0254-6124/2019/39(1)-055–07 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

ZHANG Yabin, WU Jian, XU Zhengwen, XU Bin, XUE Kun, ZHAO Haisheng, CUI Yuguo. Radio propagation model of ionospheric sporadic E (in Chinese). *Chin. J. Space Sci.*, 2019, **39**(1): 55-61. DOI:10.11728/cjss2019.01.055

电离层 Es 电波传播模型研究 *

张雅彬　吴　健　许正文　徐　彬
薛　昆　赵海生　崔玉国

(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)

摘　要　考虑大气折射的影响, 对不同高度 Es 层条件下大圆路径传播距离与仰角的关系进行计算. 基于电离层 Es 电子密度时空分布特点, 建立高阶 Es 反射模型; 运用高阶修正贝塞尔函数表示电离层 Es 电子密度扰动的自相关函数, 综合考虑电离层 Es 各向异性结构的尺度关系, 建立高阶 Es 散射模型. 仿真计算 Es 层 VHF 斜入射传播衰减与频率、距离的关系. 对于反射模型, Es 层厚度越厚, 电波衰减越大. 对于散射模型, Es 层不规则体水平尺度相同, 垂直水平漂移的尺度越大, 衰减越大; 而垂直水平漂移的尺度相同, 水平尺度越大, 衰减越小. 无论反射模型还是散射模型, f_0E_s 越高, 衰减越小; 电波工作频率越高, 衰减越大. 对比建立的模型与 VHF 链路的测量结果, 明确不同强度的电离层 Es 反射/散射机制, 证明了建立模型的正确性.

关键词　电离层 Es, 电波传播, 反射模型, 散射模型

中图分类号　P 354

Radio Propagation Model of Ionospheric Sporadic E

ZHANG Yabin　WU Jian　XU Zhengwen　XU Bin
XUE Kun　ZHAO Haisheng　CUI Yuguo

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

Abstract　Considering the influence of atmospheric refraction, the relationship between the great-circle propagation distance and the elevation angle under different height Es layers is calculated. Based on the numerical model of ion density of the Es layer, and using an autocorrelation function of the fluctuation of electron density given by modified Bessel functions of the fifth, the reflection and scattering models are built considering the scale of irregularities. The relationships between the attenuation of the VHF oblique incident propagation of the Es layer and the frequency are simulated by the models. For the reflection model, the thicker the Es layer is, the greater the attenuation is. For the scattering model, the larger the vertical and horizontal drift scale are, the greater the attenuation is under the same horizontal scale of Es layer irregularities. However, if the vertical and horizontal drifts are same, the attenuation is inversely proportional to the horizontal scale. In

* 国家自然科学基金项目资助 (61601419, 11672068)
2017-07-11 收到原稿, 2018-04-09 收到修定稿
E-mail: ybzhang_2001@163.com

reflection and scattering models, the higher the f_0E_s is, the smaller the attenuation is while the higher the operating frequency of radio waves is, the greater the attenuation is. The results also agree well with the observations of Es propagation path. Es reflection/scattering mechanism is clear for different intensity of ionosphere.

Key words Sporadic E, Radio propagation, Reflect model, Scatter model

0 引言

Es 层斜入射传播包括 VHF 长路径传输、斜向探测和后向探测等, 主要用于研究电离层 Es 特性、高度分布、结构及点对点通信等. Miya[1] 根据链路观测, 得到一些理论及经验公式, 能够对 Es 信号强度进行计算; Kerblay[2] 运用几何光学理论对 Es 传播轨迹进行计算; Althouse 和 Davis[3] 对后向散射进行了评估, 包括非遮蔽 Es 层; Kerblay 和 Makarenko[4] 研究了大尺度水平不均匀性的影响, 并给出了中间点位置的反射系数. Sinno 等 [5], Kobayashi[6], Sherstyukov 等 [7], Sherstyukov 等 [8] 通过 HF 和 VHF 频段的无线电波得到了电离层 Es 的反射损耗. Li 等 [9] 利用欧洲非相干散射雷达和电离层垂直探测仪的观测数据, 根据 Es 层的部分反射传播机制和分层媒质电波传播理论, 计算了电波在 Es 层中的部分反射系数. 上述研究给出的反射系数均为经验公式结果, 并不是基于传播理论得出的模型.

电离层长距离反射通信已被广泛应用, 需要特殊的技术确定 Es 层的传播方式、信号强度和相位改变. Clarke 和 Tibble[10] 发现, 经 Es 层传播的波形由三个或更多的多普勒频移分量组成, 而且有微小的仰角改变. 发射端发射持续时间 10 μs 的脉冲信号, 传播距离为 1620 km. Minulln[11] 发现, 在接收端 97% 的时间脉冲扩展小于初始脉冲长度, 这可能是多径传播造成的. 一些 Es 层回波持续几个小时, 其他则持续更少的时间. Edwards 等 [12] 发现, 40% 的 Es 层持续时间小于 2 min. Kerblay 等 [13,14] 发现, Es 层衰落周期为 5 s (持续时间小于 2 min), 但没有快速的相位改变. Edwards 等 [12] 对频率为 59~77 MHz 超过 10 年的 Es 观测链路 (1000~2500 km) 数据进行分析, 得到了不同工作频率下可通率的日变化、季节变化以及持续时间等参数 [12].

20 世纪 60 年代, 欧洲的 VHF 电视信号经常受到来自其他发射台站信号的干扰, 后来证实干扰伴随着电离层 Es 发生. 为了研究 Es 层对 VHF 电视广播信号的影响, 欧洲广播协会 (European Broadcasting Union, EBU) 开展了广泛的观测测量, 测量链路为 26 条 (900~2500 km), 持续时间为 11 年, 即一个完整的太阳活动周期, 观测频率为 41~60 MHz[15,16]. Tagholm 等 [16] 根据 EBU 测量结果, 对 Es 层传播的日变化、季节变化进行了统计, 研究发现 Es 层传播距离一般为 800~2600 km, 距离太短容易穿透, 太长则单跳难以到达, 需要双跳实现; 链路的纬度不同, 结果也有差异, 北欧观测链路的接收信号场强约有 5% 的时间低于南部 20 dB; 发射接收天线同为水平极化或垂直极化时的接收信号比收发天线极化分量相互垂直时高出 5 dB; 随着工作频率的增高, 接收信号快速衰减. Ravichandran 和 Rao[17] 分别开展了传输距离为 500 km 和 700 km 的跨赤道观测链路, 并成功接收到载波频率为 175.25 MHz 和 196.25 MHz 的视频信号.

中国电波传播研究所、中国电子科技集团第五十四所也进行了 Es 层通信的相关观测实验. 而国内外结合 Es 层不规则体尺度分析并建立电离层 Es 反射、散射模型等方面的研究较少.

本文基于建立的电离层 Es 电子密度剖面分布模型, 对中纬度 Es 层回波进行了分析, 运用高阶修正贝塞尔函数表示 Es 层电子密度扰动的自相关函数, 综合考虑 Es 层各向异性结构的尺度关系, 建立了高阶 Es 反射、散射模型. 运用模型仿真计算了 Es 层 VHF 斜入射传播衰减与频率、距离的关系, 并与实验观测结果进行了对比.

1 大气折射作用下的电离层 Es 传播路径

考虑大气折射的影响, Es 层传播路径的几何示意如图 1 所示. 图 1 中的参考坐标系为极坐标系统, 中心为地心. 假定大气为球面分层, 电波从 T 点发射

经 Es 层在中间点 M 反射后到达接收点 R.

大气电波折射指数 n 为高度的函数. ϕ 为 $P(r,\theta)$ 点电波射线与球面切平面的夹角. 根据斯涅耳折射定律, 收发点的大圆路径距离为

$$d = 2R\int_0^{\phi_h} \frac{\mathrm{d}\phi}{1+\dfrac{r}{n}\dfrac{\mathrm{d}n}{\mathrm{d}r}}. \tag{1}$$

其中 R 为地球半径. 根据斯涅耳折射定律, 有

$$\phi_h = \arccos\left[n(R)\frac{R}{R+h}\cos\alpha\right]. \tag{2}$$

其中, h 为 Es 层的高度, α 为大圆路径射线的仰角.

大气折射系数可表示为

$$n(r) = 1 + a\exp[-b(r-R)]. \tag{3}$$

其中 a 和 b 为常数. 因此, 令 $r \approx R\cos\alpha/\cos\phi$, 收发点的表面距离为

$$d \approx 2R\int_0^{\phi_h} \frac{\exp\left[-bR\left(\dfrac{\cos\alpha}{\cos\phi}-1\right)\right]}{1-abR\dfrac{\cos\alpha}{\cos\phi}}\mathrm{d}\phi. \tag{4}$$

式 (4) 直接计算比较困难, 运用数值积分的方法可将其表示为 [1]

$$d \approx 2R\sum_{j=0}^{J-1} k_j(\phi_{j+1}-\phi_j). \tag{5}$$

其中, $r_0 = R$, $r_j = R+h$, $n_j = 1+a\exp[-b(r_j-R)]$, $\phi_j = \arccos[n_0R/(n_jr_j)\cos\alpha]$, $k_j = \left(1+\dfrac{r_j+r_{j+1}}{n_{j+1}+n_j}\dfrac{n_{j+1}-n_j}{r_{j+1}-r_j}\right)^{-1}$.

表 1 给出了在各种大气条件下常数 a 和 b 的值 [1], 图 2 给出了基本参数大气条件下经 Es 层传播仰角和大圆路径距离的关系.

在各向同性大气中, 传播路径在中间点 M 对于 Es 层的入射角可表示为

$$\sec i = \sqrt{1+\left[\frac{\sin\left(\dfrac{d}{2R}\right)}{1+\dfrac{h}{R}-\cos\left(\dfrac{d}{2R}\right)}\right]^2}. \tag{6}$$

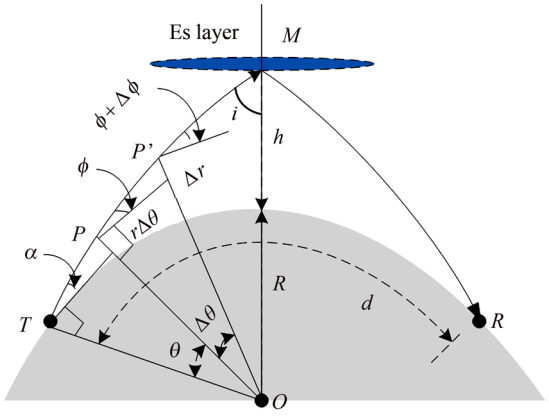


图 1 Es 层传播路径的几何示意

Fig. 1 Es layer propagation path

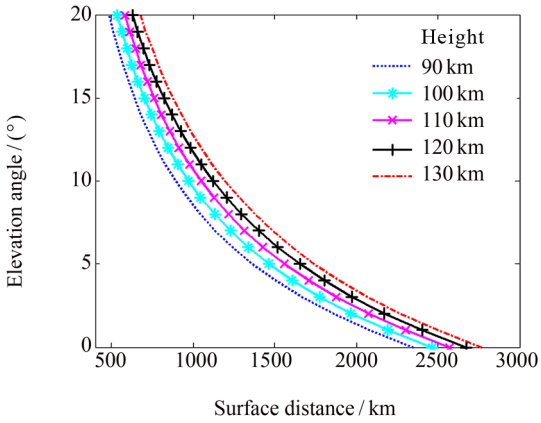


图 2 不同高度 Es 层条件下大圆路径传播距离与仰角的关系

Fig. 2 Relationship between the great-circle propagation distance and the elevation angle as Es is at different height

表 1 不同大气条件下常数 a 和 b 的值

Table 1 Values of constant a and b under different atmospheric conditions

常数	各向同性大气	基本参考大气	指数大气		
			$N_0 = 340$, $\Delta N = 45$	$N_0 = 360$, $\Delta N = 50$	$N_0 = 390$, $\Delta N = 50$
a	0	289×10^{-6}	289×10^{-6}	289×10^{-6}	390×10^{-6}
b	0	0.136	0.142	0.150	0.137

2 电离层 Es 反射模型

通过测量发现, Es 层电子密度梯度在水平和垂直方向上相对比较陡峭 [18−20]. 假设 E 层中存在很多薄介电层, 在水平方向上其尺度范围有限. 根据折射理论, 若反射系数为 ρ, 那么接收功率为

$$P_{\mathrm{r}} = P_{\mathrm{t}} \frac{A_{\mathrm{t}} A_{\mathrm{r}}}{d^2 \lambda^2} \rho^2. \tag{7}$$

其中, P_{t} 为发射功率, A_{t} 和 A_{r} 分别为发射和接收天线的有效面积, d 为发射和接收的距离.

假设 Es 层由许多薄层组成, 而且每层介电常数不同, 相邻层的介电常数增量为 $\Delta\varepsilon$. 若 $\mathrm{d}\varepsilon \ll \theta^2 \ll 1$, 那么薄层间的反射系数为 [20]

$$\mathrm{d}\rho = \frac{\mathrm{d}\varepsilon}{4\theta^2}. \tag{8}$$

根据 Es 层电子密度分布特点, 设 Es 层电子密度垂直方向上分布满足以下形式

$$N = N_{\max}\Big[1 - \Big(\frac{z}{\Delta h}\Big)^{2n}\Big], \quad n = 1, 2, 3, 4, 5. \tag{9}$$

其中, Δh 为 Es 层的半厚度, $N_{\max}$ 为最大电子密度.

忽略碰撞作用及地球地磁场影响, 那么电离层介电常数为

$$\varepsilon = 1 - \frac{f_N^2}{f^2}\Big[1 - \Big(\frac{z}{\Delta h}\Big)^{2n}\Big]. \tag{10}$$

任意增量层的反射电场为

$$\mathrm{d}E_{\mathrm{r}} = \mathrm{d}\rho E_i \exp\Big(-\mathrm{j}\,\frac{4\pi z}{\lambda}\sin\theta\Big)\mathrm{d}z. \tag{11}$$

对式 (10) 进行对 z 的微分并代入式 (11) 得

$$\mathrm{d}E_{\mathrm{r}} = \frac{n}{2}\frac{f_N^2}{f^2}\frac{z^{2n-1}}{(\Delta h)^{2n}\theta^2} E_i \cdot \exp\Big(-\mathrm{j}\,\frac{4\pi z}{\lambda}\sin\theta\Big)\mathrm{d}z. \tag{12}$$

对所有增量层进行积分, 得反射电场为

$$E_{\mathrm{r}} = \frac{n f_N^2 E_i \lambda^{2n}}{f^2 (\Delta h)^{2n}\theta^2 (4\pi\sin\theta)^{2n}} \cdot \sum_{m=1}^{n} (-1)^{m+1}\frac{(2n-2)!}{(2n-2m)!}\Big[(2n-1)\cdot \Big(\frac{4\pi\sin\theta\Delta h}{\lambda}\Big)^{2n-2m}\cos\Big(\frac{4\pi\sin\theta\Delta h}{\lambda}\Big) + \Big(\frac{4\pi\sin\theta\Delta h}{\lambda}\Big)^{2n-2m+1}\sin\Big(\frac{4\pi\sin\theta\Delta h}{\lambda}\Big) - (2n-2)!\Big]. \tag{13}$$

所以, 总反射系数为

$$\rho = \frac{E_{\mathrm{r}}}{E_{\mathrm{i}}}. \tag{14}$$

令 $L = 4\pi\sin\theta\Delta h/\lambda$, $k = n - m$, 那么 ρ^2 为

$$\rho^2 = \frac{n^2 f_N^4 [(2n-2)!]^2}{f^4\theta^4 L^{4n}}\Big[(-1)^n \sum_{k=0}^{n-1}\frac{L^{2k}}{2k!}(-1)^k \cdot \Big(\cos L + \frac{L\sin L}{2k+1}\Big) + 1\Big]^2. \tag{15}$$

将式 (15) 代入式 (7) 可得接收功率.

3 电离层 Es 散射模型

一些 Es 层, 特别是在中纬度的晚上, 具有散射特征的现象. 散射是因为在低电离层产生了电子密度不规则体. Es 层的电子密度通常比一般散射的要大, 因此可用自相关函数来分析. 这里认为电子密度的自相关函数适合 Es 层散射模型 [20]. 那么, 自相关函数为

$$C_n(\rho) = C(0)\Big[\frac{2^{1-n}}{\Gamma(n)}\Big]\rho^n K_n(\rho), \quad \rho = \frac{l}{r}. \tag{16}$$

其中, $K_n(\rho)$ 为二类 n 阶修正贝塞尔函数, Γ 为 γ 函数, $C(0)$ 为大气折射系数 n 的时间方差 $\langle(\Delta n)^2\rangle$, l 为湍流的尺度. 令 $n = 1/2$, 可推导出式 (16) 为指数相关函数 [20,21]. 根据 Es 层电子密度分布特点, 这里将考虑更高阶的贝塞尔函数 [20].

目前, 指数模型、高斯和一阶修正贝塞尔函数可用于解释电离层和对流层的一般散射现象. 这些自相关函数适用于一般散射的情况. Es 层电子密度比较高, 这些自相关函数并不适用于 Es 层的散射模型. 此外, Es 层传播与频率有关, 这也增加了一般散射理论用于电离层 Es 散射的困难. 然而, 高阶修正贝塞尔函数可应用于电离层 Es 散射模型.

需要注意的是, 式 (16) 中的湍流尺度可表示一般散射现象, 但不能描述 Es 层不规则体的大小. 因此, 需要定义高阶修正贝塞尔函数表示的 Es 层不规则体尺度, 且 Es 层水平范围内包含很多小的不规则体. 定义不规则体尺度则需相关距离减小到特定值,

例如 0.5[22]. Es 层不规则体尺度可定义为

$$L = ml. \tag{17}$$

其中, l 为一般湍流的尺度, m 为常数因子. 若相关函数为 $n=5$ 阶, 则间隔 $r=L=3.5l$ 时相关函数减小至 0.5. 因此, Es 层不规则体尺度是一般湍流尺度的 m 倍 (3~4 倍), 其尺度的具体数值将在后面给出.

通常认为, 低电离层不规则体是各向同性的. 由于 Es 层不规则体尺度比一般的湍流尺度大, 通常认为是各向异性结构, 如椭圆体形状 [20]. 因此, 各向异性不规则体散射的截面积为

$$\sigma_n = \frac{\left(\frac{\Delta N}{N}\right)^2\left(\frac{\lambda}{\lambda_N}\right)^4 \Gamma\left(n+\frac{3}{2}\right)}{2^{2n+4}\sqrt{\pi}\Gamma(n)k^{2n-1}\left(\sin\frac{\theta}{2}\right)^{2n+3}} \cdot \frac{(m)^{2n}\sin^2\chi L_1L_2L_3\left(1+\frac{1}{q^2}\right)^{-\left(n+\frac{3}{2}\right)}}{\left[(L_1^2\sin^2\gamma + L_2^2\cos^2\gamma)\sin^2\phi + L_3^2\cos^2\phi\right]^{n+\frac{3}{2}}}. \tag{18}$$

其中:

$$q \approx \frac{2k\sin\frac{\theta}{2}}{m}\left[(L_1^2\sin^2\gamma + L_2^2\cos^2\gamma)\sin^2\phi + L_3^2\cos^2\phi\right]^{\frac{3}{2}};$$

L_1, L_2 和 L_3 为 Es 层不规则体在平行、正交和垂直平均水平漂移 (位于最大拉伸方向) 的不同尺度; θ 为散射角; γ 为平均漂移与大圆平面的夹角; ϕ 为包含散射点的平面与大圆平面夹角.

若在大圆平面存在 Es 不规则体, 那么 $\phi=0$. 则式 (18) 为

$$\sigma_n = \left(\frac{\Delta N}{N}\right)^2\left(\frac{\lambda}{\lambda_N}\right)^4 \Gamma\left(n+\frac{3}{2}\right)(m)^{2n} \cdot \frac{L_1L_2L_3\left[1+\left(\frac{m\lambda}{4\pi L_3\sin\frac{\theta}{2}}\right)^2\right]^{-\left(n+\frac{3}{2}\right)}}{2^{2n+4}\sqrt{\pi}\Gamma(n)k^{2n-1}\left(L_3\sin\frac{\theta}{2}\right)^{2n+3}}. \tag{19}$$

对于 Es 层散射模型, 令 $n=5$ 和 $m=3.5$, 其散射截面为

$$\sigma_n = 1.03\times10^2\times \frac{\left(\frac{\Delta N}{N}\right)^2\left(\frac{f_N}{f}\right)^4 L_1L_2\left[1+\left(\frac{3.5\lambda}{4\pi L_3\sin\frac{\theta}{2}}\right)^2\right]^{-\frac{13}{2}}}{\left(\frac{2\pi L_3}{\lambda}\right)^9 L_3^3\left(\sin\frac{\theta}{2}\right)^{13}}. \tag{20}$$

那么, 接收功率为

$$P_\mathrm{r} = \frac{P_\mathrm{t}bA}{R^2\sin\frac{\theta}{2}}\sigma_n(\theta,\lambda). \tag{21}$$

其中, b 为层厚度, A 为接收天线的有效面积.

4 电离层 Es 反射和散射模型仿真与计算

图 3(a) 为反射模型 Es 层传播与距离的关系. Es 层厚度分别为 1000 m 和 300 m, f_0E_s 为 6 MHz, 高度为 100 km, 电波工作频率为 50 MHz, n 取值为 5. 由图 3(a) 可见, 对于反射模型, Es 层厚度越厚, 电波衰减越大; 随着传播距离的增加, 衰减逐渐减小. 图 3(b) 为散射模型 Es 层传播与距离的关系. L_1, L_2, L_3 为 Es 层不规则体在平行、正交和垂直平均水平漂移 (位于最大拉伸方向) 的不同尺度. Es 层厚度为 1000 m, f_0E_s 为 6 MHz, 高度为 100 km, 电波工作频率为 50 MHz, n 取值 5. 由图 3(b) 可见, 对于散射模型, Es 层不规则体水平尺度相同时, 垂直水平漂移的尺度越大, 衰减越大; 而垂直水平漂移的尺度相同时, 水平尺度越大, 衰减越小; 随着距离的增加, 衰减逐渐减小, 在 1300 km 附近有个极大值.

图 4(a) 为 Es 层反射模型频率与距离的关系. Es 层厚度分别为 1000, 300 和 100 m, f_0E_s 为 6 MHz, 高度为 100 km, 电波工作频率分别取 30, 50 和 75 MHz, n 取值 5. 由图 4(a) 可见, Es 层同一厚度条件下, 频率越高, 衰减越大. 图 4(b) 为 Es 层散射模型频率与距离的关系. $L_1=L_2=175$ m, $L_3=50$ m, Es 层厚度为 1000 m, f_0E_s 为 6 MHz, 高度为 100 km, 电波工作频率为 50 MHz, n 取值为 5. 由图 4(b) 可见, 电波工作频率越高, 衰减越大.

图 5 为 Es 层反射模型和散射模型 f_0E_s 与接收场强的关系. Es 层高度均为 100 km, 反射模型中 Es 层的厚度、散射模型的不规则体尺度、临界频率 f_0E_s 如图 5 所示, 电波工作频率为 50 MHz. 实测链路发射点为 Okuma, 接收点为 Yonago. f_0E_s 由位于 Yama-

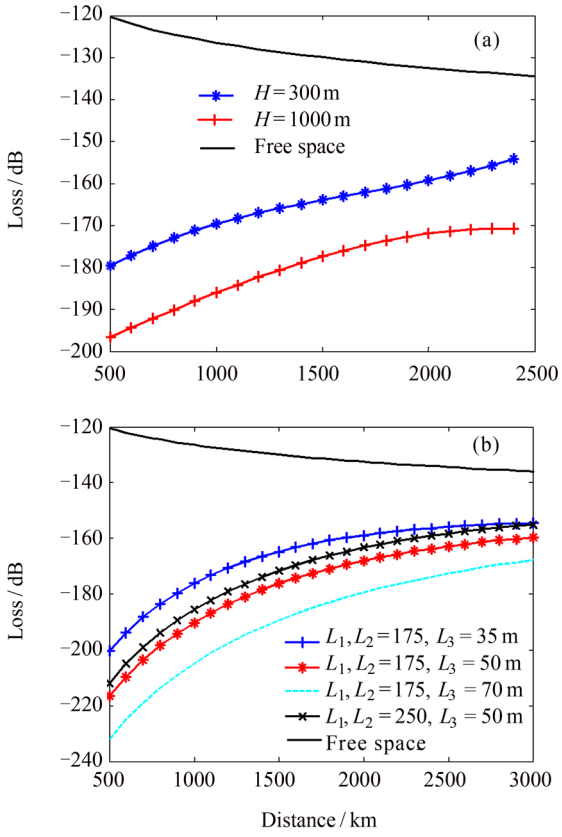


图 3 Es 反射模型 (a) 及散射模型 (b) 与距离的关系

Fig. 3 Relationship of reflection model (a) and scattering model (b) with distance

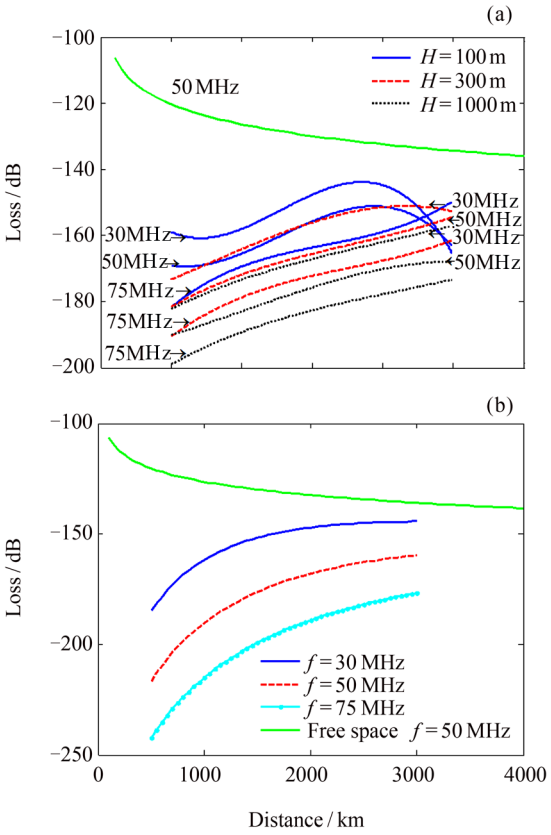


图 4 Es 反射模型 (a) 及散射模型 (b) 与频率的关系

Fig. 4 Relationship of reflection model (a) and scattering model (b) with frequency

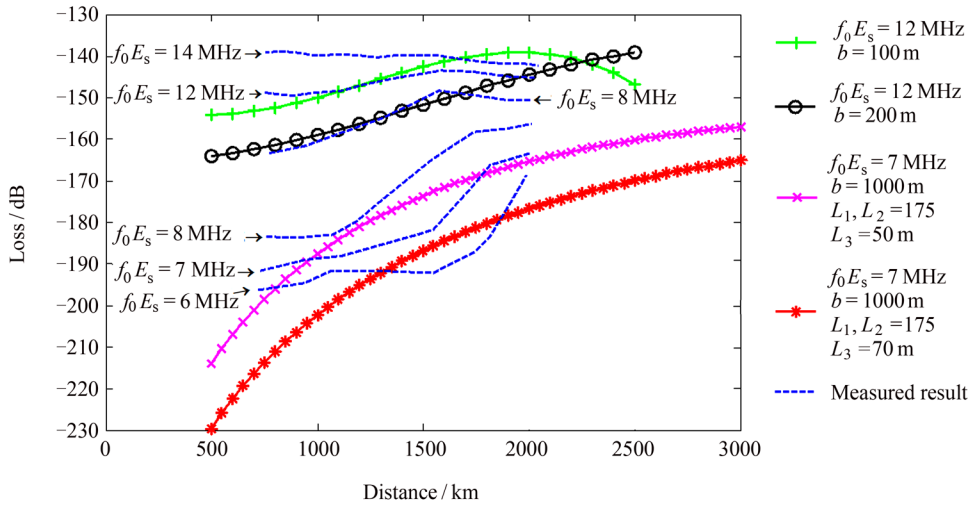


图 5 f_0E_s 与接收场强的关系

Fig. 5 Relationship between f_0E_s and received field strength

gawa 的电离层测高仪得到, Yamagawa 位于观测链路的中间位置 [6,20]. 由图 5 可以看出, f_0E_s 由 8 MHz 至 10 MHz 时, 接收场强突然增加, 这可能是由于接近等离子体频率从而产生反射. 此外, 无论反射模型还是散射模型, f_0E_s 越高, 衰减越小. 因此, f_0E_s 越高, 即 Es 层电子密度越大, 接收场强越大. 接收场强

高是由于发生了反射, 而相对较低的场强是由散射机制产生的.

5 结论

对电离层 Es 电波传播特性进行分析和建模. 根据 Es 层电子密度分布的特点, 运用高阶修正贝塞尔函数表示 Es 层电子密度扰动自相关函数, 综合考虑电离层 Es 各向异性结构的尺度关系, 建立了高阶 Es 反射和散射模型. 仿真计算了 Es 层 VHF 斜入射传播衰减与频率、距离的关系. 对于反射模型, Es 层厚度越大, 电波衰减越大. 对于散射模型, Es 层不规则体水平尺度相同时, 垂直水平漂移的尺度越大, 衰减越大; 而垂直水平漂移的尺度相同时, 水平尺度越大, 衰减越小. 无论反射模型还是散射模型, f_0E_s 越高, 衰减越小; 电波工作频率越高, 衰减越大. 将建立模型与 VHF 链路测量结果进行了对比, 验证了建立模型的正确性. 明确了高强度的电离层 Es 主要发生反射, 而较低浓度的 Es 层则是散射机制起主要作用. 本文建立的高阶 Es 反射和散射模型能够为电离层 Es 通信链路预测及设计提供技术支持.

参考文献

[1] MIYA K, SHIMIZU K, KOJIMA T. Oblique-incidence sporadic-E propagation and its ionospheric attenuation [J]. *Radio Sci.*, 1978, **13**(3): 559-570

[2] KERBLAY T S. Trajectories of radio waves reflected from the large-scale inhomogeneous structure of the Es-layer [J]. *Geomagn. Aeron.*, 1979, **19**: 20

[3] ALTHOUSE E L, DAVIS J R. A practical evaluation of Earth-backscatter simulation and an estimate of the HF ground- scatter coefficient [J]. *Radio Sci.*, 1972, **7**(10): 897-911

[4] MAKARENKO S F, KERBLAY T S. Coefficient of reflection of radio waves from a thin horizontally inhomogeneous Es-layer [J]. *Geomagn. Aeron.*, 1980, **20**: 310

[5] SINNO K, KAN M, HIRUKAWA Y, On the reflection and transmission losses for ionospheric radio wave propagation via sporadic E [J]. *Radio Res. Lab. Jpn.*, 1976, **23**(110): 65

[6] KOBAYASHI T. Estimation of the strength of Es waves by foes at the mid-point [J]. *Radio Res. Lab. Jpn.*, 1964, **11**(56): 181

[7] SHERSTYUKOV O N, AKCHURIN A D, SHERSTYUKOV R O. Frequency dependences of reflection coefficient from Es layer at oblique incidence [C]. In Proceedings of 30th URSI General Assembly and Scientific Symposium (URSIGASS), Istanbul, Turkey, 2011

[8] SHERSTYUKOV O N, AKCHURIN A D, SHERSTYUKOV R O. Determination of sporadic E radio wave propagation parameters based on vertical and oblique sounding [J]. *Adv. Space Res.*, 2015, **56**(6): 1169-1176

[9] LI Hui, CHE Haiqin, WU Jian, *et al.* Ionogram traces of Es layer based on partial reflection theory [J]. *Chin. J. Radio Sci.*, 2011, **26**(2): 311-314

[10] CLARKE R H, TIBBLE D V. Measurement of the elevation angles of arrival of multi-component HF skywaves [J]. *Proc. Inst. Electr. Engrs.*, 1978, **125**: 17

[11] MINULLIN R G, MIKHAYLOV B K. Pulsed VHF-sounding of the Es-layer on a 1620 km link [J]. *Geomagn. Aeron.*, 1973, **13**: 233

[12] EDWARDS K J, KERSLEY L, SHRUBSOLE L F. Sporadic-E propagation at frequencies around 70 MHz [J]. *Radio Elect. Engr.*, 1984, **54**(5): 231-237

[13] KERBLAY T S, NOSOVA G N, MINULLIN R G, *et al.* Periods of fluctuations of signals produced by ionospheric scattering and reflection from Es-layer on frequencies of 27.8 and 40.3 MHz [J]. *Geomugn. Aeron.*, 1977, **17**: 158

[14] WHITEHEAD J D. Recent work on mid-latitude and equatorial sporadic-E [J]. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1989, **51**(5): 401-424

[15] EBU. VHF propagation due to sporadic ionization or the E region of the ionosphere (Band 1) [R]. European Broadcasting Union, 32 avenue Albert Lancaster, B-1180 Brussels, Belgium, 1974

[16] TAGHOLM L F, BELL C P, KNIGHT P. Ionospheric propagation in VHF television band I [R]. Nasa Sti/recon Technical Report N, BBC RD, 1975:17

[17] RAVICHANDRAN V C, RAO M M. Transequatorial propagation of TV signals via sporadic-E [J]. *IETE J. Res.*, 1992, **38**: 52-56. DOI:10.1080/03772063.1992.11437025

[18] REDDY C A. Physical significance of the Es parameters f_bE_s, fE_s, and f_0E_s 2. Causes of partial reflections from Es [J]. *J. Geophys. Res.*, 1968, **73**(17): 5627-5647

[19] REDDY C A, MATSUSHITA S, The variations of neutral wind shears in the E-region as deduced from blanketing Es [J]. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1968, **30**: 747

[20] TAO K A. A theoretical study of sporadic—E structure in the light of radio measurement [J]. *Ionosph. Spor.*, 1962: 235-257

[21] BOOKER H G, GORDON W E. A theory of radio scattering in the troposphere [J]. *Proc. IRE*, 1950, **38**: 401

[22] BOOKER H G. The use of radio stars to study irregular refraction of radio waves in the ionosphere [J]. *Proc. IRE*, 1958, **46**: 298