

甚低频台站信号对地球内辐射带和槽区能量电子的散射效应分析

刘阳希子 项正 郭建广 顾旭东 付松 周若贤 花漫 朱琪 易娟 倪彬彬

Scattering effect of very low frequency transmitter signals on energetic electrons in Earth's inner belt and slot region

Liu Yang-Xi-Zi Xiang Zheng Guo Jian-Guang Gu Xu-Dong Fu Song Zhou Ruo-Xian Hua Man
Zhu Qi Yi Juan Ni Bin-Bin

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 149401 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20202029

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20202029>

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

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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 <https://doi.org/10.7498/aps.66.019401>

基于驻极体材料的机械天线式低频/甚低频通信磁场传播模型

Magnetic field propagation model of low frequency/very low communication based on mechanical antenna of electret

物理学报. 2020, 69(15): 158401 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200314>

阵列结构下的低频信号合成方法研究

On method of composing low frequency signals based on array structures

物理学报. 2020, 69(19): 194101 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200501>

纳秒激光等离子体相互作用过程中激光强度对微波辐射影响的研究

Effect of laser intensity on microwave radiation generated in nanosecond laser-plasma interactions

物理学报. 2019, 68(12): 125201 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190501>

基于低频压缩光的声频信号测量

Measurement of audio signal by using low-frequency squeezed light

物理学报. 2017, 66(11): 114205 <https://doi.org/10.7498/aps.66.114205>

旋磁铁氧体在实现低频电磁波吸收中的作用

Achieving low frequency electromagnetic wave absorption by gyromagnetic ferrite

物理学报. 2020, 69(1): 017801 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191229>

甚低频台站信号对地球内辐射带和槽区 能量电子的散射效应分析*

刘阳希子¹⁾ 项正^{1)†} 郭建广^{2)‡} 顾旭东¹⁾ 付松¹⁾ 周若贤¹⁾
花漫¹⁾ 朱琪¹⁾ 易娟¹⁾ 倪彬彬¹⁾³⁾

1) (武汉大学电子信息学院, 武汉 430072)

2) (中国气象局国家空间天气监测预警中心, 北京 100081)

3) (中国科学院比较行星学卓越创新中心, 合肥 230026)

(2020 年 12 月 1 日收到; 2021 年 2 月 27 日收到修改稿)

人工地面甚低频台站发射的 10—30 kHz 信号主要在地球—低电离层波导传播, 部分能量会泄露进入内磁层, 进而会影响近地空间中高能电子的动态变化过程. 本文详细研究了 NWC, NAA 和 DHO38 三个人工甚低频台站信号对内辐射带和槽区高能电子的散射作用. 基于准线性理论, 分别计算了三个甚低频台站信号单独和共同作用时对高能电子的弹跳平均投掷角扩散系数, 并进一步利用 Fokker-Planck 扩散方程模拟内辐射带及槽区的高能电子在 200 d 内的动态演化过程. 结果表明, 在低 L -shell ($L \leq 1.8$), NWC 台站信号对电子的损失占主导作用, 可以使能量在 100 keV 附近、投掷角小于 60° 的电子出现明显损失; 在较高的 L -shell ($2.2 \leq L \leq 2.7$), 主要是 NAA 和 DHO38 台站信号占主导作用, 可以使能量小于 20 keV、投掷角小于 70° 的电子通量显著下降; 三个甚低频台站信号对高投掷角 ($> 80^\circ$) 的电子均无显著影响.

关键词: 地球辐射带, 人工甚低频台站信号, 波粒相互作用, 电子投掷角扩散系数

PACS: 94.05.Pt, 94.30.Xy, 94.30.Tz, 94.30.Ny

DOI: 10.7498/aps.70.20202029

1 引言

地球辐射带是近地空间环境的重要组成部分, 存在于辐射带中的高能电子和高能质子会对运行其中的卫星、载人航天设备和宇航员构成巨大威胁, 因此研究辐射带的动态变化同时具有重要的科学意义和应用价值. 按照空间区域划分, 地球辐射带可分为内带、槽区和外带.

通常认为外辐射带的变化较为剧烈^[1–3] 而内辐射带相对稳定. 近期的研究表明, 内辐射带

的高能电子会在磁暴期间因为注入而增强, 然后在平静时期逐渐下降^[4,5]. 宇宙射线反照中子衰变^[6–9]、自然激发的哨声波 (如等离子体层嘶声^[10,11]、雷电产生的哨声波^[12–14] 等)、磁声波^[15–17] 以及地面台站发射的甚低频 (very low frequency, VLF) 信号^[18–20] 都能对内辐射带及槽区的高能电子通量产生影响. 其中, 地面人工台站发射的 10—30 kHz 的 VLF 信号主要用于对潜通信, 可以在地球-低电离层波导中进行远距离的传播, 通过地面 VLF 接收机^[21,22] 接收的 VLF 信号, 可用于反演电离层的变化特征^[23–25]. VLF 信号在沿地球-低电离层波导

* 国家自然科学基金 (批准号: 42025404, 41704162, 41974186, 41674163, 41904144, 41904143)、中国科学院先导 B 计划 (批准号: XDB41000000)、国家航天局民用航天预研项目 (批准号: D020303, D020308, D020104) 和中国博士后科学基金 (批准号: 2019M662700) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: xiangzheng@whu.edu.cn

‡ 通信作者. E-mail: guojg@cma.gov.cn

传播时,会有小部分穿透电离层,泄露进入内磁层,与电子发生回旋共振,使其扩散进入损失锥,从而沉降到大氣中 [26–33]. 近几十年来,国内外的专家学者在地面人工台站 VLF 信号影响辐射带电子动态变化这一方向做了很多研究. 如直接观测到了与台站发射波形 ON/OFF 调制周期一致的粒子沉降周期 [34–36]; 通过 DEMETER 卫星的观测数据 [37,38] 和射线追踪模拟 [39], 得出了 NWC 台站发射的信号会引起内磁层中大于 100 keV 电子沉降的结论; 通过准线性理论定量计算了 VLF 信号在与辐射带电子发生回旋共振时, 改变不同的参数对投掷角扩散系数大小的影响 [40,41]. 这些研究大多基于理论计算和射线追踪得到 VLF 台站信号的波模, 并没有使用实际观测结果. 通过范艾伦探测双星中的 A 星的数据, 文献 [18] 得到了 10–60 kHz 的 VLF 台站信号在磁层中的统计模型, 并计算了 VLF 台站信号与嘶声共同散射时, 内辐射带及槽区的电子的生命周期将下降 1–2 个数量级; 文献 [42] 统计了 VLF 台站信号在磁层中的全球分布. 文献 [19] 根据文献 [42] 的结果计算了 VLF 台站信号、嘶声和库仑碰撞联合散射时对高能电子的散射效应, 结果表明 VLF 台站信号可以使内磁层中 500 keV 电子的生命周期, 在 200 d 内下降一个数量级, 使槽区 40 keV 电子的生命周期在 100 d 内下降一个数量级.

在分析 VLF 台站信号对高能电子的散射效应时, 之前的研究大多使用投掷角扩散系数来计算电子损失时间尺度 [18,33], 这一方法的优点是步骤简单、计算量小, 缺点是无法具体分析不同投掷角电子在损失时的详细演化过程. 为了系统、细致分析各个 VLF 台站信号对不同投掷角高能电子的散射效应, 本文在文献 [42] 统计模型基础上, 使用准线性理论计算 NWC, NAA 和 DHO38 三个台站发射的 VLF 信号对高能电子的弹跳平均投掷角扩散系数, 并将其代入到一维 Fokker-Planck 方程求解高能电子在全投掷角范围的演化过程. 第 2 节介绍使用的理论模型, 第 3 节介绍模拟结果, 第 4 节总结.

2 理论模型

2.1 投掷角扩散率的计算

统计结果 [42] 表明, 在内辐射带和槽区中, 50% 以上的 VLF 台站信号能量来自于 NWC, NAA, DHO38 这三个台站, 因此本文主要分析这三个台

站的 VLF 信号对内辐射带和槽区高能电子的散射效应. 之前的研究表明, 在 $L < 1.7$, VLF 波主要以非导管的方式传播 (在赤道附近, 波的传播方向与磁力线之间夹角约为 60° – 70°); 而在更高的 L -shell, VLF 波主要以导管的方式传播 (即波沿磁力线近似于准平行传播) [18,29,38,39]. 根据这些结论, 本文假设在 $L < 1.7$ 的 VLF 台站信号全部为非导管传播; 在 $1.7 \leq L < 2.5$ 的 VLF 台站信号, 25% 的波是非导管传播, 75% 为导管传播; 在 $L \geq 2.5$ 的 VLF 台站信号为导管传播 [18]. 本文使用文献 [42] 对 VLF 台站信号的统计结果作为内辐射带和槽区 VLF 台站信号分布的主要依据. 因为文献 [42] 在计算 VLF 台站信号的波幅时假设在所有的 L -shell, 波均以导管的方式传播 (即波传播角 $\theta = 0^\circ$), 本文首先采用文献 [43] 的等离子体层密度模型和偶极子磁场模型, 将文献 [42] 中 VLF 台站信号的磁场功率谱密度转换为电场功率谱密度 [44]. 然后再假设非导管波的传播角为 $\theta = 65^\circ$, 导管波的传播角为 $\theta = 0^\circ$ [18], 将 VLF 台站信号的电场功率谱密度转换为对应的磁场功率谱密度 [44]. 最后使用新的磁场功率谱密度计算 VLF 台站信号的波幅, 这样计算的结果使用了 VLF 台站信号在空间中的实际传播特性, 与实际情况更加接近. 三个 VLF 台站信号的波幅随 L -shell 的分布关系如图 1 所示. 这三个 VLF 台站的发射频率、功率、地理位置、及 L -shell 分布范围如表 1 所列.

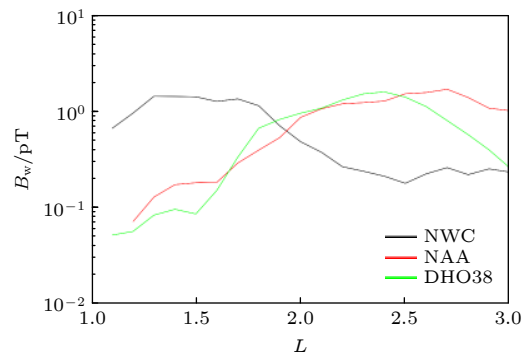


图 1 计算得到的三个台站的波幅

Fig. 1. Calculated wave amplitudes from three VLF transmitters.

根据上面计算的 VLF 台站信号波幅, 使用 FDC 程序 [45] (full diffusion code) 计算了 VLF 台站信号引起的电子弹跳平均投掷角扩散系数 $\langle D_{\alpha\alpha} \rangle$, 在计算投掷角扩散系数时考虑的共振阶数为 $|N| \leq 10$. VLF 台站信号的频谱分布采用高斯分布, 中心

频率为各台站的发射频率 (见表 1), 半波带宽为 $\delta_w = 100$ Hz. 传播角的模型也采用高斯模型, 对于导管传播的 VLF 台站信号, 具体传播角的模型参数选取为 $\theta_m = \theta_{\min} = 0^\circ$, $\theta_{\max} = 30^\circ$, $\theta_w = 10^\circ$ ^[18]; 对于非导管传播, 传播角的模型选取为 $\theta_m = 65^\circ$, $\theta_{\min} = 45^\circ$, $\theta_{\max} = 80^\circ$, $\theta_w = 10^\circ$ ^[18]. 由于高斜波的传播角需要满足 $\theta \leq \min(\theta_{\max}, \theta_r)$ (resonance cone angle: $\theta_r = \arccos(f/f_{ce})$), 于是设定折射指数的范围为 $n < 200$ ^[46], 超过这个范围后, 将投掷角扩散系数 $D_{\alpha\alpha}$ 置为 0. VLF 台站信号的纬度覆盖范围, 对于导管传播为 $\leq 45^\circ$, 对于非导管传播为 $\leq 25^\circ$ ^[18,32,39].

表 1 选取计算的台站信息
Table 1. The information of the three selected VLF transmitters.

台站	频率 /kHz	功率 /kW	经纬度	L -shell	磁层中波幅范围/ L
NWC	19.8	1000	21.8°S 114.2°E	1.42	1.5—2.2
NAA	24.0	1000	44.6°N 67.3°W	2.74	1.7—3.0
DHO38	23.4	300	53.1°N 7.6°E	2.38	1.7—2.9

2.2 一维 Fokker-Planck 扩散方程

为了详细分析 VLF 台站信号对不同投掷角电子的散射效应, 本文将计算得到的弹跳平均投掷角扩散系数应用于求解一维 Fokker-Planck 扩散方程^[47], 模拟电子相空间密度 (phase space density, PSD) 的演化过程. 一维 Fokker-Planck 扩散方程为

$$\frac{\partial f}{\partial t} = \frac{1}{T(\alpha_{eq}) \sin(2\alpha_{eq})} \frac{\partial}{\partial \alpha_{eq}} \times \left[T(\alpha_{eq}) \sin(2\alpha_{eq}) \langle D_{\alpha\alpha} \rangle \frac{\partial f}{\partial \alpha_{eq}} \right], \quad (1)$$

其中 α_{eq} 为电子的赤道投掷角, $T(\alpha_{eq}) \approx 1.30 - 0.56 \sin \alpha_{eq}$, f 表示电子的 PSD. 为了方便计算, 初始电子 PSD 采用 Kappa 分布^[15,48], 表达式为

$$f(\alpha_{eq}, p) = \left(1 + \frac{p^2}{k\theta^2} \right)^{-(k+1)} \sin \alpha_{eq}, \quad (2)$$

其中 $k = 6.0$, 为 Kappa 指数; $\theta^2 = 0.15$, θ 是归一化的热速度, p 是电子动量. 对于投掷角的边界条件, 将损失锥内 ($\alpha_{eq} \leq \alpha_L$, 其中 $\sin \alpha_L = L^{-3/2} (4 - 3/L)^{-1/4}$) 的 f 置为 0, 在 $\alpha_{eq} = 90^\circ$ 时设置 $\partial f / \partial \alpha_{eq} = 0$. 对于能量的边界条件, 当 $E_k = 1$ keV

和 $E_k = 1$ MeV 时, 设置 f 为固定值.

3 结果分析

3.1 扩散系数计算结果

图 2 为 NWC 台站信号在 $L = 1.5$ —2.2 引起的弹跳平均电子投掷角扩散系数. 图中横坐标为电子的赤道投掷角, 纵坐标为电子能量, 颜色表示电子投掷角扩散系数的大小. 以 $L = 1.5$ 为例, 扩散系数分为两部分, 其中一部分集中在能量为 400—1000 keV, 投掷角为 0 — 57° 的范围, 是电子与 VLF 信号发生回旋共振导致的. 可以发现, 随着能量的增加, 发生回旋共振的投掷角范围也在增加, 而扩散系数峰值在最小共振能量处, 最小共振能量随着投掷角的增加而增大. 另一部分投掷角扩散系数是电子与 VLF 台站信号发生朗道共振导致的. 相对于回旋共振, 朗道共振导致的扩散系数要弱 1—2 个数量级. 在 $L = 1.6$ —2.2, 投掷角扩散系数的分布特征与 $L = 1.5$ 的相似, 最小回旋共振能量随着 L -shell 的增加而降低, 这是因为电子回旋频率随着 L -shell 的增加而降低^[18,19]. 在 $L = 1.6$ 和 $L = 1.7$ 的波幅相近, 但 $L = 1.7$ 处回旋共振 (低投掷角) 的扩散系数明显增大, 而朗道共振 (高投掷角) 的扩散系数相对减弱, 这是由于在 $L = 1.7$ 处导管传播的 VLF 台站信号比例 (75%) 高于 $L = 1.6$ (0%), 这些结果说明当波幅相近时, 导管传播的 VLF 台站信号对电子的散射效应要明显强于非导管传播的 VLF 台站信号. 在 $L = 1.7$ 和 $L = 1.8$ 处, 投掷角扩散系数最大, 约为 10^{-8} s^{-1} , 而在 $L \geq 1.9$ 时, 因为 VLF 台站信号的波幅随 L -shell 的增加而减弱, 投掷角扩散系数也相应地随 L -shell 的增加而减弱.

NAA 台站信号和 DHO38 台站信号引起的电子弹跳平均投掷角扩散系数如图 3 和图 4 所示. 图的格式与图 2 相同, 投掷角扩散系数的特征也与图 2 相似. 由于 NAA 和 DHO38 这两个台站的发射频率相近, 在相同的 L -shell, 两个台站信号散射的电子能级范围和投掷角范围几乎一致, 随着 L -shell 的增加, NAA 和 DHO38 台站信号能散射更小能量的电子, 如在 $L = 2.6$ 处, 扩散系数的峰值在几 keV. 随着投掷角的增加, 扩散系数的峰值移向更高能量的电子. 在更高的 L -shell, 扩散系数的峰值下移至几百 eV 能量. 由图 1 可以看出, NAA

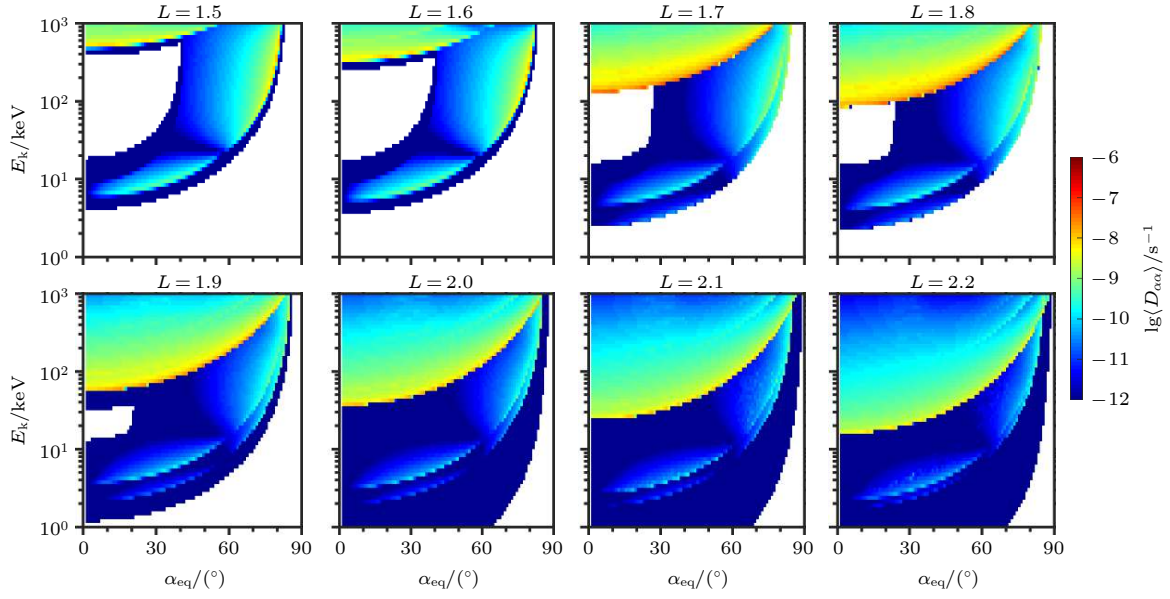


图 2 NWC 台站信号在 $L = 1.5\text{--}2.2$ 导致的电子弹跳平均投掷角扩散系数 $\langle D_{\alpha\alpha} \rangle$. 图中横坐标为赤道投掷角 α_{eq} , 纵坐标为电子能量 E_k , 颜色表示扩散系数的大小

Fig. 2. The color-code bounce-averaged pitch angle diffusion coefficients $\langle D_{\alpha\alpha} \rangle$ as a function of equatorial pitch angle α_{eq} and electron kinetic energy E_k induced by VLF transmitter signals from NWC at $L = 1.5\text{--}2.2$.

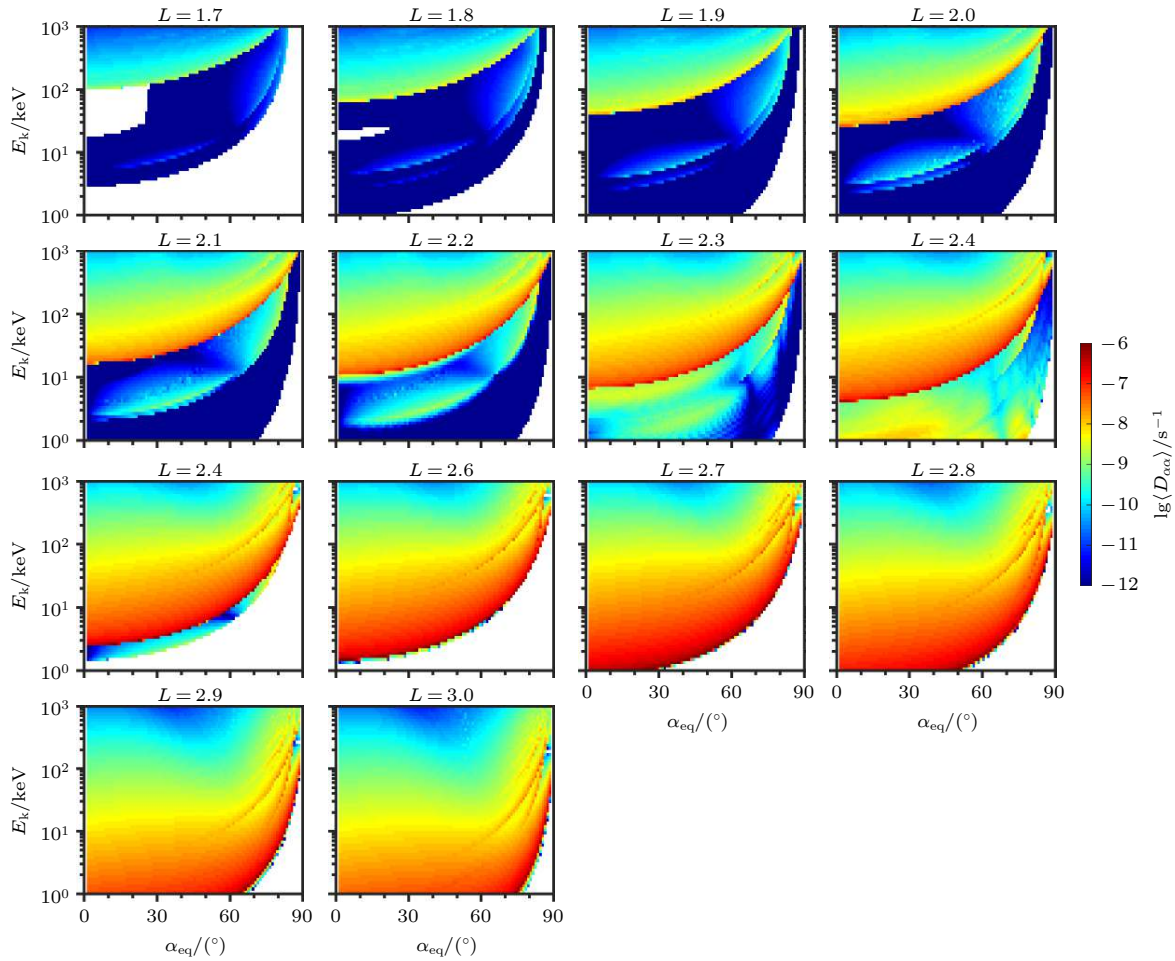


图 3 NAA 台站信号在 $L = 1.7\text{--}3.0$ 导致的电子弹跳平均投掷角扩散系数. 格式同图 2

Fig. 3. Same as in Fig. 2 except for VLF transmitter signals from NAA at $L = 1.7\text{--}3.0$.

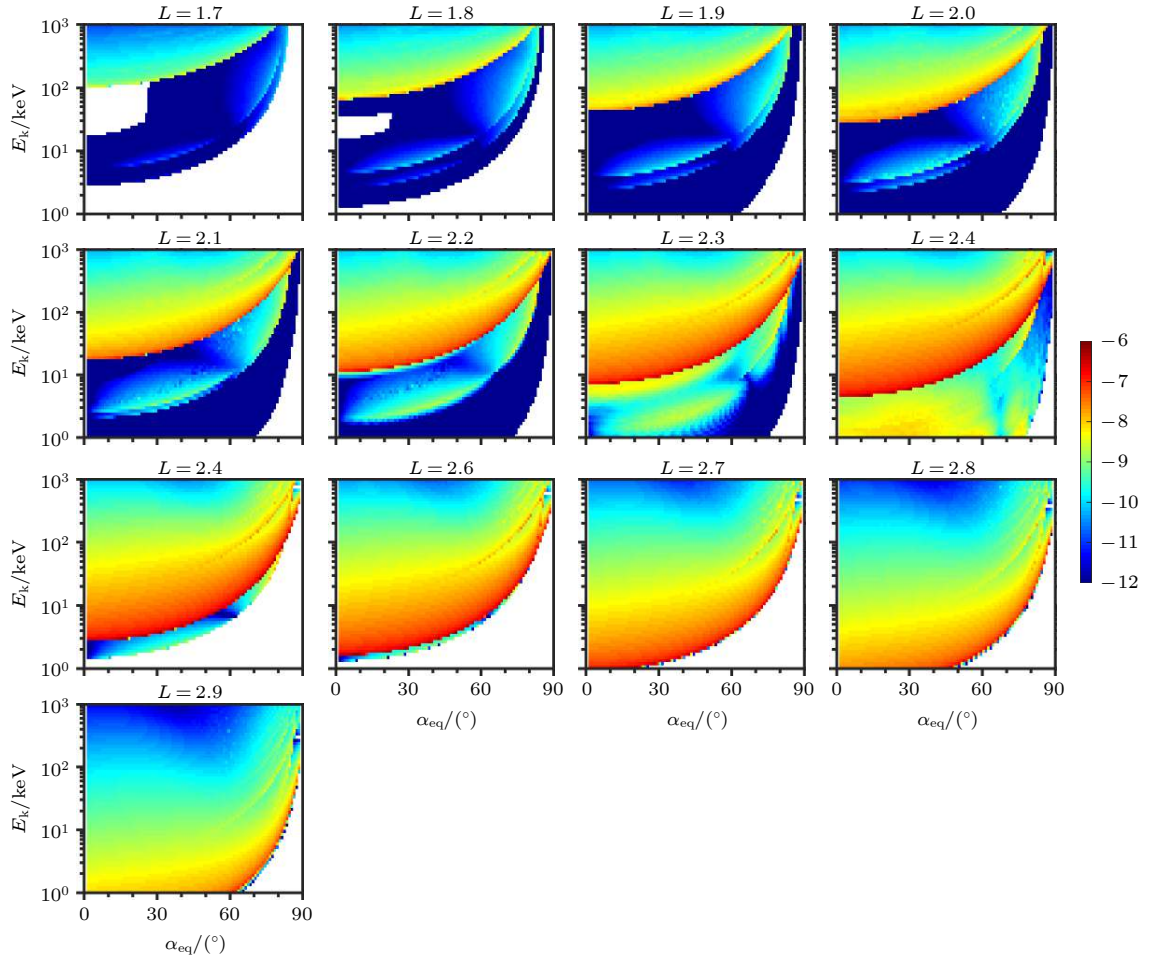


图 4 DHO38 台站信号在 $L = 1.7$ — 2.9 导致的电子弹跳平均投掷角扩散系数. 格式同图 2

Fig. 4. Same as in figure 2 except for VLF transmitter signals from DHO38 at $L = 1.7$ – 2.9 .

和 DHO38 台站的波幅在 $L = 2.2$ — 2.7 较大, 这些 L -shell 相应的扩散系数也较大, 最大值可达到约 10^{-7} s^{-1} . 对比图 1 中两个台站信号的幅值, 可以看出在 $L = 1.7$ — 2.4 处, DHO38 台站信号的幅值较大, 相应的 DHO38 台站信号引起的投掷角扩散系数更大; 而在 $L = 2.6$ — 2.9 处, NAA 台站信号幅值更大, 相应的投掷角扩散系数更大. 比较三个台站的扩散系数可以发现, 在相同的 L -shell, 最小共振能量随着台站频率的增加而减小, 而投掷角扩散系数的大小, 主要由波幅的大小决定.

3.2 散射效应模拟结果

为了进一步研究 VLF 台站信号对内辐射带和槽区不同投掷角高能电子的散射效应, 计算 VLF 台站信号导致的电子弹跳平均投掷角扩散系数后, 将其用于求解一维 Fokker-Planck 扩散方程.

图 5 是 $L = 1.8$ 处, 在 VLF 台站信号的作用下, 电子 PSD 随时间演化过程的模拟结果.

初始的电子 PSD 投掷角分布如图 5(a1) 所示, 图 5(b1)—图 5(d4) 为采用不同 VLF 台站信号 (从左至右分别为 NWC, NAA, DHO38 台站单独作用和三个台站信号的联合作用), 高能电子 PSD 演化的分布图 (从上至下分别为 50, 100 和 200 d). 图中横坐标为电子赤道投掷角, 纵坐标为电子能量, 颜色表示电子 PSD 的大小. 图中空白区域为损失锥 (电子赤道投掷角小于 20° 的范围). 从图 5 可以看出, 在 $L = 1.8$ 处, NWC 台站信号对电子的散射作用最强, 可以使 90 — 120 keV 、赤道投掷角小于 40° 的电子 PSD 在 200 d 内减少至少一个数量级; NAA 和 DHO38 台站信号只对 80 keV 左右、损失锥附近的电子有散射作用. 这与上一节计算的投掷角扩散系数分布是对应的. 三个 VLF 台站信号联合散射时, 电子 PSD 下降范围与 NWC 台站信号单独作用时大体一致. 表明在低 L -shell, NWC 台站信号对高能电子的散射起主导作用.

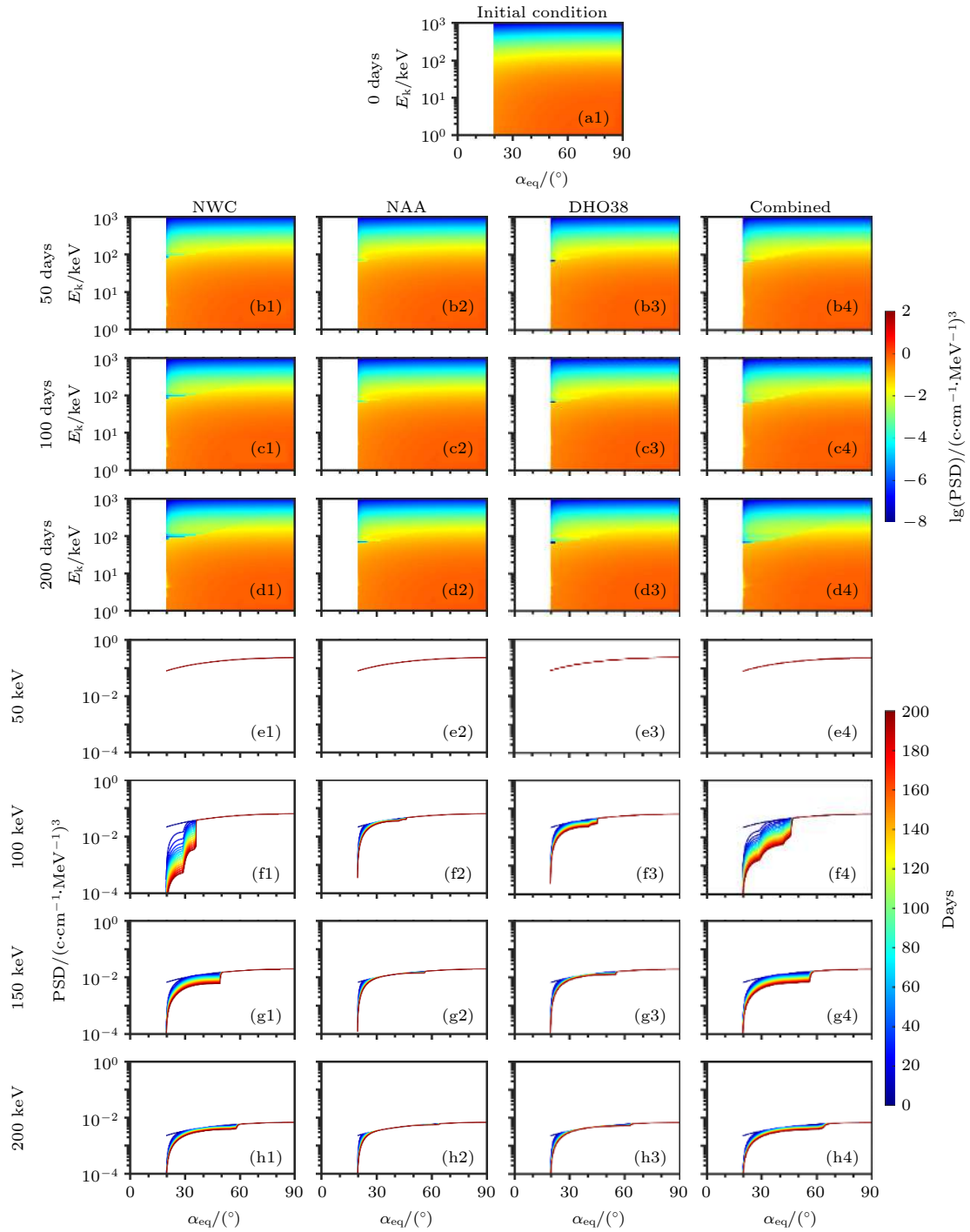


图 5 在 $L = 1.8$ 处, 不同 VLF 台站信号对电子散射效果的模拟, 从左至右分别为 NWC, NAA, DHO38 台站信号单独散射和三个台站信号联合散射 (a1)—(d4) 不同模拟时间的电子相空间密度分布二维图, 颜色表示电子相空间密度的大小; (e1)—(h4) 指定能级电子的相空间密度随时间演化的过程图, 线条颜色表示不同的时间

Fig. 5. (a1)–(d4) Two dimensional distributions of color-code electron phase space density (PSD) as a function of equatorial pitch angle α_{eq} and electron kinetic energy E_k at the indicated interaction time stamps at $L = 1.8$ induced by different VLF transmitter signals (from left to right): NWC, NAA, DHO38 individual scattering and combined scattering; (e1)–(h4) temporal evolution of electron PSD distribution as a function of α_{eq} for the indicated four electron energies at the color-coded interaction time stamps.

图 5(e1)—图 5(h4) 给出了在不同 VLF 台站信号的作用下, 指定能级电子 PSD 随时间的演化. 图中横坐标是电子赤道投掷角, 纵坐标是电子

PSD, 线条颜色代表不同时间. 可以看出, 对于 100 keV 电子, NWC 台站信号可以使低投掷角 ($< 40^\circ$) 电子 PSD 在 200 d 内减少一个数量级左

右, 并且电子越接近损失锥, 损失效果越明显. 但 NAA 和 DHO38 台站信号对电子无明显散射效应. 所有 VLF 台站信号对于高投掷角 ($< 80^\circ$) 电子均无明显散射效应.

在 $L = 2.2$ 和 $L = 2.6$ 处, VLF 台站信号作用下, 电子 PSD 随时间演化的模拟结果如图 6 和图 7 所示, 图的格式与图 5 相同. 对比不同 L 的模拟结

果可以发现, 发生损失的电子能量随 L -shell 的增加而减小. 在 $L = 2.2$ (图 6) 处, NWC 台站信号只对约 20 keV 电子有微弱的散射作用, 而 NAA 台站信号和 DHO38 台站信号对电子的散射作用较强, 主要散射 10—20 keV、投掷角小于 50° 的电子, 且 DHO38 台站信号对电子的散射作用更强. 如 NAA 台站信号可以使 20 keV、投掷角小于 50° 的

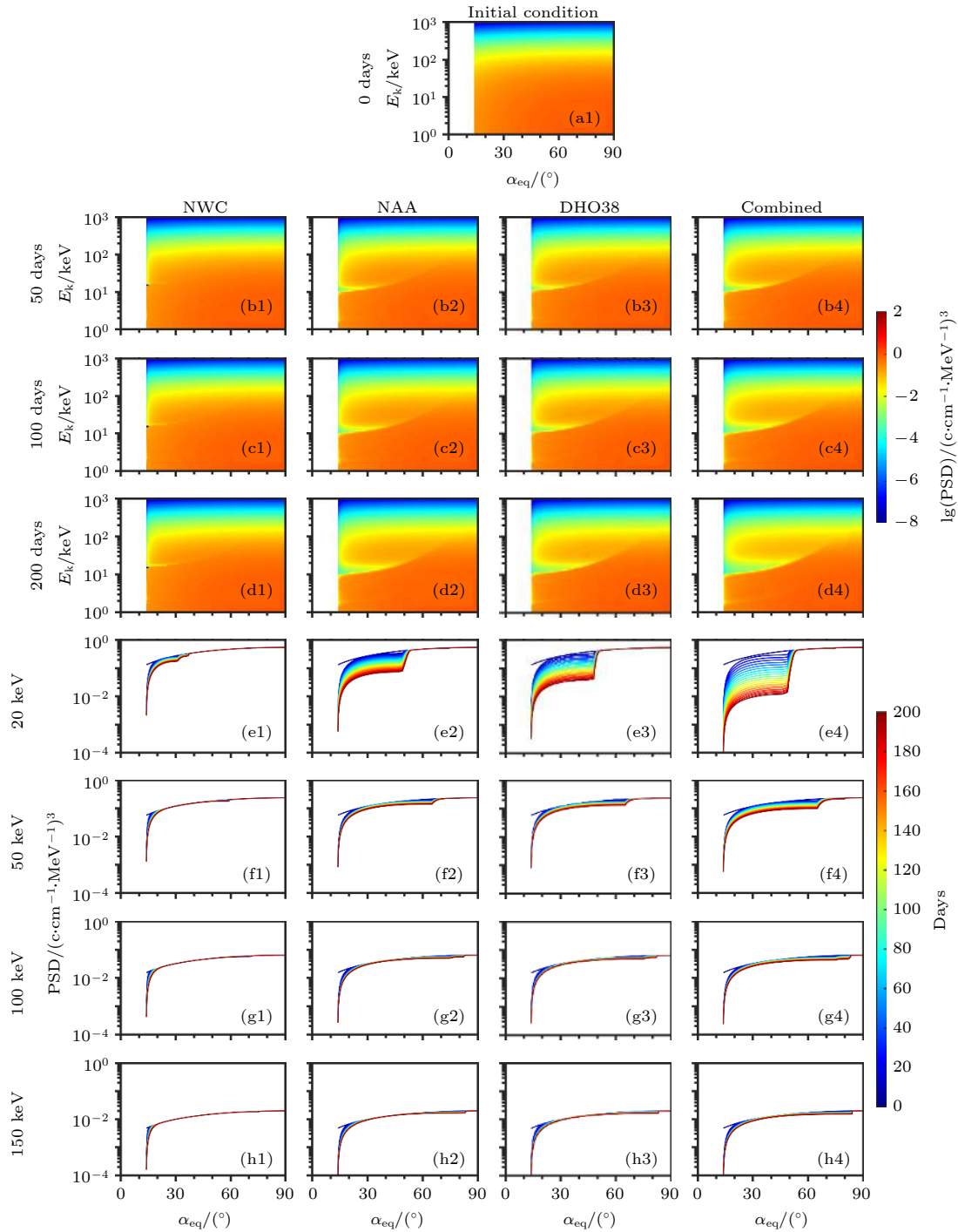


图 6 在 $L = 2.2$ 处, 不同 VLF 台站信号对电子的散射效果模拟, 格式同图 5

Fig. 6. Same as in Fig. 5 except for at $L = 2.2$.

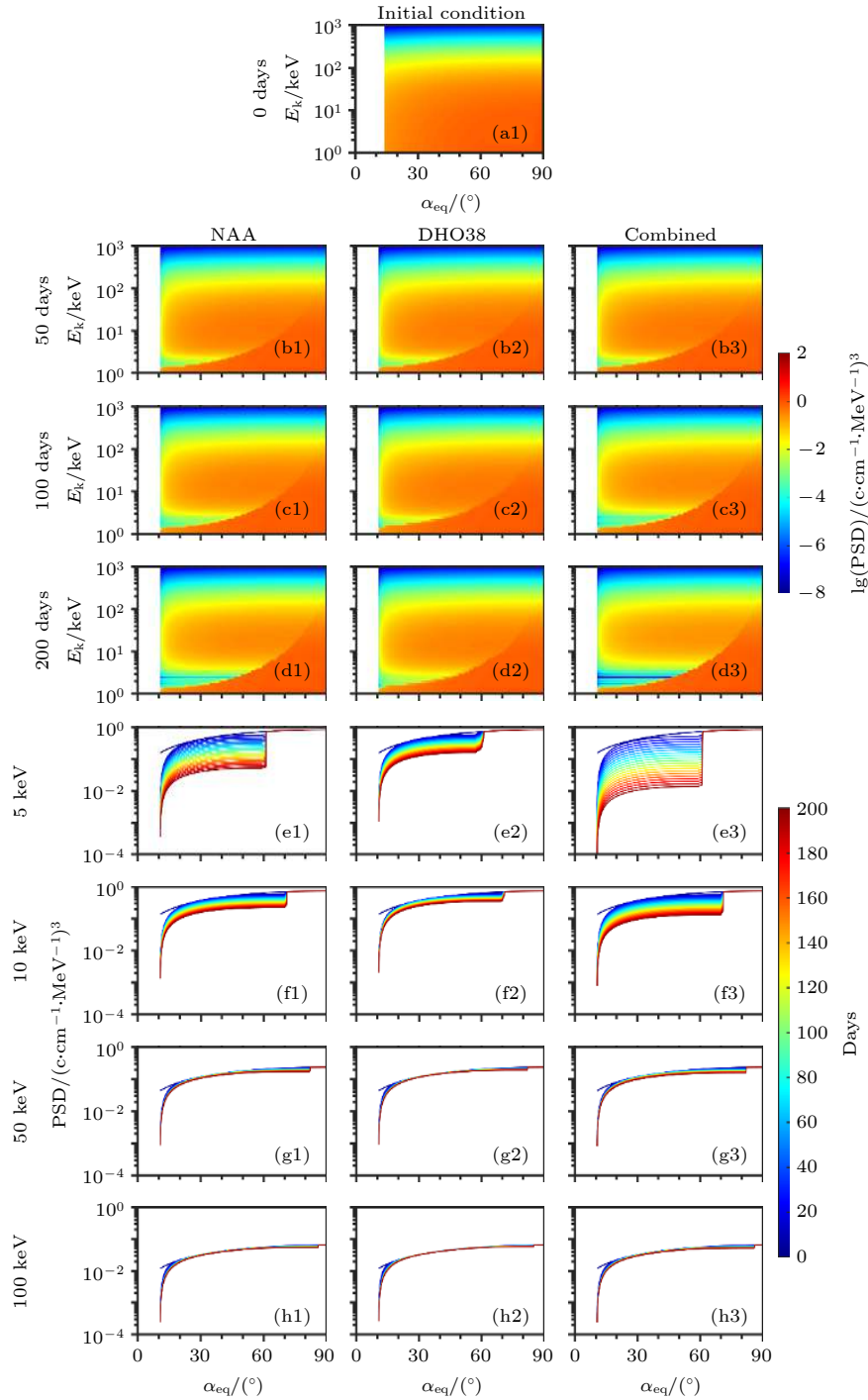


图 7 在 $L = 2.6$ 处, 不同 VLF 台站信号对电子的散射效果模拟. 格式同图 5

Fig. 7. Same as in Fig. 5 except for at $L = 2.6$.

电子 PSD 在 200 d 内减少 5 倍, DHO38 台站信号能使之减少一个数量级. 在 $L = 2.6$ (图 7) 处, NAA, DHO38 台站信号对几 keV、投掷角小于 60° 的电子有较强的散射作用, NAA 台站信号的散射作用更强. 如 DHO38 台站信号能使 5 keV、投掷角小于 60° 的电子 PSD 在 200 d 内减少 5 倍,

而 NAA 台站信号能使之减少一个数量级. 当这两个 VLF 台站的信号联合散射时, 电子损失加快. 由图 6 和图 7 可以看出, 在 $2.2 \leq L \leq 2.7$, 主要是 NAA 和 DHO38 台站的信号引起电子的损失, 且电子损失的速度与 VLF 台站信号幅值的大小成正比.

4 结 论

基于卫星观测结果、准线性理论和 Fokker-Planck 扩散方程的模拟, 本文系统分析了 NWC, NAA, DHO38 三个 VLF 台站信号对内辐射带和槽区不同投掷角电子的散射效应, 主要结论如下.

1) 在低 L -shell ($L \leq 1.8$), NWC 台站对电子的散射作用相对较强, 主要散射能量为 100 keV 左右、投掷角小于 60° 的电子. 随着 L -shell 降低, 主要散射的电子能量升高, 从 $L = 1.8$ 到 $L = 1.5$, 主要散射的电子能级从 90—120 keV 升高到 550—650 keV.

2) 在高 L -shell ($2.2 \leq L \leq 2.7$), 主要是 NAA 和 DHO38 台站信号对电子起散射作用, 主要散射几十 keV、投掷角小于 70° 的电子. 从 $L = 2.2$ 到 $L = 2.7$, 主要散射的电子能级从 10—20 keV 下降到几 keV.

3) VLF 台站信号对高投掷角 ($> 80^\circ$) 电子均无显著散射作用.

参考文献

- [1] Xiang Z, Tu W, Li X, Ni B, Morley S K, Baker D N 2017 *J. Geophys. Res. Space Phys.* **122** 9858
- [2] Xiang Z, Tu W, Ni B, Henderson M G, Cao X 2018 *Geophys. Res. Lett.* **45** 8035
- [3] Ma X, Xiang Z, Ni B, Fu S, Cao X, Hua M, Guo D, Guo Y, Gu X, Liu Z, Zhu Q 2020 *Earth Planet. Phys.* **4** 598
- [4] Rosen A, Sanders N L 1971 *J. Geophys. Res.* **76** 110
- [5] Selesnick R S 2015 *J. Geophys. Res. Space Phys.* **120** 2912
- [6] Xiang Z, Li X, Selesnick R, Temerin M A, Ni B, Zhao H, Zhang K, Khoo L Y 2019 *Geophys. Res. Lett.* **46** 1919
- [7] Xiang Z, Li X, Temerin M A, Ni B, Zhao H, Zhang K, Khoo L Y 2020 *J. Geophys. Res. Space Phys.* **125** e2019JA027678
- [8] Xiang Z, Li X, Ni B, Temerin M A, Zhao H, Zhang K, Khoo L Y 2020 *J. Geophys. Res. Space Phys.* **125** e2020JA028042
- [9] Zhang K, Li X, Zhao H, Schiller Q, Khoo L Y, Xiang Z, Selesnick R, Temerin M A, Sauvaud J A 2019 *Geophys. Res. Lett.* **46** 544
- [10] Ni B, Hua M, Zhou R, Yi J, Fu S 2017 *Geophys. Res. Lett.* **44** 3465
- [11] Hua M, Ni B, Fu S, Gu X, Xiang Z, Cao X, Zhang W, He Y, Huang H, Lou Y, Zhang Y 2018 *Geophys. Res. Lett.* **45** 10057
- [12] Rodger C J, Clilverd M A, McCormick R J 2003 *J. Geophys. Res.* **108** 1462
- [13] Clilverd M A, Rodger C J, Nunn D 2004 *J. Geophys. Res. A* **109** 12208
- [14] Green A, Li W, Ma Q, Shen X C, Bortnik J, Hospodarsky G B 2020 *Geophys. Res. Lett.* **47** e2020GL089584
- [15] Ma Q, Li W, Thorne R M, Bortnik J, Kletzing C A, Kurth W S, Hospodarsky G B 2016 *J. Geophys. Res. Space Phys.* **121** 274
- [16] Gu X D, He Y, Ni B B, Fu S, Hua M, Xiang Z 2020 *Chin. J. Geophys.* **63** 2121 (in Chinese) [顾旭东, 何颖, 倪彬彬, 付松, 花漫, 项正 2020 *地球物理学报* **63** 2121]
- [17] Ni B, Yan L, Fu S, Gu X, Cao X, Xiang Z, Zhang Y 2020 *Geophys. Res. Lett.* **47** e2019GL086487
- [18] Ma Q, Mourenas D, Li W, Artemyev A, Thorne R M 2017 *Geophys. Res. Lett.* **44** 6483
- [19] Ross J P J, Meredith N P, Glauert S A, Horne R B, Clilverd M A 2019 *J. Geophys. Res. Space Phys.* **124** 5260
- [20] Hua M, Li W, Ni B, Ma Q, Green A, Shen X, Claudepierre S G, Bortnik J, Gu X, Fu S, Xiang Z, Reeves G D 2020 *Nat. Commun.* **11** 4847
- [21] Chen Y P, Yang G B, Ni B B, Zhao Z Y, Gu X D, Zhou C, Wang F 2016 *Adv. Space Res.* **57** 1871
- [22] Chen Y, Ni B, Gu X, Zhao Z, Yang G, Zhou C, Zhang Y 2017 *Sci. Chin. Technol. Sci.* **60** 166
- [23] Yi J, Gu X D, Li Z P, Lin R T, Cai Y H, Chen L, Ni B B, Yue X A 2019 *Chin. J. Geophys.* **62** 3223 (in Chinese) [易娟, 顾旭东, 李志鹏, 林仁桐, 蔡毅徽, 陈隆, 倪彬彬, 乐新安 2019 *地球物理学报* **62** 3223]
- [24] Yi J, Gu X, Cheng W, Tang X, Chen L, Ni B, Zhou R, Zhao Z, Wang Q, Zhou L 2020 *Earth Planet. Phys.* **4** 238
- [25] Zhou R, Gu X, Yang K, Li G, Ni B, Yi J, Chen L, Zhao F, Zhao Z, Wang Q, Zhou L 2020 *Earth Planet. Phys.* **4** 120
- [26] Vampola A L, Kuck G A 1978 *J. Geophys. Res.* **83** 2543
- [27] Koons H C, Edgar B C, Vampola A L 1981 *J. Geophys. Res.* **86** 640
- [28] Abel B, Thorne R M 1998 *J. Geophys. Res.* **103** 2397
- [29] Gamble R J, Rodger C J, Clilverd M A, Sauvaud J A, Thomson N R, Stewart S L, McCormick R J, Parrot M, Berthelier J J 2008 *J. Geophys. Res. A* **113** 10211
- [30] Graf K L, Inan U S, Piddychiy D, Kulkarni P, Parrot M, Sauvaud J A 2009 *J. Geophys. Res. A* **114** 07205
- [31] Selesnick R S, Albert J M, Starks M J 2013 *J. Geophys. Res. Space Phys.* **118** 628
- [32] Agapitov O V, Artemyev A V, Mourenas D, Kasahara Y, Krasnoselskikh V 2014 *J. Geophys. Res. Space Phys.* **119** 2876
- [33] Claudepierre S G, Ma Q, Bortnik J, O'Brien T P, Fennell J F, Blake J B 2020 *Geophys. Res. Lett.* **47** e2019GL086056
- [34] Imhof W L, Reagan J B, Voss H D, Gaines E E, Datlowe D W, Mobilia J, Helliwell R A, Inan U S, Katsufakis J, Joiner R G 1983 *Geophys. Res. Lett.* **10** 361
- [35] Inan U S, Chang H C, Helliwell R A, Imhof W L, Reagan J B, Walt M 1985 *J. Geophys. Res.* **90** 359
- [36] Wang P, Wang H Y, Ma Y Q, Li X Q, Lu H, Meng X C, Zhang J L, Wang H, Shi F, Xu Y B, Yu X X, Zhao X Y, Wu F 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 039401 (in Chinese) [王平, 王焕玉, 马宇倩, 李新乔, 卢红, 孟祥承, 张吉龙, 王辉, 石峰, 徐岩冰, 于晓霞, 赵小芸, 吴峰 2011 *物理学报* **60** 039401]
- [37] Sauvaud J A, Maggiolo R, Jacquy C, Parrot M, Berthelier J J, Gamble R J, Rodger C J 2008 *Geophys. Res. Lett.* **35** L09101
- [38] Clilverd M A, Rodger C J, Gamble R, Meredith N P, Parrot M, Berthelier J J, Thomson N R 2008 *J. Geophys. Res. A* **113** 04211

- [39] Kulkarni P, Inan U S, Bell T F, Bortnik J 2008 *J. Geophys. Res. A* **113** 07214
- [40] Zhang Z X, Wang C Y, Li Q, Wu S G 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 079401 (in Chinese) [张振霞, 王辰宇, 李强, 吴书贵 2014 物理学报 **63** 079401]
- [41] Luo X D, Niu S L, Zuo Y H 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 069401 (in Chinese) [罗旭东, 牛胜利, 左应红 2015 物理学报 **64** 069401]
- [42] Meredith N P, Horne R B, Clilverd M A, Ross J P J 2019 *J. Geophys. Res. Space Phys.* **124** 5246
- [43] Ozhogin P, Tu J, Song P, Reinisch B W 2012 *J. Geophys. Res. A* **117** 06225
- [44] Ni B, Thorne R M, Meredith N P, Shprits Y Y, Horne R B 2011 *J. Geophys. Res. A* **116** 10207
- [45] Ni B, Thorne R M, Shprits Y Y, Bortnik J 2008 *Geophys. Res. Lett.* **35** L11106
- [46] Ma Q, Artemyev A V, Mourenas D, Li W, Thorne R M, Kletzing C A, Kurth W S, Hospodarsky G B, Reeves G D, Spence H E, Wygant J 2017 *Geophys. Res. Lett.* **44** 12057
- [47] Xiao F, Su Z, Zheng H, Wang S 2009 *J. Geophys. Res. A* **114** 03201
- [48] Xiao F, Shen C, Wang Y, Zheng H, Wang S 2008 *J. Geophys. Res. A* **113** 05203

Scattering effect of very low frequency transmitter signals on energetic electrons in Earth's inner belt and slot region^{*}

Liu Yang-Xi-Zi¹⁾ Xiang Zheng^{1)†} Guo Jian-Guang^{2)‡} Gu Xu-Dong¹⁾
 Fu Song¹⁾ Zhou Ruo-Xian¹⁾ Hua Man¹⁾ Zhu Qi¹⁾
 Yi Juan¹⁾ Ni Bin-Bin¹⁾³⁾

1) (*Department of Space Physics, School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan 430072, China*)

2) (*Key Laboratory of Space Weather, National Center for Space Weather, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China*)

3) (*Center for Excellence in Comparative Planetology, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230026, China*)

(Received 1 December 2020; revised manuscript received 27 February 2021)

Abstract

Whistler mode very low frequency (VLF) waves from man-made ground-based transmitters in a frequency range of 10–30 kHz are mainly used for submarine communication, and they propagate primarily in the Earth-lower ionosphere waveguide and part of their energy can leak into the inner magnetosphere, leading the energetic electrons in inner radiation belt and slot region to precipitate into atmosphere and then affect the energetic electron dynamics in the near-Earth space. The scattering effects of artificial VLF signals from NWC, NAA and DHO38 transmitters on energetic electrons in Earth's inner belt and slot region are investigated in detail in this work. Based on the quasi-linear theory and the Full Diffusion Code, we calculate the bounce-average pitch angle diffusion coefficients induced by NWC, NAA and DHO38 VLF transmitter signals, for which the resonance harmonics $|N| \leq 10$ are considered, respectively. We further implement the one-dimensional Fokker-Planck diffusion simulations by using the available pitch angle diffusion rates to model the dynamic evolutions of energetic electrons caused by the scattering of the VLF transmitter signals in the inner belt and slot region in 200 d. The simulation results indicate that the NWC VLF transmitter signals are dominant in scattering ~100 keV electrons with pitch angles less than 60° at $L \leq 1.8$, and the mainly scattered electron energy values increase with L -shell decreasing, from $L = 1.8$ to $L = 1.5$, the mainly scattered electron energy increases from 90–120 keV to 550–650 keV. The NAA and DHO38 VLF transmitter signals are important in scattering < 20 keV electrons with pitch angles less than 70° at higher L -shells ($2.2 \leq L \leq 2.7$), from $L = 2.2$ to $L = 2.7$, the mainly scattered electron energy decreases from 10–20 keV to several keV. The VLF transmitter signals are found to have a slight influence on the loss of energetic electrons with pitch angles larger than 80° .

Keywords: Earth's radiation belts, artificial very low frequency transmitter signals, wave-particle interactions, electron pitch angle diffusion coefficient

PACS: 94.05.Pt, 94.30.Xy, 94.30.Tz, 94.30.Ny

DOI: 10.7498/aps.70.20202029

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 42025404, 41704162, 41974186, 41674163, 41904144, 41904143), the B-type Strategic Priority Program of the Chinese Academy of Sciences (Grant No. XDB41000000), the Pre-research Projects on Civil Aerospace Technologies funded by the China National Space Administration (Grant Nos. D020303, D020308, D020104), and the China Postdoctoral Science Foundation (Grant No. 2019M662700).

[†] Corresponding author. E-mail: xiangzheng@whu.edu.cn

[‡] Corresponding author. E-mail: guojg@cma.gov.cn