

孙佳欣, 彭怀云, 李清亮. 基于全波法的甚低频波对低电离层扰动分析[J]. 电波科学学报, 2021, 36(4): 619-629. DOI: [10.13443/j.cjors.2020032401](https://doi.org/10.13443/j.cjors.2020032401)
SUN J X, PENG H Y, LI Q L. Analysis of disturbance of VLF wave to low ionosphere based on full wave method[J]. Chinese journal of radio science, 2021, 36(4): 619-629. (in Chinese). DOI: [10.13443/j.cjors.2020032401](https://doi.org/10.13443/j.cjors.2020032401)

基于全波法的甚低频波对低电离层扰动分析

孙佳欣 彭怀云 李清亮

(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 通过全波解反射系数和波模振幅递归算法, 文中分析了平面波在水平电离层分层结构中的能流分布规律, 结合电离层化学反应模型对电离层参量的扰动情况进行仿真, 并与其他文献中使用的方法相比. 全波计算方法考虑到了各层反射、透射波相互叠加的情况, 仿真结果对比发现, 用全波法得到的能流吸收和电子温度扰动幅度更大. 不同入射波参数、地磁场参数、电离层背景参量下的扰动情况对比发现: 改变电波入射角会使电离层中电波的反射吸收高度发生变化; 改变方位角和地磁倾角仅影响电离层能流吸收幅度, 不会对电波反射高度造成影响; 改变中性成分的浓度和温度会影响电离层的能量损失和化学反应过程.

关键词 电离层扰动; 甚低频; 电子温度; 电子浓度; 全波法

中图分类号 TN011

文献标志码 A

文章编号 1005-0388(2021)04-0619-11

DOI [10.13443/j.cjors.2020032401](https://doi.org/10.13443/j.cjors.2020032401)

Analysis of disturbance of VLF wave to low ionosphere based on full wave method

SUN Jiaxin PENG Huaiyun LI Qingliang

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

Abstract Because of the good reflection of the ionosphere to the VLF wave, the heating model suitable for the high frequency band is not fully applicable in the VLF band. In this paper, the energy distribution law of the plane wave in the horizontal ionosphere layered structure is analyzed by the recursive algorithm of the full wave reflection coefficient and the wave mode amplitude. Combined with the ionosphere chemical reaction model, the energy distribution of the VLF wave in the ionosphere is analyzed. Compared with the methods used in other literatures, the full wave method takes into account the superposition of reflection and transmission waves of each layer. The simulation results show that the energy flow absorption and electronic temperature disturbance amplitude obtained by the full wave method are larger. The ionosphere disturbance under different incidence angle, azimuth angle and geomagnetic angle are compared, and it is found that changing the incident angle of the radio wave will change the reflection and absorption height of the radio wave in the ionosphere; while changing the azimuth angle and the geomagnetic inclination will only affect the absorption amplitude of the energy flow in the ionosphere, and will not affect the reflection height of the radio wave.

Keywords ionospheric disturbance; VLF; electron temperature; electron concentration; full wave method

引言

低电离层 (60~120 km 高度) 是甚低频 (very low frequency, VLF) 电磁波地-电离层波导传播模型的上边界^[1], 其电子浓度、电子温度、碰撞频率等参量的分布、扰动变化是影响 VLF 远距离通信效能、导航定位精度的重要因素^[2]. 因此, 低电离层参量的分布和扰动特性研究是 VLF 电波传播研究的重要方向之一.

1990 年, Inan^[3] 分析了南极 Palmer 站接收的 NAA 台 VLF 传播数据, 发现该 VLF 信号幅度被 NAU 台发射的 VLF 信号调制, 实验证实了 VLF 波能显著改变低电离层电子温度和浓度的理论预言. Inan 等人^[4]、Rodriguez 等人^[5] 分析了 NSS、NAU、NAA 三个 VLF 台发射的强 VLF 电磁波对夜间低电离层电子温度和电子密度的影响, 发现在 70~90 km 高度电子温度升高 2.5 倍, 电子密度下降 26%. 1997 年, 刘立波等人^[6] 在 Rodriguez 的基础上, 分析了电离层中氧气、氮气密度等背景参量对电子温度、浓度扰动的影响, 发现中性大气数密度越低或温度越高, 电子参数变化越大. 2007 年, Peter 等人^[7] 分析了闪电激发的 VLF 电波对电子密度的扰动, 发现 85 km 处 D 层电子密度提高了约 15%. 2013 年, Graf 等人^[8] 计算了 VLF 波引起的低电离层扰动范围和跨低电离层衰减的估计值. 2017 年, 冯阳^[9] 推导了全波分析法下的 VLF 波传播模型, 并对不同辐射源参数、地磁场参数、电离层参数下的 VLF 波传输特性进行了分析. 但他研究的重点是电离层中的 VLF 波传播情况, 并没有对 VLF 波引起的电离层扰动情况进行分析. 2018 年, ATICI 等人^[10] 利用 Glukhov-Pasko-Inan 电离层化学经验模型计算了雷电激发的 VLF 电磁波对低电离层电子密度的影响, 发现由于负离子与氧、氮原子的反应, 在场强为 10 V/m 的情况下, 低电离层电子浓度提高了 5.5 倍, 与无线电波对电离层的扰动相比, 雷电引起的电子浓度扰动幅度更大. 同年, 成琦等人^[11] 在电离层自恰加热模型的基础上, 引入电子复合和吸附效应, 对高频电波引起的电离层扰动进行仿真. 成琦使用的电离层化学反应模型和扰动模型与本文相似, 不同之处在于, 本文使用的是 VLF 波扰动电离层. 由于低电离层电子浓度、碰撞频率参数的高度分布在一个波长范围内剧烈变化, 还需考虑各层反射、透射波的相互叠加情况.

本文首先通过全波解反射系数和波模振幅递归算法, 引入不同入射角的平面波, 分析了各层中上行和下行波的能量密度分布规律. 然后基于 Glukhov-

Pasko-Inan 低电离层化学反应模型, 利用梯度下降法^[12], 分析了不同入射角平面波对电子温度、浓度改变的影响规律. 本研究可为细致分析偶极子源 (例如 VLF 台、雷电) 辐射的不同入射角 VLF 波对低电离层扰动的贡献以及扰动现象的分析、认识提供思路.

1 计算方法

1.1 平面波入射的全波法

建立电离层水平分层均匀模型, x 为正北方向, y 为正东方向, z 为垂直向上方向. 从地面至电离层上边界 (700 km), 按高度分为 N 层, 每层的边界为 $z_i (i=0, 1, 2, \dots, N)$, z_0 代表地面, z_N 为电离层上边界. 由于 VLF 电波频率远高于离子回旋频率, 离子影响可忽略. 电离层相对磁导率为 1, 时谐因子为 $e^{-j\omega t}$. θ 为入射角, 为波矢量与 x 方向夹角. l, m, n 为地磁场与 x, y, z 轴夹角的余弦, $l = \cos \varphi_B \cos \theta_B$, $m = \sin \varphi_B \cos \theta_B$, $n = \sin \theta_B$, θ_B 为磁倾角, φ_B 为地磁场水平分量与正北方向夹角.

电离层中每层的电极化率矩阵由该层电子浓度、碰撞频率决定, 每层中电极化率矩阵^[13] 表示为

$$M_i = -\frac{X_i}{U_i(U_i^2 - Y_i^2)} \begin{bmatrix} U_i^2 - l^2 Y_i^2 & jnY_i U_i - lmY_i^2 & -jmY_i U_i - lnY_i^2 \\ -jnY_i U_i - lmY_i^2 & U_i^2 - m^2 Y_i^2 & jlY_i U_i - mnY_i^2 \\ jmY_i U_i - lnY_i^2 & -jlY_i U_i - mnY_i^2 & U_i^2 - n^2 Y_i^2 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

式中: $X_i = \omega_{0,i}^2 / \omega^2$, $\omega_{0,i} = e \sqrt{N_{e,i}} / (m_e \epsilon_0)$ 为第 i 层等离子体角频率, ω 为电波角频率, e 为电子电量, $N_{e,i}$ 为该层电子浓度, ϵ_0 为空气中介电常数; $Y_i = \omega_H / \omega$, $\omega_H = eB_0 / m_e$ 为电子回旋角频率; $U_i = 1 + j\nu_i / \omega$, ν_i 为该层碰撞频率.

全波法将各分层中水平电场、磁场进行二维空域傅里叶变换, 并代入 Maxwell 方程, 消去 $\tilde{E}_{z,i}$ 和 $\tilde{H}_{z,i}$, 可得无源层中水平电、磁场的矩阵形式:

$$dV_i/dz = -jk_0 A_i V_i. \quad (2)$$

式中:

$$V_i = \left[\tilde{E}_{x,i}, \tilde{E}_{y,i}, \tilde{H}_{x,i}, \tilde{H}_{y,i} \right]^T, \quad (3)$$

$\tilde{E}_{x,i}, \tilde{E}_{y,i}, \tilde{H}_{x,i}, \tilde{H}_{y,i}$ 分别为第 i 层中水平电、磁场的二维空域傅里叶变换; A_i 为第 i 层的特征矩阵 (4×4 矩阵), 矩阵各元素值由 M_i 矩阵和入射波矢量 $k_m = k_0 [\sin \theta \cos \varphi, \sin \theta \sin \varphi, \cos \theta]^T$ 决定, 其中 k_0 为真空中波数. 在电离层中, A_i 的 4 个特征值 $n_{z,i}^{(m)} (m=1, 2, 3, 4)$ 均为复数, 两个虚部为正的复数特征值 $n_{z,i}^{(1)}, n_{z,i}^{(2)}$ 代表上行波,

另两个虚部为负的特征值 $n_z^{(3)}$ 、 $n_z^{(4)}$ 代表下行波. 特征值对应的特征向量 $\mathbf{W}_i^{(1)}$ 、 $\mathbf{W}_i^{(2)}$ 、 $\mathbf{W}_i^{(3)}$ 、 $\mathbf{W}_i^{(4)}$ 为列向量, 每层中水平电磁场都为 4 个特征波的叠加, \mathbf{V}_i 可重写为

$$\mathbf{V}_i = U_i^{(1)} e^{jk_0 n_z^{(1)}(z-z_i)} \mathbf{W}_i^{(1)} + U_i^{(2)} e^{jk_0 n_z^{(2)}(z-z_i)} \mathbf{W}_i^{(2)} + D_i^{(1)} e^{jk_0 n_z^{(3)}(z-z_i)} \mathbf{W}_i^{(3)} + D_i^{(2)} e^{jk_0 n_z^{(4)}(z-z_i)} \mathbf{W}_i^{(4)}. \quad (4)$$

式中: $U_i^{(1)}$ 、 $U_i^{(2)}$ 为上行波模振幅; $D_i^{(1)}$ 、 $D_i^{(2)}$ 为下行波模振幅.

基于各层分界面水平电、磁场连续的边界条件, 利用反射系数递归算法, 可获得各分层界面对上行、下行波的反射系数矩阵 \mathbf{R}_i^u 、 \mathbf{R}_i^d . 当第 0 层 (为空气层) 中入射波为 TM 平面波时入射磁场为水平方向, 且垂直于入射面, 其二维空间域傅里叶变换 $\tilde{\mathbf{H}}_{\text{in}}$ 表示为

$$\tilde{\mathbf{H}}_{\text{in}} = [\tilde{H}_{x,\text{in}}, \tilde{H}_{y,\text{in}}]^T = a[-\sin \varphi, \cos \varphi]^T. \quad (5)$$

式中: a 为磁场幅度, 单位为 A/m. 入射波的波模振幅 $\mathbf{U}_{\text{in}} = [\mathbf{U}_{\text{in}}^{(1)}, \mathbf{U}_{\text{in}}^{(2)}]^T$ 表示为

$$\mathbf{U}_{\text{in}} = \begin{bmatrix} \mathbf{W}_i^{(3)} & \mathbf{W}_i^{(2(3))} \\ \mathbf{W}_i^{(4)} & \mathbf{W}_i^{(2(4))} \end{bmatrix}^{-1} \tilde{\mathbf{H}}_{\text{in}}. \quad (6)$$

式中: $\mathbf{W}_i^{(3)}$ 、 $\mathbf{W}_i^{(4)}$ 为列向量 \mathbf{W}_i 的第 3、4 个元素; $\mathbf{W}_i^{(2(3))}$ 、 $\mathbf{W}_i^{(2(4))}$ 为列向量 \mathbf{W}_i 的第 3、4 个元素. 考虑到第 0 层以上所有介质 (含空气和电离层) 对入射波反射形成下行波, 地面又对该下行波反射形成上行波, 因此第 0 层中总的上行波模振幅为

$$\mathbf{U}_{0,\text{TM}} = [\mathbf{U}_0^{(1)}, \mathbf{U}_0^{(2)}]^T = (\mathbf{I} + \mathbf{R}_0^d \mathbf{R}_0^u) \mathbf{U}_{\text{in}}. \quad (7)$$

同理, 当入射波为 TE 波时入射电场为水平方向, 且垂直于入射面, 其二维空间域傅里叶变换 $\tilde{\mathbf{E}}_{\text{in}}$ 表示为

$$\tilde{\mathbf{E}}_{\text{in}} = [\tilde{E}_{x,\text{in}}, \tilde{E}_{y,\text{in}}]^T = \beta[-\sin \varphi, \cos \varphi]^T. \quad (8)$$

式中, β 为电场幅度, 单位为 V/m. 对应的上行波模振幅为

$$\mathbf{U}_{0,\text{TE}} = (\mathbf{I} + \mathbf{R}_0^d \mathbf{R}_0^u) \begin{bmatrix} \mathbf{W}_i^{(1)} & \mathbf{W}_i^{(2(1))} \\ \mathbf{W}_i^{(2)} & \mathbf{W}_i^{(2(2))} \end{bmatrix} \tilde{\mathbf{E}}_{\text{in}}. \quad (9)$$

在上述平面波引入的基础上, 利用波模振幅递归算法^[14], 获取各层中的上行、下行波模振幅. 再依据式 (4)、Maxwell 方程和傅里叶逆变换计算各层中的上下行 4 个波模的电场和磁场. 进而基于坡印廷定理计算出各波模的平均能流密度 S_i^m ($m=1, 2, 3, 4$).

1.2 低电离层参数扰动的梯度下降法

在低电离层中 VLF 电波能量主要被电子吸收, 其他粒子的吸收可忽略^[15], 电离层各分层中单位时间、单位体积内吸收的能量

$$Q_i = 2 \sum_{m=1}^4 \kappa_i^m S_i^m \quad (10)$$

是 4 种波模吸收能量之和, 单位为 $\text{W}/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$; κ_i^m ($m=1, 2, 3, 4$) 为 4 种波模的吸收指数,

$$\kappa_i^m = \omega \cdot \text{Im} \left(\sqrt{\sin^2 \theta + (n_z^{(m)})^2} \right) / c. \quad (11)$$

式中: c 为光速; $\text{Im}(\cdot)$ 表示取虚部.

各分层中电子温度变化由电子能量方程确定:

$$\frac{2}{3} k N_{e,i} \frac{dT_e}{dt} = Q_i - L_i. \quad (12)$$

式中: k 为玻尔兹曼常数; L_i 为各层电子能量损失项.

能量损失主要来源于电子与其他粒子的碰撞、中性粒子的能级激发等, 其计算模型为 Stubbe^[16] 能量损失模型.

通过式 (12) 可以得到电子温度随时间变化速率 dT_e/dt , 选取时间步长 Δt , 用差分法将电子温度的变化过程离散化, 相邻两时刻电子温度之间关系可表示为

$$T_e = T_{e0} + \frac{dT_e}{dt} \times \Delta t. \quad (13)$$

式中: T_{e0} 为前一时刻的电子温度; T_e 为当前时刻电子温度. 电子温度的变化改变了电离层中电子与其他带电粒子的化学反应过程, 使其浓度发生变化. 各粒子的浓度变化速率可通过 Glukhov-Pasko -Inan 低电离层化学反应模型^[17] 表达:

$$\begin{cases} \frac{dN_e}{dt} = I_0 + \gamma N^- - \beta N_e - \alpha_d N_e N^+ - \alpha_d^c N_e N_x^+ \\ \frac{dN^-}{dt} = \beta N_e - \gamma N^- - \alpha_i N^- (N^+ + N_x^+) \\ \frac{dN^+}{dt} = I_0 - B N^+ - \alpha_d N_e N^+ - \alpha_i N^- N^+ \\ \frac{dN_x^+}{dt} = -\alpha_d^c N_e N_x^+ + B N^+ - \alpha_i N^- N^+ \end{cases}. \quad (14)$$

式中: N_e 、 N^- 、 N^+ 、 N_x^+ 分别表示电子、负离子、正离子、团簇离子的浓度; I_0 是电离层自然状态下的电子产生率, 白天太阳是主要的电离源, 在夜间主要由月亮反射的太阳光、人工源、其他自然因素或宇宙背景下的电离源产生; γ 是电子从负离子上的脱离率; β 是电子附着到中性粒子的效率; α_d 是电子与正离子复合系数; α_d^c 是电子与团簇粒子的结合率; α_i 是负离子与正离子和水合正离子之间的复合系数; B 是初级正离子转化为水和离子的转化率. 电子温度的扰动改变了带电粒子间的反应系数, 进而对各粒子成分浓度造成影响. 与式 (13) 同理, 相邻两时刻的各粒子浓度关系可表示为

$$\begin{cases} N_e = N_{e0} + \frac{dN_e}{dt} \times \Delta t \\ N^- = N^- + \frac{dN^-}{dt} \times \Delta t \\ N^+ = N^+ + \frac{dN^+}{dt} \times \Delta t \\ N_x^+ = N_{x0}^+ + \frac{dN_x^+}{dt} \times \Delta t \end{cases} \quad (15)$$

将初始电子温度、浓度等参量带入式(1)~(11),用全波法计算电波能流分布、低电离层能量吸收,进而得到时间步长 Δt 后的电子温度、电子和离子浓度.如此循环迭代,直到电子温度和带电粒子浓度不再发生变化,即可实现 VLF 电磁波对低电离层扰动的计算仿真.

为加快迭代模型的收敛速度, Δt 的选择采取梯度下降法,将电子浓度的变化率作为损失函数,使 Δt 随电子浓度变化率改变:

$$\Delta t = \zeta \left| \frac{dN_e}{dt} \right|. \quad (16)$$

式中, ζ 为学习率,取 $\zeta = 1 \times 10^{-9}$.

2 计算分析与讨论

2.1 扰动结果对比

文中使用的电离层中性大气参数来源于 MSISE-90 模型.正离子密度、电子温度、80 km 高度以上的电子数密度来源于 IRI-2016 或文献 [4] 中使用过的经验模型.在无特殊说明的情况下,平面波入射方向为垂直向上,即 $\theta = 0^\circ$ 、 $\varphi = 0^\circ$,地磁场方向为 $\theta_b = 60^\circ$ 、 $\varphi_b = 0^\circ$,大小为 $50 \mu\text{T}$.入射波频率设置为 $f = 10 \text{ kHz}$,输入能流为 $8 \times 10^{-6} \text{ J}/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$.

在上述条件下,分别用 Rodriguez^[18]方法和本文方法对电离层扰动情况进行仿真.图 1(a)、(b)分别给出了全波法得到的电场、磁场分量二维仿真图.由于本节引入的是 TM 平面波垂直入射电离层,电场、磁场垂直分量很小.随着透入电离层的高度增加,电波方向发生改变,80 km 以上高度出现了电场 z 分量.图 2 为两种方法得到的电离层能量吸收随高度的变化.在 85 km 以下高度,能量吸收差别很小;85 km 以上区域,两种方法得到的能流吸收峰值都在 90 km 高度附近.不同的是,由于全波法考虑到电离层各分层中反射、透射波相互叠加的情况,在进入电离层能流相同的情况下,电离层能流吸收要大于 Rodriguez 方法得到的能流吸收.

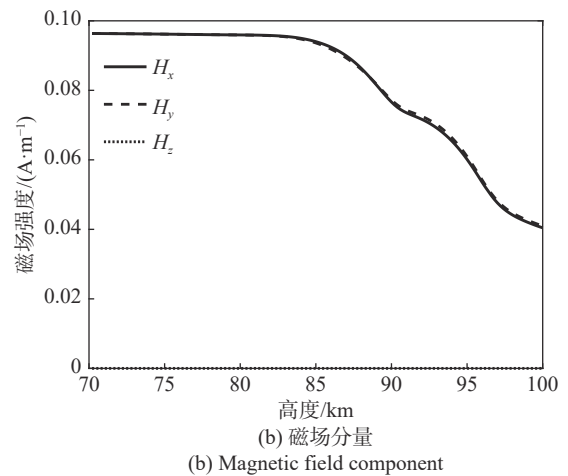
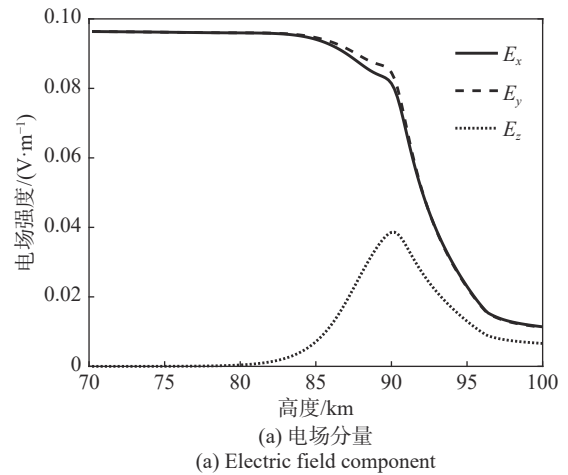


图 1 电磁场分量随高度的变化

Fig. 1 Variation of electric field and magnetic field component with height

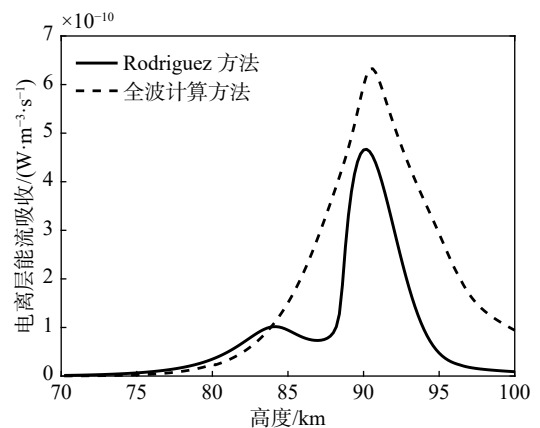


Fig. 2 Comparison of energy flow absorption in the ionosphere

图 3 给出了 Rodriguez 方法和全波计算方法得到的电子温度扰动对比.与图 2 中的能流吸收情况相对应, Rodriguez 方法中电子温度的变化主要集中在 70~95 km 高度范围内,电子温度在 85 km 和 90 km

高度附近存在两个峰值点,最高可以达到 290 K. 用全波法得到的仿真结果中由于电离层能流吸收集中在 90 km 高度附近,电子温度的扰动范围主要集中在 75~100 km 且仅在 90 km 处有一个峰值点,最高可达 320 K. 可以看出,波模的反射迭加不仅提高了电离层的能流吸收,电子温度扰动幅度也随之增大.

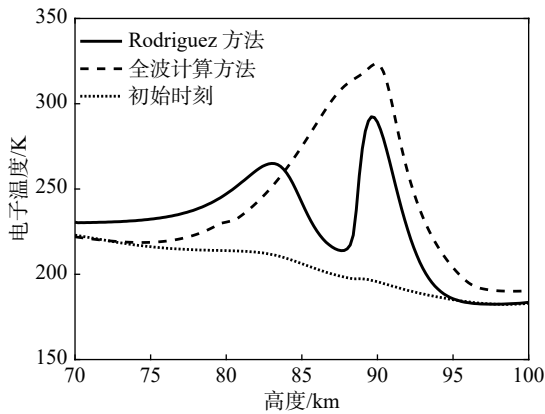


图 3 电子温度扰动对比

Fig. 3 Comparison of electronic temperature disturbance

电子温度的扰动导致电子浓度发生变化,图 4 给出了电子浓度与初始时刻的比值,受背景电子浓度分布的影响,扰动的幅度和高度与电子温度存在一定差异. Rodriguez 方法仿真的结果中,电子浓度在 83 km 处损耗最大,降低了约 12%. 用全波法得到的电子浓度模型中,电子在 85 km 损耗最大,由于 85 km 处的背景电子浓度较高,浓度损失反而不如 Rodriguez 方法的结果明显,降低了约 10%. 在 93 km 以上区域,由于电子温度的提高降低了电子与正离子的复合效率,该区域内的电子浓度反而有所提高.

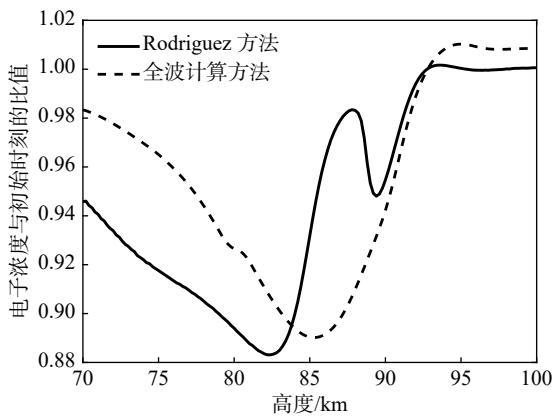


图 4 电子浓度扰动对比

Fig. 4 Comparison of electron concentration disturbance

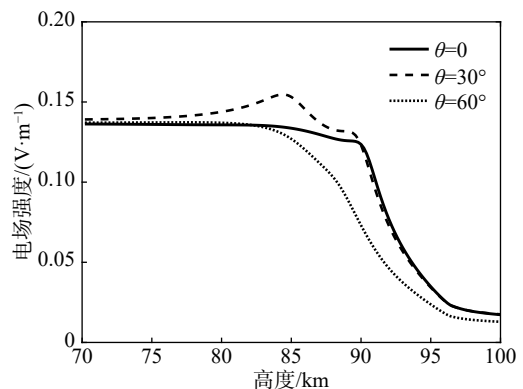
2.2 不同入射波、地磁场条件下的扰动结果对比

2.2.1 入射角变化对电离层扰动的影响

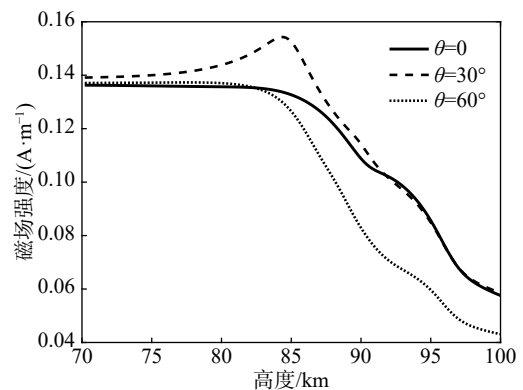
将磁倾角设为 60°,地磁场水平分量指向正北方

向,在入射波水平方向的分量与正北方向夹角 ϕ 为 180°的情况下,本节对比了入射角 θ 对电离层扰动的影响. 图 5(a)、(b) 分别给出了各高度下电场、磁场矢量随入射角的变化,可以看出,电场的衰减主要发生在 90 km 以上高度,磁场的衰减主要发生在 85 km 以上高度. 图 5(c) 为不同入射角下的电波能流对比,可以看出,90 km 高度以下区域,入射角 $\theta = 30^\circ$ 的情况下电波能流密度最大,反射透射波的叠加使 80~90 km 高度范围内的能流密度大于入射波能流密度. 90 km 高度以上区域,入射角 $\theta = 0^\circ$ 时,能流密度最大,这是因为 VLF 波垂直入射电离层时穿透性最强,能流密度随高度衰减最慢.

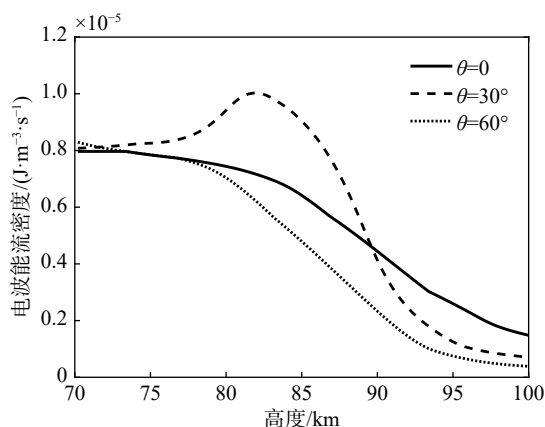
图 6 给出了不同入射角对应的电离层能流吸收情况,电离层能流吸收主要集中在 80 km 以上区域,随着入射角增大,能流吸收峰值所在高度逐渐从 92 km 向 85 km 偏移,由于电波在反射面附近能流吸收最大,进一步证明了改变入射角会影响电波的反射、吸收高度. 入射角越大的情况下,电波穿透性越弱,反射吸收面高度越低.



(a) 电场强度
(a) Electric field intensity



(b) 磁场强度
(b) Magnetic field intensity



(c) 电波能流密度
(c) Electric wave energy density

图5 电离层参数随入射角的变化

Fig. 5 Variation of ionospheric parameters with incident angles

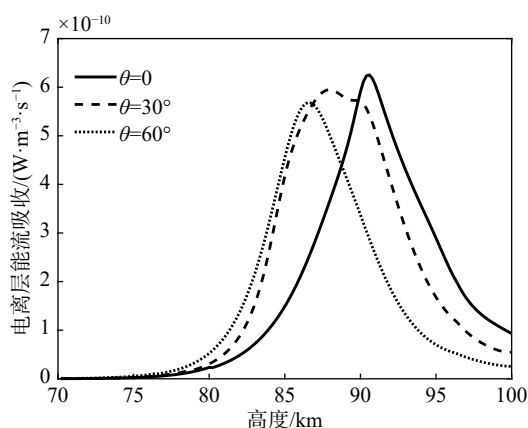


图6 不同入射角下的电离层能流吸收

Fig. 6 Ionospheric energy flow absorption at different incident angles

与电离层能流吸收相对应,图7给出了电子温度的扰动情况,电子温度变化主要集中在75~95 km高度范围内.由式(12)可知,电子温度的变化除受电离层能量变化影响外,还与背景电子浓度有关,电子浓度越低的区域电子温度变化越明显.在入射角为30°和60°的情况下,电子温度扰动峰值都在85 km高度附近, $\theta = 30^\circ$ 时扰动幅度大一些,温度最高可达550 K,由于90 km高度电子浓度比85 km大得多,导致 $\theta = 0$ 时电子温度的扰动峰值很小,温度最高仅为300 K.

图8给出了不同入射角下的电子浓度与初始时刻的比值,93 km以下区域,入射角 θ 越大,电子浓度主要扰动区域所在高度越低,电子浓度损失越大. $\theta = 60^\circ$ 情况下,电子浓度扰动幅度最大,83 km附近电子浓度仅为初始时刻浓度的80%, $\theta = 30^\circ$ 情况下,电子

浓度扰动幅度最小,85 km附近电子浓度仅损失15%.93 km以上区域,电子浓度因电子与正离子复合效率降低而提高.

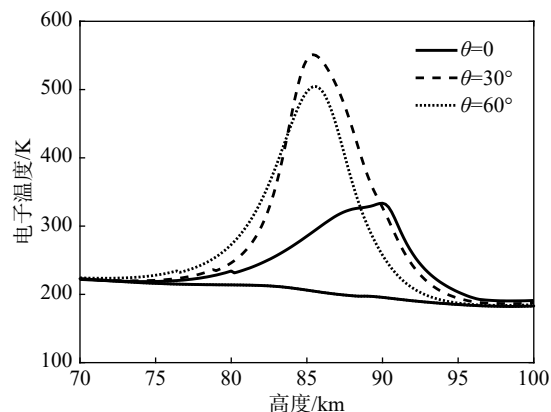


图7 不同入射角下的电子温度

Fig. 7 Electron temperatures at different incident angles

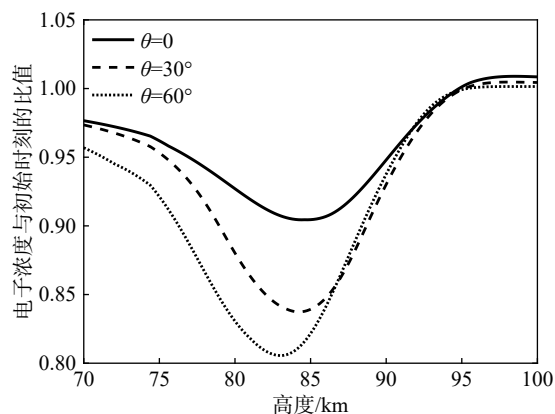


图8 不同入射角下的电子浓度与初始时刻的比值

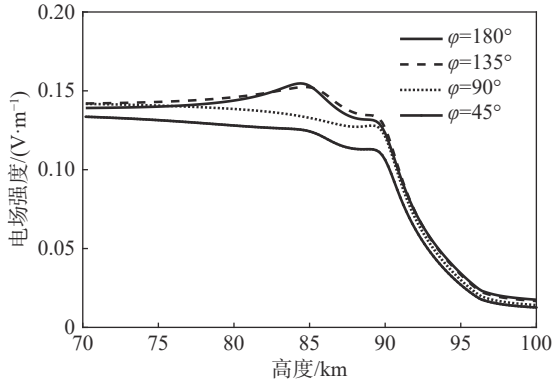
Fig. 8 Ratio of electron concentration to initial time at different incident angles

2.2.2 入射波方位角对电离层扰动的影响

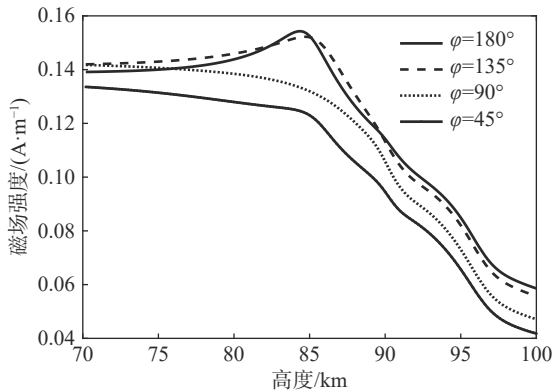
在入射角 $\theta = 30^\circ$,地磁场方向为 $\theta_b = 60^\circ$ 、 $\varphi_b = 0^\circ$ 的情况下,图9(a)、(b)分别给出了不同方位角下的电场与磁场分布.电场的衰减主要发生在90 km以上高度,磁场的衰减主要发生在85 km以上高度.在本文给出的初始条件下,场强随方位角增加而增大.图9(c)给出了不同入射波方位角 φ 下电离层能流吸收随高度的变化.电离层对电波能流的吸收主要集中在75 km以上区域,改变方位角会影响电离层的能流吸收幅度, φ 值越大,吸收峰值越大.峰值点所在高度不受 φ 值变化的影响,集中在90 km高度附近,说明方位角变化不会改变电波的反射吸收高度.

图10给出了不同 φ 值下的电子温度扰动情况,温度的扰动主要发生在75 km以上的电离层区域.受背景电子浓度影响,电子温度的峰值点出现在87 km

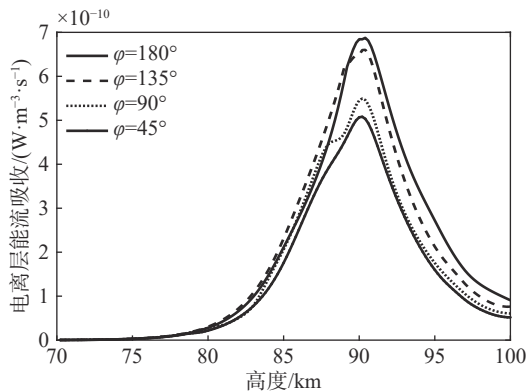
高度附近且位置不随 φ 值变化. 在 φ 为 135° 的情况下电子温度提升最明显, 最高可达 350 K ; φ 为 45° 时电子温度扰动幅度最小, 其温度峰值仅为 300 K .



(a) 电场强度
(a) Electric field intensity



(b) 磁场强度
(b) Magnetic field intensity



(c) 电离层能流吸收
(c) Ionospheric energy flow absorption

图 9 电离层参数随方位角的变化
Fig. 9 Variation of ionospheric parameters with azimuth angles

图 11 给出了不同 φ 值下的电子浓度扰动情况. 可以看出, 电子浓度扰动主要集中在 85 km 附近, φ 为 135° 情况下, 85 km 处电子浓度损失最大, 浓度仅有初始时刻的 87% ; φ 取 45° 情况下, 电子浓度扰动幅

度最低, 85 km 处电子浓度仅损失 10% .

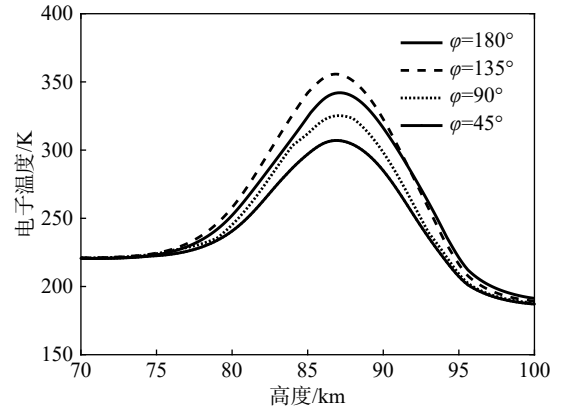


图 10 不同方位角下的电子温度

Fig. 10 Electronic temperature at different azimuths

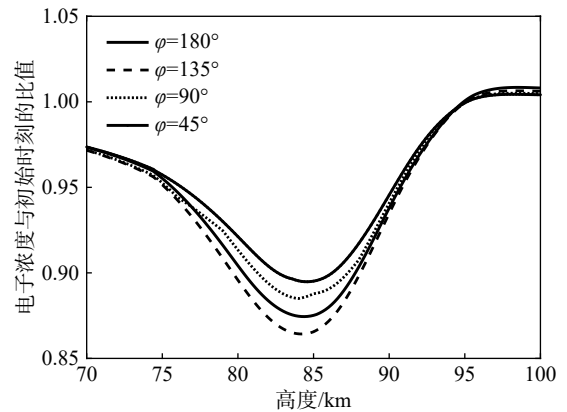


图 11 不同方位角下的电子浓度与初始时刻的比值

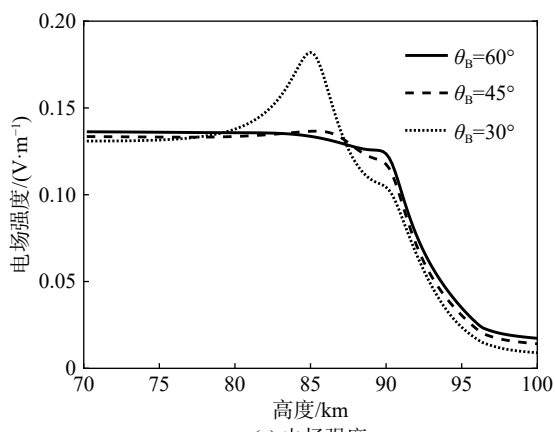
Fig. 11 Ratio of electron concentration to initial time at different azimuths

2.2.3 磁倾角对电离层扰动的影响

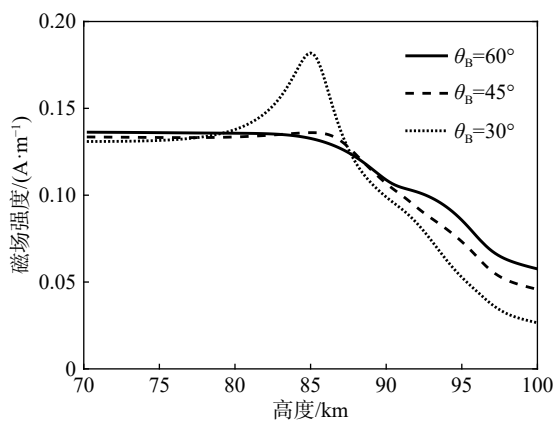
受地理位置影响, 不同纬度地区磁倾角存在较大差异, 在入射波垂直向上的情况下, 本节分析了磁倾角 θ_b 分别为 30° 、 45° 、 60° 时, 基于全波法的电离层扰动情况. 图 12(a)、(b) 分别给出了不同磁倾角下的电场强度与磁场强度对比. 在场强衰减比较大的 90 km 以上高度, 二者夹角越大, 电场与磁场的衰减越小. 图 12(c) 给出了 θ_b 不同的情况下电波的能流密度. 我们发现, θ_b 的变化对能流密度的影响主要集中在 80 km 以上的电离层区域. 在 $80\sim 90\text{ km}$ 高度范围内, 能流密度随 θ_b 的增大而降低, 特别是 $\theta_b = 30^\circ$ 的情况下, 反射、透射波相互叠加使该区域内能流密度提升明显. 90 km 以上区域, θ_b 越大电波能流衰减越慢.

图 13 给出了不同 θ_b 下的电离层能流吸收情况, 电波能流的吸收主要集中在 $80\sim 100\text{ km}$ 高度范围内, 三种夹角下的能流吸收峰值点都在 90 km 高度

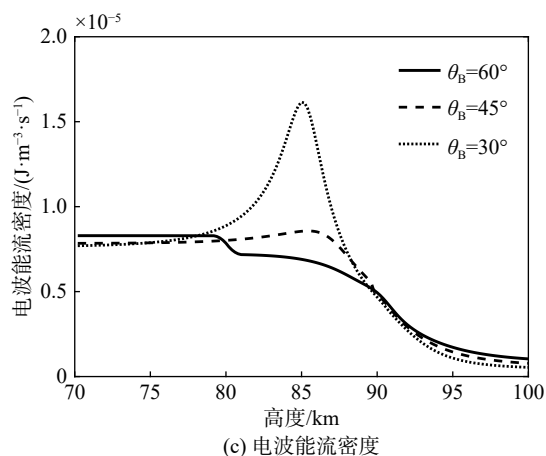
附近。 θ_B 越大,电离层能流吸收峰值越小,这是因为当来波方向与地磁场夹角越接近 90° ,波的衰减越大,电离层能流吸收越大。



(a) 电场强度
(a) Electric field intensity



(b) 磁场强度
(b) Magnetic field intensity



(c) 电波能流密度
(c) Electric wave energy density

图12 电离层参数随磁倾角的变化

Fig. 12 Variation of ionospheric parameters with magnetic dip angles

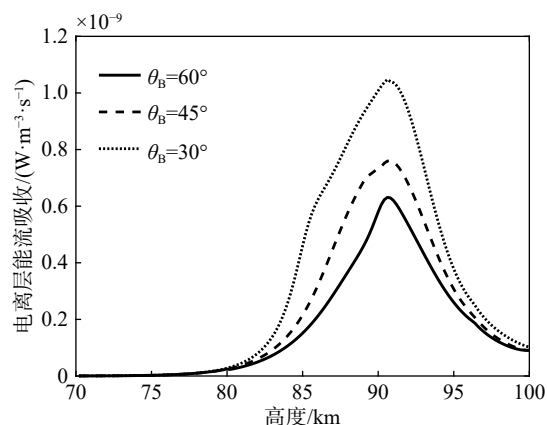


图13 不同磁倾角下的电离层能流吸收

Fig. 13 Ionospheric energy flow absorption at different magnetic dip angles

图14给出了不同 θ_B 下的电子温度模型,与图8中的电离层能流吸收模型相对应,电子温度的扰动范围主要集中在 $80\sim 95$ km高度内, θ_B 越小,电子温度提升越明显, $\theta_B = 30^\circ$ 的情况下,电子温度最高可达600 K.不同磁倾角下,电子温度极大值点所在高度也有差异,增大 θ_B ,温度扰动的峰值点所在高度逐渐从85 km向90 km偏移。

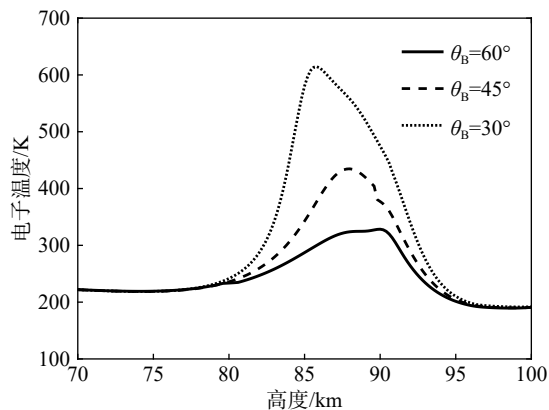


图14 不同磁倾角下的电子温度

Fig. 14 Electron temperature at different magnetic inclinations

电离层电子温度的变化会引起电子与其他粒子的附着、分离效率发生改变,图15给出了不同 θ_B 下的电子浓度变化.对比可知, $80\sim 92$ km高度内,电子温度的提高增强了中性粒子对电子的吸附效率,导致电子浓度降低,负离子浓度提高,且 θ_B 越小,电子损耗越明显, $\theta_B = 30^\circ$ 的情况下,85 km高度处电子浓度只有初始时刻的80%.92 km以上高度,由于电子温度的增加抑制了电子与正离子的复合效率,电子浓度由降低转变为提高。

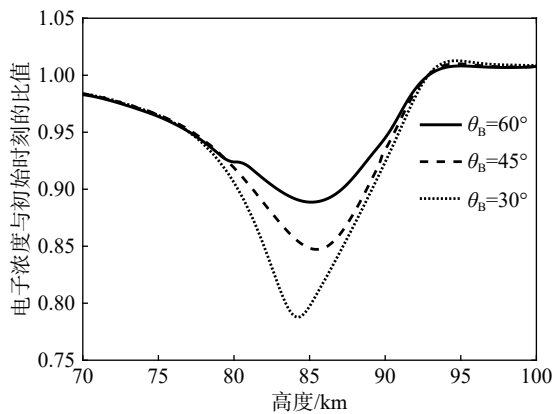


图 15 不同磁倾角下的电子浓度与初始时刻的比值
 Fig. 15 Ratio of electron concentration to initial time at different magnetic inclinations

2.3 不同电离层背景参量下的扰动结果对比

由于中性成分参数、化学反应系数等参量控制着电离层碰撞频率、能量损失和化学反应效率的变化, 改变电离层背景参量亦会对电离层扰动情况产生影响. 本节分析了在入射波方向 $\theta = 30^\circ$ 、 $\varphi = 180^\circ$, 频率 $f = 10 \text{ kHz}$, 地磁场方向 $\theta_b = 60^\circ$ 、 $\varphi_b = 0^\circ$, 强度为 $50 \mu\text{T}$ 情况下, 不同背景参量下的电离层扰动情况.

2.3.1 化学反应系数对电离层扰动的影响

100 km 以下的低电离层区域, 中性成分主要为氮气和氧气, 中性气体对电子的吸附是引起电子损耗的重要因素. 图 16 给出了中性粒子的电子附着率 β 对电子浓度的影响. 读图可知, 随着电子附着到中性粒子的效率提高, 电子浓度向减小的趋势发展. 电子浓度的变化进一步影响到电子温度的扰动情况, 由图 17 可知, 随着电子浓度的降低, 电子温度在 75~90 km 高度范围内的扰动幅度逐渐提高.

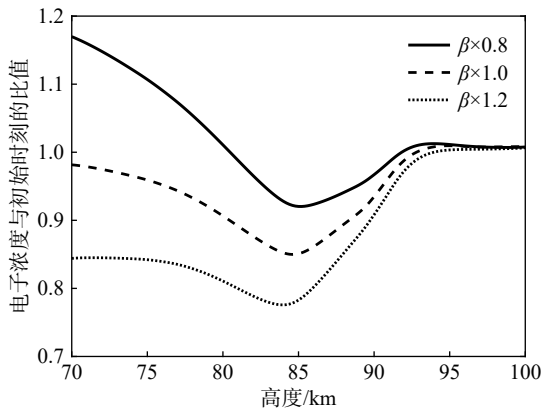


图 16 不同 β 下的电子浓度与初始时刻的比值
 Fig. 16 Ratio of electron concentration to initial time at different values of β

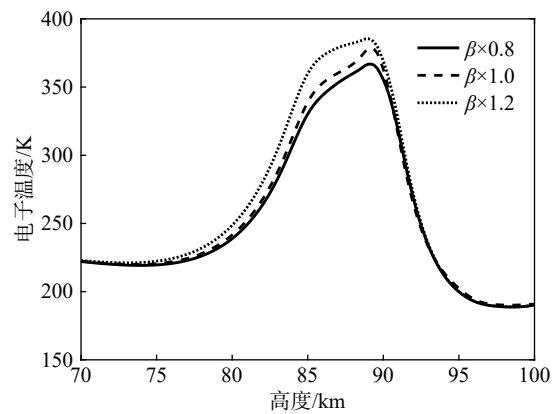


图 17 不同 β 下的电子温度
 Fig. 17 Electron temperature at different values of β

2.3.2 中性成分浓度对电离层扰动的影响

图 18 给出了中性成分浓度 N_n 分别为原值 N_0 的 0.6 倍、1 倍、1.4 倍情况下, 电子温度的扰动情况. 结合式 (12) 和文献 [15] 给出的能量损失模型可知, N_n 越大, 能量损失项 L_n 越大, 电子温度的扰动幅度越小. 中性成分浓度的变化不会影响电子温度峰值点所在高度, 电子温度的峰值点都出现在 88 km 附近.

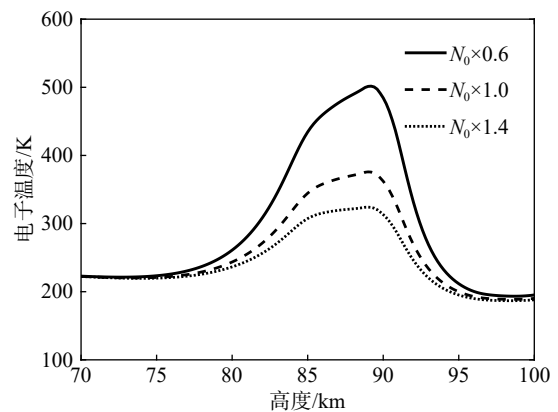


图 18 不同中性成分浓度下的电子温度
 Fig. 18 Electron temperature at different concentrations of neutral components

图 19 给出了不同 N_n 下的电子浓度扰动情况, N_n 的增大同时提高了中性粒子对电子的吸附效率和电子从负离子上的脱离效率, 但是前者的提升更为明显. 与图 16 类似, 电子浓度随 N_n 的提高向变小的趋势发展. 高度越低, 背景电子浓度越小, 电子浓度的变化越明显.

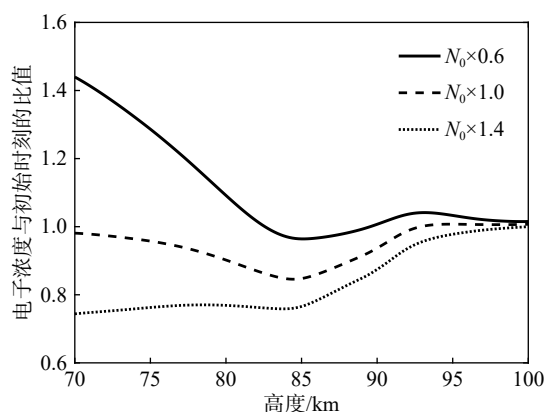


图19 不同中性成分浓度下的电子浓度与初始时刻的比值

Fig. 19 Ratio of electron concentration to initial time at different concentrations of neutral components

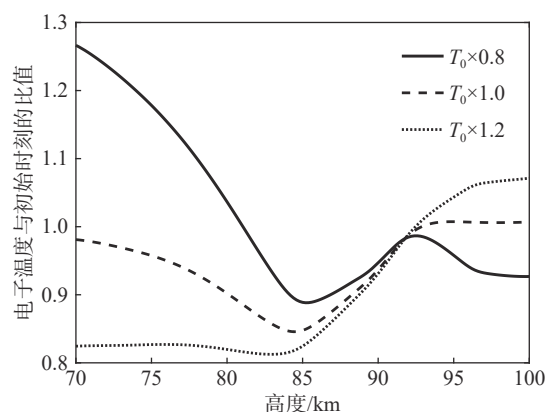


图21 不同中性成分浓度下的电子温度与初始时刻的比值

Fig. 21 Ratio of electron concentration to initial time at different neutral component temperatures

2.3.3 中性成分温度对电离层扰动的影响

图20给出了中性成分温度 T_n 分别为原值 T_0 的0.8倍、1倍、1.2倍情况下,电子温度的扰动情况.与图18相反, T_n 越大电子温度的扰动幅度越大. T_n 变为原值0.8倍的情况下,电子温度最大值约为325 K; T_n 为原值1.2倍的情况下,电子温度最大值可提高到425 K.

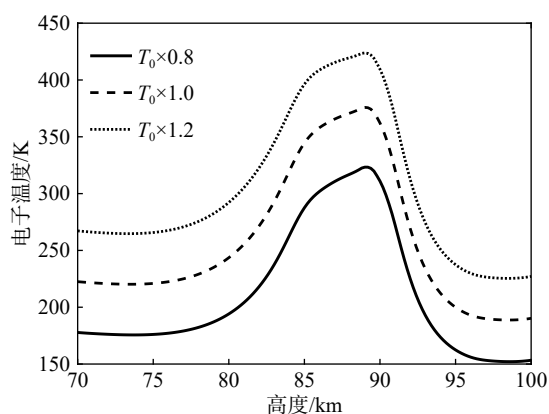


图20 不同中性成分温度下的电子温度

Fig. 20 Electron temperature at different neutral component temperatures

图21给出了不同 T_n 下的电子浓度扰动情况,可以看出在92 km以下高度,由于 T_n 的增大提高了中性成分对电子的吸附效率,电子浓度随 T_n 的增大向变小的趋势发展.92 km以上高度,正离子浓度的增大使电子与正离子的复合效率成为影响电子浓度的重要因素,由于电子与正离子的复合效率随 T_n 的增大而减小,负离子上的电子脱离率随负离子浓度的提高而增大,电子浓度随 T_n 的增大向变大的趋势发展.

3 结论

通过全波法和波模振幅递归算法,结合 Glukhov-Pasko-Inan 低电离层化学反应模型,对 VLF 波影响下的电离层电子浓度、温度的扰动情况进行仿真.主要成果与结论如下:

1) 本文使用的全波计算方法与其他文献方法的差别在于全波法考虑到上、下行波的叠加情况.与 Rodriguez 方法对比发现,在进入电离层能流相同的情况下,两种方法得到的电离层能流吸收都集中在75~100 km 高度范围内,峰值点都出现在90 km 高度附近.用全波法算出的电离层能流吸收大于 Rodriguez 方法得到的能流吸收,进而造成电子温度、浓度扰动的不同.

2) 对比了不同电波入射角、方位角、磁倾角下的电离层扰动情况,发现增大平面波入射角会导致电波能流的反射吸收高度发生改变,入射角越大,电波的反射吸收高度越低.方位角、磁倾角的变化不会改变电波反射高度,但会对电离层能流吸收幅度造成影响,入射波与地磁场夹角越接近90°,电离层能流吸收的峰值越高.由于电离层中电子的扰动情况还与电离层背景参量、化学反应过程有关,在多种因素调控下,电子温度、浓度的扰动幅度和扰动范围存在明显差异.

3) 对比了中性成分浓度、温度等背景参量对电离层扰动的影响.发现上述参量主要通过改变电离层能量损失项 L 控制电子温度的扰动幅度.背景参量的变化还会改变离子间的化学反应效率,进而影响电子浓度的扰动情况.不同之处在于,中性成分浓度越高,电子温度扰动幅度越小,电子浓度的损耗越

大. 中性成分温度越高, 电子温度扰动幅度越大, 92 km 以下高度电子浓度损耗越大, 92 km 以上高度电子浓度损耗越小.

参考文献

- [1] 潘威炎. 长波超长波极长波传播[M]. 成都: 电子科技大学出版社, 2004: 175-179.
- [2] 张世田, 陈恩平, 王元新, 等. 甚低频在多模干涉区的场强起伏标准偏差估计[J]. 电波科学学报, 2011, 26(2): 86-90.
ZHANG S T, CHEN E P, WANG Y X, et al. Estimation of VLF amplitude standard deviation in multimode interference region[J]. Chinese journal of radio science, 2011, 26(2): 86-90. (in Chinese)
- [3] INANUS. VLF heating of the lower ionosphere[J]. *Geophysical research letters*, 1990, 17(6): 729-732.
- [4] INAN U S, RODRIGUEZ J V, LEV-TOV S, et al. Ionospheric modification with a VLF transmitter[J]. *Geophysical research letters*, 1992, 19(20): 2071-2074.
- [5] RODRIGUEZ J V, INAN U S, BELL T F. Heating of the nighttime D region by very low frequency transmitters[J]. *Journal of geophysical research: space physics*, 1994, 99(A12): 23329-23338.
- [6] 刘立波, 吴向阳, 涂剑南, 等. 甚低频电磁波变态低电离层的数值模拟[J]. 空间科学学报, 1997, 17(2): 130-135.
LIU L B, WU X Y, TU J N, et al. Estimation of VLF amplitude standard deviation in multimode interference region[J]. Chinese journal of space science, 1997, 17(2): 130-135. (in Chinese)
- [7] PETER W B, INAN U S. A quantitative comparison of lightning-induced electron precipitation and VLF signal perturbations[J]. *Journal of geophysical research space physics*, 2007, 112(A12). DOI: [10.1029/2006JA012165](https://doi.org/10.1029/2006JA012165)
- [8] GRAF K L, SPASOJEVIC M, MARSHALL R A. Extended lateral heating of the nighttime ionosphere by ground-based VLF transmitters[J]. *Journal of geophysical research space physics*, 118(12): 7783-7797.
- [9] 冯阳. 电离层扰动对VLF电磁波的传播影响[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
FENG Y. Effect of ionospheric disturbance on the propagation of VLF electromagnetic wave[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017. (in Chinese)
- [10] ATICI R, GUZEL E, SAGIR S. Lower ionospheric electron density changes following lightning discharges[J]. *Acta geophysica*, 2018, 66(4): 731-738.
- [11] 成琦, 郭立新, 张丹, 等. 考虑电子吸附效应的低电离层加热研究[J]. *地球物理学报*, 2018, 61(1): 43-51.
CHENG Q, GUO L X, ZHANG D, et al. Study on heating of the lower ionosphere taking the attachment effect into account[J]. *Chinese journal of geophysics*, 2018, 61(1): 43-51. (in Chinese)
- [12] 郭跃东, 宋旭东. 梯度下降法的分析和改进[J]. 科技展望, 2016, 26(15): 115.
- [13] YEH K C, LIU C H. Theory of ionospheric waves[M]. New York: Academic Press, 1972: 75-94.
- [14] 赵庶凡, 申旭辉, 张学民, 等. VLF电波渗透到卫星高度电离层传播的全波计算[J]. *空间科学学报*, 2015, 35(2): 178-184.
ZHAO S F, SHEN X H, ZHANG X M, et al. Full wave calculation of VLF wave penetrated into satellite altitude ionosphere[J]. *Chinese journal of space science*, 2015, 35(2): 178-184. (in Chinese)
- [15] 黄文耿. 强电磁场对电离层改变的计算机数值模拟研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2003.
HUANG W G. Numerical simulation of ionospheric changes caused by strong electromagnetic field[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2003. (in Chinese)
- [16] STUBBE P, VAMUM W S. Electron energy transfer rates in the ionosphere[J]. *Planetary and space science*, 1972, 20(8): 1121-1126.
- [17] GUKHOV V S, PASKO V P, INAN U S. Relaxation of transient lower ionospheric disturbances caused by lightning-whistler-induced electron precipitation bursts[J]. *Journal of geophysical research: space physics*, 1992, 97(A11): 16971-6979.
- [18] RODRIGUEZ J V, INAN U S. Electron density changes in the nighttime D region due to heating by very-low-frequency transmitters[J]. *Geophysical research letters*, 1994, 21(2): 93-96.

作者简介

孙佳欣 (1995—), 男, 山东人, 中国电波传播研究所硕士研究生, 研究方向为无线电物理.

彭怀云 (1980—), 男, 湖北人, 西安电子科技大学博士, 中国电波传播研究所研究员级高工, 集团专家, 研究方向为电波传播和计算电磁场等.

李清亮 (1963—), 男, 河南人, 博士, 中国电波传播研究所研究员, 中国电子科技集团公司首席科学家, 长期从事电波传播理论及应用技术研究, 先后担任某重大工程副总设计师, 973项目技术首席和863计划重大课题组长, 在目标及其环境特性、电离层扰动与传播特性等方面取得多项研究成果, 获国家科技进步一等奖, 享受国务院政府特殊津贴.