:

$$k_r = \begin{cases} 0, & f_{oEs}/f < f_s, \\ \exp\left\{-4\left[\frac{(f_{oEs}/f - f_s)}{f_r - f_s} - 0.92\right]^2\right\}, & f_s < f_{oEs}/f < f_r, \\ 1, & f_{oEs}/f > f_r. \end{cases} \quad (16)$$

其中:  $f_r$  是完全反射作用机制解释的门限值,  $f_s$  是完全散射作用机制解释的门限值. 在本次测量中, 链路 1 中  $f_r = 0.14$ ,  $f_s = 0.11$ ; 链路 2 中  $f_r = 0.21$ ,  $f_s = 0.14$ ; 链路 3 中  $f_r = 0.25$ ,  $f_s = 0.13$ . 根据该模型的 (15) 式和 (16) 式对三条链路进行模拟, 结果如图 9 所示.

由图 9 可以看出, 本文给出的三段式动态模型很好地解释了实验期间接收端 VHF 信号幅度的变化:  $f_{oEs}/f > f_r$  区间, VHF 信号传播符合电离层 Es 反射作用机制;  $f_{oEs}/f < f_s$  区间, VHF 信号传播符合散射作用机制; 而在  $f_s < f_{oEs}/f < f_r$  区间, 是散射和反射共同作用机制, 且随着  $f_{oEs}/f$  的增大反射作用所占比重逐渐增强.

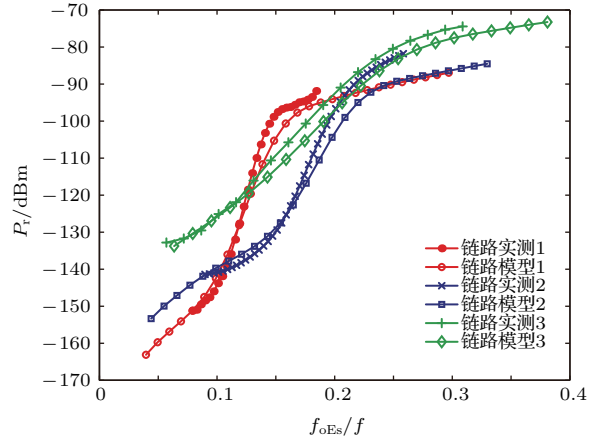


图 9 (网刊彩色) 基于本文 Es 电波传播模型的仿真结果和实测数据

Fig. 9. (color online) The result of simulated on the proposed model of radio wave propagation under Es and the result of measurement.

### 3.4 模型对比

根据本文所建立的模型, 对三条链路中电离层 Es 对入射电波的衰减进行仿真, 并与 ITU 模型比较. 设 Es 高度 110 km, 链路 1 中  $f = 50.5$  MHz,  $f_r = 0.14$ ,  $f_s = 0.11$ ; 链路 2 中  $f = 45.5$  MHz,  $f_r = 0.21$ ,  $f_s = 0.14$ ; 链路 3 中  $f = 31.5$  MHz,  $f_r = 0.25$ ,  $f_s = 0.13$ . 仿真结果如图 10 所示.

利用本文模型计算的 VHF 信号衰减值与 ITU 模型结果一致, 特别是在  $f_{oEs}/f$  高端时, 一致程度更好; 但在  $f_{oEs}/f$  取较小的值时, 利用本文模型计算的 VHF 信号衰减值要小很多. 分析其原因, 本文所建模型是针对中低纬地区电离层 Es 对电波作用的实测数据, 电离层 Es 特性电离层背景关系比较密切, 不同纬度地区电离层 Es 特性有差别, 而 ITU 模型是基于中高纬地区的实测数据而建立, 其应用中低纬纬度误差会增大; 其次, ITU 模型预测时采用实验数据统计后的经验值, 与实测结果也存在差异, 因此这种差异会导致误差; 最后, ITU 预测模型误差会随着  $f_{oEs}/f$  减小而增大, 在特别是对于  $f_{oEs}/f$  取较小值时, 电离层 Es 对入射电波主要是散射作用机制, 而散射作用远小于反射作用, 进一步增大了误差. 因此, 我们认为本文所建更适用于中低纬地区.

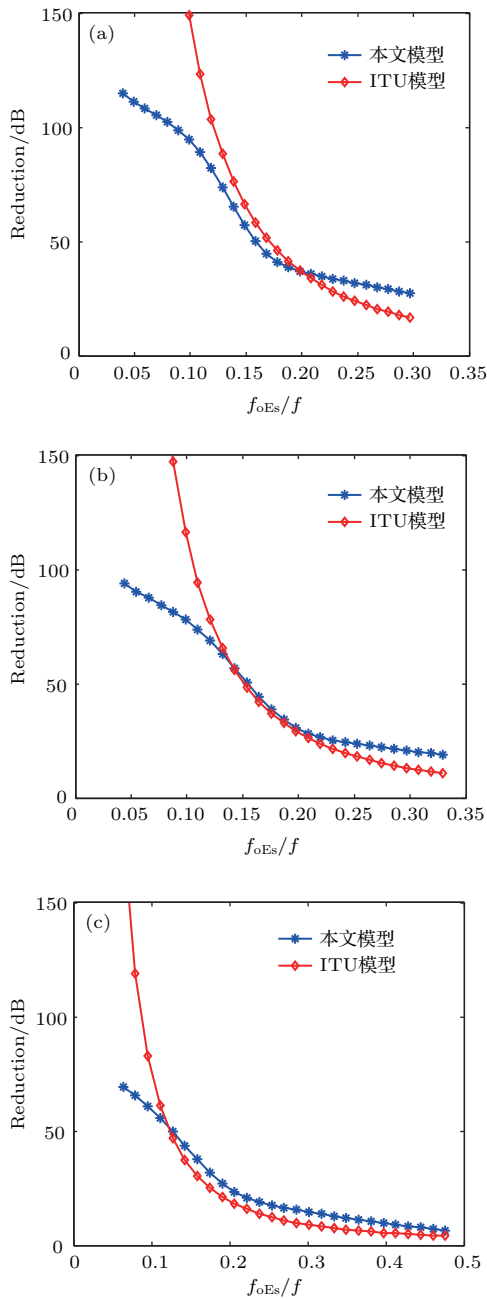


图10 VHF信号接收功率随 $f_{oEs}/f$ 变化 (a)链路1; (b)链路2; (c)链路3

Fig. 10. Received power of VHF signal changed with  $f_{oEs}/f$ : (a) Link 1; (b) Link 2; (c) Link 3.

## 4 结 论

本文基于实测数据,结合电离层Es电子密度分布特点,建立包含散射、反射与散射共同作用以及反射的三段式动态电离层Es电波传播模型,该模型中电离层Es对入射电波的作用随 $f_{oEs}/f$ 变化如下:

1) 当 $f_{oEs}/f$ 高于某一门限(完全可用反射作用机制解释的门限值 $f_r$ )时,VHF信号经Es层的传播

符合反射作用机制;

2) 当 $f_{oEs}/f$ 低于某一门限(完全可用散射作用机制解释的门限值 $f_s$ )时,VHF信号经Es层的传播符合散射作用机制;

3) 当 $f_{oEs}/f$ 在 $f_s$ 与 $f_r$ 之间的过渡区域时,VHF信号经Es层的传播是反射和散射共同作用机制,且此区间随着 $f_{oEs}/f$ 增大,反射作用机制逐渐增强.

对三条链路实验数据统计可发现,不同链路间 $f_r$ 和 $f_s$ 的值存在差异,尤其是链路1中 $f_r$ , $f_s$ 与链路2链路3中的 $f_r$ , $f_s$ 差异较大,其可能原因是链路1与链路2、链路3地理位置中心点距离较远,电离层背景参数差异较大,如E层或F2层的散射强度等;同时由于采用的探测波频率也不相同,也可能导致各链路模型参数存在差异.

由于本文在模型建立过程中基于的实验数据相对较少,模型参数确认与优化还需要后期通过大量实验数据完成.但本文所建模型是依据中低纬度地区测量数据,在后期模型优化后可以用来预测VHF频段信号经Es传播能量分布,具有较强的工程应用价值.

## 参考文献

- [1] Smith L G, Mechtly E A 1972 *Radio Sci.* **7** 367
- [2] Beynon W J G, Maude A D 1972 *Planet. Space Sci.* **20** 809
- [3] Kobayashi T 1964 *Radio Res.* **11** 181
- [4] Bramley E N 1972 *J. Atmos. Terr. Phys.* **34** 1495
- [5] Althouse E L, Davis J R 1972 *Radio Sci.* **7** 897
- [6] Miya K, Shimizu K 1978 *Radio Sci.* **13** 559
- [7] Kerblay T S, Makarenko S F 1980 *Geomagn. Aeron.* **20** 449
- [8] Sherstyukov O N, Akchurin A D 2009 *Adv. Space Res.* **43** 1835
- [9] Sherstyukov O N, Akchurin A D 2011 *General Assembly and Scientific Symposium*. Istanbul, Aug. 13–20, 2011 p1
- [10] Sherstyukov O N, Akchurin A D, Sherstyukov R O 2015 *Adv. Space Res.* **56** 1169
- [11] Whitehead J D 1989 *J. Atmosph. Solar-Terr. Phys.* **51** 401
- [12] Tao K 1962 *Ionospheric Sporadic E* (New York: MacMillian Company) p235
- [13] Pan W Y 1981 *Acta Phys. Sin.* **30** 661 (in Chinese) [潘威炎 1981 物理学报 **30** 661]
- [14] Zeng Z, Sokolovskiy S 2010 *Geophys. Res. Lett.* **37** 1480
- [15] Huang C S, Li J 1994 *Acta Phys. Sin.* **43** 1476 (in Chinese) [黄朝松, 李钧 1994 物理学报 **43** 1476]
- [16] Zhang Q, Wu X J 2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 038102 (in Chinese) [张卿, 武新军 2016 物理学报 **65** 038102]

- [17] Deng F, Zhao Z Y, Shi R, Zhang Y N 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 7382 (in Chinese) [邓峰, 赵正予, 石润, 张援农 2009 物理学报 **58** 7382]
- [18] Booker H G, Gordon W E 1950 *Proceed. Ire.* **38** 401
- [19] Norton K A 1956 *Commun. Syst. Ire Trans.* **4** 39
- [20] Malaga A 1986 *Rome Air Development Center Air Force Systems Command Griffiss Air Force Base New York, Aug 1985* p13441
- [21] Booker H G, Gordon W E 1958 *Proceed. Ire.* **46** 298
- [22] Ovezgeldyev O G 1988 *Geomagn. Aeron.* **28** 1024

## Modeling of radio wave propagations under sporadic-E influence at low and middle latitudes\*

Hao Shu-Ji Zhang Wen-Chao<sup>†</sup> Zhang Ya-Bin Yang Ju-Tao Ma Guang-Lin

(National Key Laboratory of Electromagnetic Environment, China Research Institute of Radiowave Propagation, Qingdao 266107, China)

( Received 4 January 2017; revised manuscript received 8 March 2017 )

### Abstract

The sporadic-E (Es) layer is a thin layer of several kilometers existing at an altitude around 100 km and features extremely dense ionized irregularities, which can reflect or scatter high frequency (HF) and very high frequency (VHF) radio waves. The most popular theoretical explanation for mid-latitude Es formation is the wind shear theory. Measurements by rocket sounding have shown that Es has high electron density and relatively sharp density gradient in the vertical direction. The one-hop propagation of VHF signal in Es can even reach as far as 2000 km. In this paper, we consider incident radio waves influenced by Es via both reflecting and scattering processes at low and middle latitudes, the coefficients of which are related to and vary with the critical frequency of Es ( $f_{oEs}$ ). Firstly, with a supposed parabolic density distribution and the autocorrelation function of the electron density given by Booker, HF and VHF radio wave propagations in Es are analyzed according to the reflection and scattering theory. Secondly, a numerical model for the combined reflecting and scattering processes is developed in the form of piecewise function, the contribution of which can be distinguished by the portion factor of reflection ( $k_r$ ). According to the model, there are two threshold ratios of the critical frequency to the wave frequencies  $f_r$  and  $f_s$  respectively. The incident radio waves are totally reflected by Es when  $f_{oEs}/f$  is higher than  $f_r$  and mostly scattered when  $f_{oEs}/f$  is lower than  $f_s$ . A transition zone exists between two critical points, with the combined processes working together. Thirdly, HF/VHF radio wave propagations in low and middle latitudes of Es are in the north-southern direction and east-western direction separately. The experiment link in the north-southern direction is from Kunming to Xi'an at distance of 1065 km, and the ionosonde used for Es observation is located at Chongqing. Two east-west links are arranged, one of which is from Dehong to Huaihua and the other is from Dehong to Chenzhou, with the ionosonde located at Kunming and the ground distance as far as 1240 km and 1590 km respectively. The measurement data are treated and parameters of the above mentioned model for wave propagation in Es are experimentally determined. Finally, our model is verified by comparing with ITU-R model. Our results are consistent with the results from the ITU-R model when the  $f_{oEs}/f$  is high (i.e., the reflecting process plays a main role). When the scattering process dominates, the attenuation value of VHF signal is far less than that predicted by the ITU-R model, which is closer to actual measurements. It is concluded that our model is more preferable for HF and VHF radio wave propagations in Es at low and middle latitudes.

**Keywords:** sporadic-E, radio wave propagation, International Telecommunications Union model

**PACS:** 94.20.Vv, 94.30.Tz

**DOI:** 10.7498/aps.66.119401

\* Project supported by the Technology Innovate Fund of China Electronics Technology Group Corporation (Grant No. A171601C01).

† Corresponding author. E-mail: [zhangwenchao0726@126.com](mailto:zhangwenchao0726@126.com)