0254-6124/2017/37(3)-277–07 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

LIAO Li, ZHAO Shufan, ZHANG Xuemin. Advances in the study of transionospheric propagation of VLF waves (in Chinese). *Chin. J. Space Sci.*, 2017, **37**(3): 277-283. DOI:10.11728/cjss2017.03.277

VLF 波渗透电离层传播计算研究进展 *

廖 力[1] 赵庶凡[2] 张学民[2]

1(中国地震局地球物理研究所 北京 100081)

2(中国地震局地震预测研究所 北京 100036)

摘 要 3∼30 kHz 的甚低频 (Very-Low-Frequency, VLF) 电磁波对近地空间的高能粒子分布具有非常重要的作用. 闪电和地面 VLF 通信台等 VLF 波主要辐射源产生的 VLF 波能够渗透进入电离层, 并以哨声波模式继续传播至磁层与高能粒子发生相互作用. 本文从 VLF 电磁波渗透电离层传播计算方法的发展、计算模型验证以及模型在电离层现象研究中的应用等方面对 VLF 波渗透进电离层之后的传播计算的研究进展进行综述, 并对未来研究进行初步展望.

关键词 甚低频电磁波, 计算方法, 模型应用

中图分类号 P 352

Advances in the Study of Transionospheric Propagation of VLF Waves

LIAO Li[1] ZHAO Shufan[2] ZHANG Xuemin[2]

1(*Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing* 100081)

2(*Institute of Earthquake Science, China Earthquake Administration, Beijing* 100036)

Abstract Very Low Frequency (VLF) electromagnetic wave (3∼30 kHz) mainly radiated by lightening and ground-based VLF transmitters, which plays a very important role on controlling the distribution of high energy particles in the magnetosphere. VLF radiation can penetrate into the ionosphere, and propagate in whistler mode in the ionosphere, and interact with high energy particles in the magnetosphere. In this paper, the development of the calculation model of VLF wave penetrating into the ionosphere, the validation of the model and the application of the model in the study of the ionospheric phenomena are reviewed, and a preliminary outlook for future work has also been made.

Key words VLF electromagnetic wave, Computation method, Application of the model

* 国家国际科技合作对俄科技合作专项 (2014DFR21280), ISSI-Beijing 项目和中国地震局地球物理研究所基本科研业务费 (DQJB16B11) 共同资助

2016-04-26 收到原稿, 2016-12-20 收到修定稿

E-mail: liaoli@cea-igp.ac.cn, zsf2008bj@126.com

0 引言

近地表的 3~30 kHz 甚低频 (Very-Low-Frequency, VLF) 电磁辐射源主要是全球分布的电闪 [1,2]. 此外, VLF 的另一个重要来源是用于远距离通信的全球地基 VLF 人工源 [3,4]. 地基 VLF 人工源产生的 VLF 波经地面和低电离层 (70~90 km) 之间来回有效的反射, 能够在地球电离层波导中从辐射源向远处传播, 经由趋肤效应渗透到海水 (电导率为 10^{-4} S·m^{-1}) 中数十米. VLF 人工源已被发展成为水面舰艇和潜水艇的有效通信手段. 迄今全球范围内正在运行的 VLF 人工源约有 20 个, 一般以 MSK 调制发射数据率为 200 Baud 的信号, 辐射功率从数十 kW 乃至 1 MW, 以每百万米几十分贝的衰减率全球传播, 在传播过程中, 部分 VLF 辐射能量不断向上渗透进入电离层和磁层 [5−7]. 该频段的电磁波已经被很多卫星观测到 (见图 1).

VLF 电磁波在渗透进电离层时会发生极化倒转, 分裂为左旋和右旋圆极化两支波模. 其中左旋圆极化波的折射指数虚部很大, 即衰减很大, 为不可传播模, 又称为耗散波; 右旋极化波的折射指数虚部较小, 为可传播模, 又称为哨声波模 [8,9] (见图 2). VLF 波不仅能向上渗透进电离层乃至磁层, 也能穿透电离层向地面透射. 地面哨声观测站获得了丰富的 VLF 波哨声资料 [7,10]. 一些研究者利用射线追踪方法开展哨声电离层传播特性研究 [11], 分析了电子密度分布和初始波法向角等参数对中低纬非导管哨声波传播的影响 [12]. 对磁纬小于 20° 的低纬哨声或称为赤道异常区哨声的研究始于 19 世纪 70 年代末 [12,13], 其传播特征与中低纬及中高纬哨声明显不同. 为了解释这种现象, 需要获得低电离层内透射与反射波束的空间场强分布以及传播路径. 低电离层内有较大的电子浓度和碰撞频率垂直梯度, 下行哨声波经部分反射及波模转换等过程呈现复杂现象. 因此, 需要采用全波解方法计算电离层参数及 VLF 波频率等对电离层透射指数和反射系数等的影响, 模拟低电离层及大地电离层空腔内三维波束能量传输的完整过程及其特征 [8,14].

闪电和地面 VLF 人工源产生的 VLF 电磁波对近地空间的能量电子分布具有重要作用. 当 VLF 电磁波以哨声模的形式渗透进磁层与高能离子发生相互作用, 导致高能粒子投掷角散射从而使其沉降 [15−18]. 一些研究认为闪电是形成和维持内外辐射带间槽区的重要因素 [19,20]. 研究表明, 利用地基大功率高频电波加热电离层可以在空间激励 VLF 电磁波, 用于远距离对潜通信及地下目标探测等 [21−23].

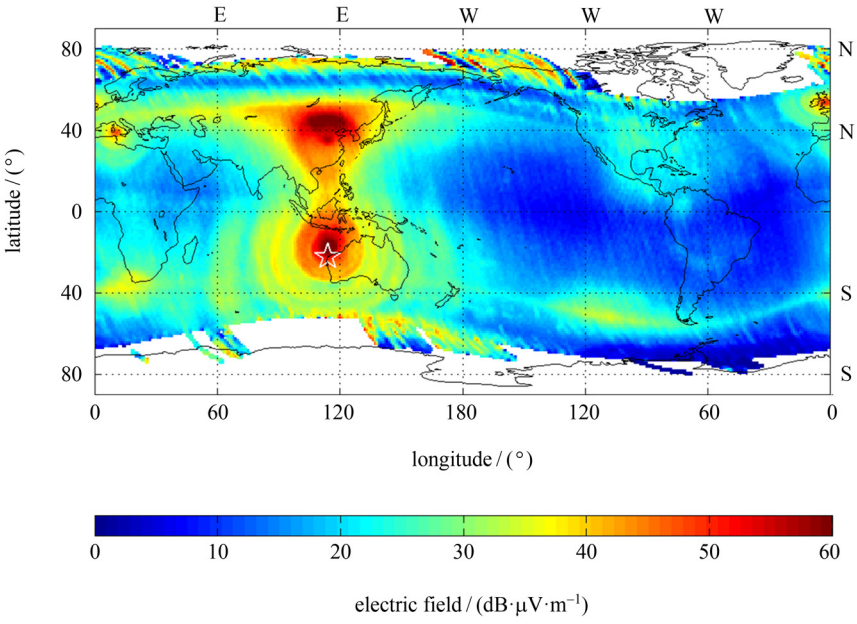


图 1 DEMETER 卫星记录到的夜间 NWC 通信台激发电场分布

Fig. 1 DEMETER observation of electric field excited by NWC during nighttime

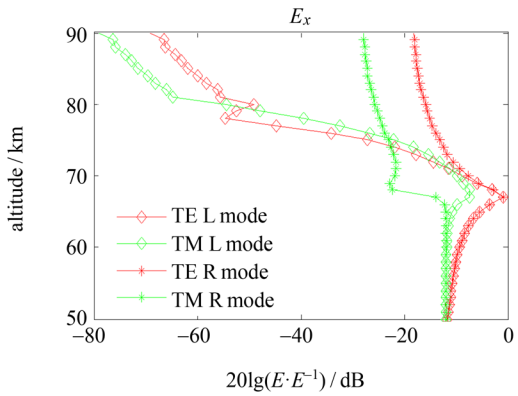


图 2　TE 和 TM 入射电磁波 E_x 分量的 R 模和 L 模

Fig. 2　E_x component of R and L mode for TM and TE incidence

对上述观测现象和科学问题进行研究, 需要定量计算地表 VLF 辐射源向上渗透进电离层进而进入磁层和低电离层 VLF 辐射源向下传播形成的电磁场. 这里对 VLF 电磁波渗透进电离层的波场计算方法的发展、验证及其应用进行综述.

1　计算模型发展

VLF 电磁波渗透进电离层的电磁场计算研究通常是基于 Helliwell 经典吸收曲线实现的 [24−28]. 例如, Inan 等 [24] 将 Crary[29] 在波导中计算能流的模型与 Helliwell 曲线 [7] 结合在一起用于估计地表辐射源到电离层深部的能量. Starks 等 [27] 结合美国海军的 VLF 三维传播模型和 Helliwell 吸收曲线, 计算地基 VLF 人工源在电离层中激发的电磁场强度. Helliwell[7] 使用电离层电子密度模型的总体平均值计算白天和夜间 2 kHz 和 20 kHz 波的能量吸收. 该模型是一个电离层 D 区平均且不随纬度变化的模型, 但实际电离层 D 区电子密度随纬度和季节变化显著. 因此, 使用 Helliwell 吸收曲线时需要给出吸收曲线随着电离层 D 区电子密度的变化. 这需要建立包含电子密度、碰撞频率剖面、地磁场参数及辐射源参数的三维模型来进行研究.

有研究采用了全波解的方法来求解上述问题 [9,30−32]. 在水平分层介质假设下, 已经发展了很多关于场的计算方法. Budden[33] 对这些方法进行了总结, 指出这些方法通常在保持数值计算稳定性方面存在问题. 当耗散波的解 (垂直波数虚部大的解) 淹没了目标波模时, 需要采用特殊技巧维持计算的稳定性. Nagano 等 [9] 提出利用传播矩阵方法求解简化的 Maxwell 方程组, 并利用格兰–施密特正交化方法克服数值溢出. 该方法计算效率高, 并且可以对电离层中的总波场进行自然分解, 得到左旋不可传播模 (L 模式) 和右旋可传播模 (R 模式) 的特征波波模. 在 VLF 频率范围内, 上行传播的 R 模式电磁波可以穿透电离层进入磁层. Helliwell[7] 对电离层对 R 模式的吸收进行了计算.

Lehtinen 和 Inan[31] 的全波解方法 (Full-wave method) 基于 Wait 波导模式计算方法 [32] 和 Nygrén[34] 提出的反射系数和波模振幅递归计算方法, 具有很好的内在稳定性, 并能够克服数值淹没问题, 可用于计算任意结构的源电流在地球–电离层波导中任意水平距离和方向上的场, 以及电离层中以哨声波模向上传播的电磁场强度.

很多研究 [35−39] 利用时域有限差分方法 (FDTD) 求解上述问题. FDTD 方法的优点是可以求解具有任意不均匀性介质的波场, 从而体现电离层 D 区的横向不均匀性. 但是目前报道的应用于低电离层电磁场计算的 FDTD 模型有的对电离层进行了过多简化, 有的只能计算某些特定频率, 因此尚未达到实用的要求.

2　计算模型验证

衡量 VLF 电磁波渗透到电离层的模型是否准确, 最直接的方法是利用观测数据进行验证. 借助全球分布的地面 VLF 人工源发射的 VLF 信号, 通过卫星记录渗透进电离层的电磁响应与模型计算结果的对比 [27,40−42], 可以定量判别模型的准确程度.

Starks 等 [27] 提取了 DE-1, IMAGE, OGO-I, OGO-II 及 DEMETER 等卫星记录到的地面 VLF 人工辐射源的电磁场能量数据, 并与计算结果进行对比. 中纬度 20 kHz 电磁波计算结果显示, Helliwell 吸收曲线白天高于观测值约 10 dB, 夜晚高于观测值约 20 dB. Starks 等仅统计了这些卫星一小部分轨道的数据, 可能会影响数据统计结果的准确性. Tao 等 [43] 使用全波法计算 VLF 电磁波渗透到电离层深部的电磁场, 他们认为在采用更准确的电子密度剖面的情况下, 计算结果与观测结果的误差约为 100 dB. Tao 等的模型只能计算单个平面波的情况. Lehtinen

和 Inan[40] 利用全波解方法, 建立了 VLF 电磁波在电离层中的三维传播模型, 模拟地基 VLF 人工辐射电磁波穿透电离层传播到卫星高度的过程, 其模拟结果显示模型计算值高于卫星测量值约 10 dB.

3 引起模型计算误差的可能因素

很多研究将观测值与计算值之间的误差全部或者部分归结为电离层电子密度的不均匀性. Foust 等 [44] 认为 F 层的电子不均匀性可能造成 3~6 dB 的损失, Shao 等 [45] 认为 D 层和 E 层的电子不均匀性可能造成 9~15 dB 的损失, 并将这种不均匀性存在的原因归结为 VLF 人工源的加热效应, 这种观点得到了 Bell 等 [46] 的支持. 为确定引起误差的可能因素, Cohen 和 Inan[47] 对卫星观测结果和模型计算结果进行了详细研究. Cohen 和 Inan 通过提取 DEMETER 卫星 6 年半以来的全部轨道数据, 提供了 25 km 分辨率 DEMETER 卫星记录的 VLF 电磁响应的平均结果. Lehtinen 和 Inan[40] 利用全波模型进行了计算, 其使用的全波模型不考虑电子密度的水平不均匀性. 将 Lehtinen 和 Inan 的计算结果与卫星结果对比发现, 其所统计的 12 个 VLF 地面人工源的模型计算结果与白天和晚上观测数据的误差均在 6 dB 以内. Lehtinen 和 Inan 认为电子密度的水平不均匀性不是影响观测与模型之间误差的重要因素, 最直接的证据是模型结果和观测数据的误差不随辐射源功率及位置等因素变化.

4 计算模型应用

4.1 电离层加热产生的调制 VLF 电磁场计算

利用地基大功率高频电波加热电离层, 可以在低电离层调制形成 VLF 电磁波, 用于远距离对潜通信及地下目标进行探测等. 这种调制 VLF 信号已被地面台站 [21] 和卫星 [22] 记录到. 定量确定调制 VLF 信号的辐射效率和调制 VLF 电磁波在大气层、地表及卫星高度的电磁场, 需要建立 VLF 电磁波在大气层–电离层中的传播模型. Wang 等 [48] 建立了全波解数值模型, 并计算了调制 VLF 电磁波在低电离层及中性大气层的波场, 计算结果与 HARRP 实验结果相吻合. Wang 等通过模拟还发现, 随着纬度降低, 电波的衰减越来越大, 接收到的场越来越小, 同时电磁波的频率越低, 损耗越大. 因此, 低纬地区低频信号透射出低电离层的能力十分有限. Yagitani 等 [30] 利用全波解方法计算了极区电离层加热调制的 VLF 电磁波上行和下行的辐射效率, 计算结果显示上行波辐射效率为 2.5×10^{-6}, 下行波辐射效率为 3×10^{-8}.

4.2 VLF 电磁波传播计算模型在地震和闪电中的应用

Kumar 等 [49] 对全球闪电定位网络的数据进行分析, 发现闪电对 VLF 人工源信号有影响, 白天的影响为 0.2~0.5 dB, 夜晚的影响为 0.2~1.5 dB. 该结果仍需理论模型验证.

Parrot 等 [50] 对 DEMETER 卫星电场频谱进行分析, 发现在中低纬地区记录了多次 V 型条带. 这种被称为 VLF 飞碟的电场频谱图也曾被 Smith[51] 和 James[52] 利用低轨卫星观测到, 以往对此现象的解释是高能粒子沉降引起的 Cerenkov 辐射, 但这种高能粒子沉降现象基本只能发生在极区或亚极区. Parrot 认为该现象是雷暴电场产生的 VLF 电磁波渗透到卫星高度引起的, 并利用 Lehtinen 模型对此现象进行模拟, 模拟结果完美重现了观测到的不同形状的 V 型条带.

作为短期地震预报方法之一, 研究地震前的电磁现象受到广泛关注. 短期地震预报方法中与 VLF 电磁波相关的方法包括 VLF/LF 等电磁波直接渗透到电离层以及利用 VLF 发射站发射的电磁波检测震中上方大气和电离层的异常 [53]. Hayakawa 等 [53] 发现 Kobe 地震使穿过地震上空路径的 VLF 电磁波相位发生改变, 特别是在日出和日落的时段, 其认为可能的原因是地震使 VLF 的发射高度下降了 0.7 km. Molchanov 等 [54] 研究了 10 个 6 级以上地震, 认为 Hayakawa 发现的反射高度变化的现象仅存在于震前几天, 而且只有发生在地壳的地震才会产生这种现象. Molchanov 认为产生这种现象的原因可能是地震激发了长周期的重力波.

Zhao 等 [55] 利用全波解方法计算了不同纬度 2 次地震在卫星高度上的电磁场响应, 发现因地震引起的电离层电子密度和离子浓度的变化会影响传播到卫星高度的电磁场, 并且低纬电离层变化对卫星高度电场的影响更为显著, 渗透到卫星高度的电磁场能量衰减随频率升高而变大.

4.3　VLF 电磁波电离层传播特征研究

Shao 等 [45] 对哨声模转化为准静电场模的计算结果表明, 渗透进低电离层的 VLF 波衰减不是线性的. Shao 等认为产生该现象的主要原因是 VLF 波穿透电离层时对电离层加热引起的电子密度水平不均匀. Cohen 等 [41] 对不同功率 VLF 发射站的计算结果表明, VLF 波在电离层的衰减是线性的, 电子密度的水平不均匀性不是 VLF 波在低电离层中衰减的主要因素.

Cohen 等 [41] 统计了 DEMETER 卫星记录的 10 个地面 VLF 发射站辐射功率. 为去掉电子密度的时变特征, Cohen 等统计了 6 年白天和夜晚数据的平均结果, 并依据发射站的发射功率进行全波计算. 与 Lehtinen 和 Inan[40] 使用全波法仅计算到低电离层不同, Cohen 等直接计算卫星高度的电磁场, 并与观测结果进行了误差分析. Cohen 等的计算结果显示, 相对于碰撞频率, 电子密度对计算结果的影响更为重要, 电子密度的水平不均匀性对计算结果的影响小于 6 dB. 此外, Cohen 等还发现 NWC 辐射源在磁共轭区附近存在两块辐射中心, 且磁共轭点上的辐射较小. Cohen 等认为有三种可能的原因: 一是电离层传播路径中的不均匀性导致波法向改变; 二是磁层在传播路径上的不均匀性; 三是自然或者加热的原因形成了导管传播. 此结论与 Xu[56] 的结论一致, 即低纬非导管哨声模也基本沿磁力线传播.

Zhao 等 [57] 对 NWC 通信台在电离层中激发的电磁响应时变特征进行了统计分析, 结果表明: 日变化显著, 夜间电场强度增强可达 40 dB, 磁场变化增强可达约 15 dB; 季节变化不显著; 年变化主要受太阳活动的影响, 太阳活动越强, 电磁响应越小. Zhao 等利用全波解方法进行模拟计算, 模拟结果与数据分析结果一致, 通过模拟还发现电磁响应随时间变化的特点可能主要受 250 km 以下电离层电子密度分布特征影响.

Yagitani 等 [30] 利用全波解方法计算了高电离层及低电离层 VLF 辐射源的波场, 计算结果显示辐射波演变为哨声模沿磁力线传播, 且电磁波能量在 300 km 以上几乎不衰减. Graf 等 [58] 利用全波模型 [31,40] 计算了地面电导率、入射角及电子密度变化对渗透到磁层高度的 VLF 波衰减的影响. 其计算结果表明, 电子密度变化在计算中的作用更为重要, 磁纬 30°−60° Helliwell 经典吸收曲线的误差在 10 dB 以内, 磁纬 20° 以下的误差可达到 100 dB.

5　结语

对 VLF 波在电离层中的传播研究进行了综述, 介绍了求解 VLF 电磁波渗透进电离层计算方法的发展, 分析了全波方法的验证及其在求解电磁波波场时引起误差的因素, 总结了全波法在 VLF 电磁波在电离层传播中的实际应用. 采用完善的 VLF 渗透电离层的波场计算模型, 可以在确定闪电、地震等自然现象辐射源的位置以及闪电对电离层槽区的影响等方面发挥更大作用.

参考文献

[1] CHRISSAN D A, FRASER-SMITH A C. Seasonal variations of globally measured ELF/VLF radio noise [J]. *Radio Sci.*, 1996, **31**(5): 1141-1152

[2] UMAN M A, HORNSTEIN J. The lightening discharge [J]. *Phys. Today*, 1989, **42**(5): 75-76

[3] WATT T M. Obtaining local values of plasma scale height with the Alouette 1 topside sounder [J]. *J. Geophys. Res.*, 1967, **72**(15): 3843-3853

[4] SWANSON E R, KUGEL C P. VLF timing: conventional and modern techniques including omega [J]. *Proc. IEEE*, 1972, **60**(5): 540-551

[5] DAVIES K. Ionospheric Radio [M]. London: The Institution of Electrical Engineering and Technology, 1990

[6] STOREY L R O. An investigation of whistling atmospherics [J]. *Phil. Trans. Roy. Soc. A*: *Math. Phys. Eng. Sci.*, 1953, **246**(908): 113-141

[7] HELLIWELL R A. Whistlers and Related Ionospheric Phenomena [M]. California: Stanford University Press, 1965

[8] XU Jisheng, MO Qixu. Transmission characteristics of low latitude whistlers through the lower ionosphere — full wave solution [J]. *Acta Geophys. Sin.*, 1989, **32**(3): 256-261 (徐继生, 莫启绪. 低纬哨声通过低电离层传播的透射特征—全波解 [J]. 地球物理学报, 1989, **32**(3): 256-261)

[9] NAGANO I, MAMBO M, HUTATSUISHI G. Numerical calculation of electromagnetic waves in an anisotropic multilayered medium [J]. *Radio Sci.*, 1975, **10**(6): 611-617

[10] HAYAKAWA M, TANAKA Y. On the propagation of low-latitude whistlers [J]. *Rev. Geophys.*, 1978, **16**(1): 111-123

[11] XU Jisheng, BAO Zongti, LIANG Baixian. A method of 3-D ray tracing of whistler-mode waves using the IGRF model [J]. *Acta Geophys. Sin.*, 1985, **28**(5): 443-451 (徐继生, 保宗悌, 梁百先. 国际地磁参考场中哨声模波的三维射线跟踪算法 [J]. 地球物理学报, 1985, **28**(5): 443-451)

[12] XU Jisheng, TIAN Mao, MA Shuying, *et al*. Multi-stationed wide band direction finding measurements for whistlers at geomagnetic latitudes below 20° in China and some early results [J]. *Acta Geophys. Sin.*, 1989, **32**(2): 125-134 (徐继生, 田茂, 马淑英, 等. 磁纬 20° 以下地区哨声多台宽带定向观测及其初步结果 [J]. 地球物理学报, 1989, **32**(2): 125-134)

[13] ONDOH T, KOTAKI M, MURAKAMI T, *et al*. Propagation characteristics of low-latitude whistlers [J]. *J. Geophys. Res.*, 1979, **84**(A5): 2097-2104

[14] WU Xiangyang, BAO Zongti, NAGANO I, *et al*. Numerical simulation of the whistler penetration process through the lower ionosphere at very-low-latitude [J]. *Acta Geophys. Sin.*, 1996, **39**(5): 588-600 (吴向阳, 保宗悌, 长野勇, 等. 甚低纬哨声低电离层透射过程的数值模拟 [J]. 地球物理学报, 1996, **39**(5): 588-600)

[15] KENNEL C F, PETSCHEK H E. Limit on stably trapped particle fluxes [J]. *J. Geophys. Res.*, 1966, **71**(1): 1-28

[16] LYONS L R, THORNE R M, KENNEL C F. Pitch-angle diffusion of radiation belt electrons within the plasmasphere [J]. *J. Geophys. Res.*, 1972, **77**: 3455-3474

[17] IMHOF W L, REAGAN J B, VOSS H D, *et al*. The modulated precipitation of radiation belt electrons by controlled signals from VLF transmitters [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 1983, **10**(8): 615-618

[18] INAN U S, CARPENTER D L. Lightning-induced electron precipitation events observed at L ~2.4 as phase and amplitude perturbations on subionospheric VLF signals [J]. *J. Geophys. Res.*, 1987, **92**(A4): 3293-3303

[19] VAMPOLA A L. VLF transmission induced slot electron precipitation [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 1977, **4**(12): 569-572

[20] ABEL B, THORNE R M. Electron scattering loss in Earth's inner magnetosphere: 2. Sensitivity to model parameters [J]. *J. Geophys. Res.*, 1998, **103**(A2): 2397-2408

[21] BARR R, STUBBE P. ELF radiation from the Tromsø "super heater" facility [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 1991, **18**(6): 1035-1038

[22] PLATINO M, INAN U S, BELL T F, *et al*. DEMETER observations of ELF waves injected with the HAARP HF transmitter [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2006, **33**(16): L16101

[23] WANG Feng, ZHAO Zhengyu, ZHANG Yuannong. Numerical modeling of ionospheric current artificial modulation at low latitude [J]. *Chin. J. Geophys.*, 2009, **52**(4): 887-894 (汪枫, 赵正予, 张援农. 低纬地区电离层电流的人工调制数值模拟 [J]. 地球物理学报, 2009, **52**(4): 887-894)

[24] INAN U S, CHANG H C, HELLIWELL R A. Electron precipitation zones around major ground-based VLF signal sources [J]. *J. Geophys. Res.*, 1984, **89**(A5): 2891-2906

[25] ABEL B, THORNE R M. Electron scattering loss in Earth's inner magnetosphere: 1. Dominant physical processes [J]. *J. Geophys. Res.*, 1998, **103**(A2): 2385-2396

[26] BORTNIK J, INAN U S, BELL T F. L dependence of energetic electron precipitation driven by magnetospherically reflecting whistler waves [J]. *J. Geophys. Res.*, 2002, **107**(A8): SMP 1-1-SMP 1-13. DOI: 10.1029/2001JA000303

[27] STARKS M J, QUINN R A, GINET G P, *et al*. Illumination of the plasmasphere by terrestrial very low frequency transmitters: model validation [J]. *J. Geophys. Res.*, 2008, **113**: A09320. DOI: 10.1029/2008JA013112

[28] GOLDEN D I, SPASOJEVIC M, FOUST F R, *et al*. Role of the plasmapause in dictating the ground accessibility of ELF/VLF chorus [J]. *J. Geophys. Res.*, 2010, **115**: A11211. DOI: 10.1029/2010JA015955

[29] CRARY J H. The Effect of the Earth-Ionosphere Waveguide on Whistlers [R]. Stanford, California: Stanford Electron Laboratory, Stanford University, 1961

[30] YAGITANI S, NAGANO I, MIYAMURA K, *et al*. Full wave calculation of ELF/VLF propagation from a dipole source located in the lower ionosphere [J]. *Radio Sci.*, 1994, **29**(1): 39-54

[31] LEHTINEN N G, INAN U S. Radiation of ELF/VLF waves by harmonically varying currents into a stratified ionosphere with application to radiation by a modulated electrojet [J]. *J. Geophys. Res.*, 2008, **113**: A06301

[32] WAIT J R, CULLEN A L, FOCK V A, *et al*. Electromagnetic Waves in Stratified Media [M]. Oxford: Pergamon Press, 1970

[33] BUDDEN K G. The Propagation of Radio Waves: The Theory of Radio Waves of Low Power in the Ionosphere and Magnetosphere [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1985

[34] NYGRÉN T. A method of full wave analysis with improved stability [J]. *Planet. Space Sci.*, 1982, **30**(4): 427-430

[35] CHO M, RYCROFT M J. Computer simulation of the electric field structure and optical emission from cloud-top to the ionosphere [J]. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.*, 1998, **60**(7/8/9): 871-888

[36] CUMMER S A. Modeling electromagnetic propagation in the Earth-ionosphere waveguide [J]. *IEEE Trans. Antenn. Propag.*, 2000, **48**(9): 1420-1429

[37] HU W, CUMMER S A. An FDTD model for low and high altitude lightning-generated EM fields [J]. *IEEE Trans. Antenn. Propag.*, 2006, **54**(5): 1513-1522

[38] SIMPSON J J, TAFLOVE A. Three-dimensional FDTD modeling of impulsive ELF propagation about the earth-sphere [J]. *IEEE Trans. Antenn. Propag.*, 2004, **52**(2): 443-451

[39] YANG Y, HU S M, CHEN R S. A combination of FDTD and least-squares support vector machines for analysis of microwave integrated circuits [J]. *Microw. Opt. Technol. Lett.*, 2005, **44**(3): 296-299

[40] LEHTINEN N G, INAN U S. Full-wave modeling of transionospheric propagation of VLF waves [J]. *Geophys. Res.*

Lett., 2009, **36**: L03104. DOI: 10.1029/2008GL036535

[41] COHEN M B, LEHTINEN N G, INAN U S. Models of ionospheric VLF absorption of powerful ground based transmitters [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2012, **39**: L24101. DOI: 10.1029/2012GL054437

[42] NAGANO I, ROSEN P A, YAGITANI S, *et al.* Full wave analysis of the Australian Omega signal observed by the Akebono satellite [J]. *IEICE Trans. Commun.*, 1993, **E76-B**(12): 1571-1578

[43] TAO X, BORTNIK J, FRIEDRICH M. Variance of transionospheric VLF wave power absorption [J]. *J. Geophys. Res.*, 2010, **115**: A07303. DOI: 10.1029/2009JA015115

[44] FOUST F R, INAN U S, BELL T, *et al.* Quasi-electrostatic whistler mode wave excitation by linear scattering of EM whistler mode waves from magnetic field-aligned density irregularities [J]. *J. Geophys. Res.*, 2010, **115**: A11310. DOI: 10.1029/2010JA015850

[45] SHAO X, ELIASSON B, SHARMA A S, *et al.* Attenuation of whistler waves through conversion to lower hybrid waves in the low-altitude ionosphere [J]. *J. Geophys. Res.*, 2012, **117**: A04311. DOI: 10.1029/2011JA017339

[46] BELL T F, INAN U S, PIDDYACHIY D, *et al.* Effects of plasma density irregularities on the pitch angle scattering of radiation belt electrons by signals from ground based VLF transmitters [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2008, **35**: L19103. DOI: 10.1029/2008GL034834

[47] COHEN M B, INAN U S. Terrestrial VLF transmitter injection into the magnetosphere [J]. *J. Geophys. Res.*, 2012, **117**: A08310. DOI: 10.1029/2012JA017992

[48] WANG Feng, ZHAO Zhengyu, CHANG Shanshan, *et al.* Radiation of ELF waves by ionospheric artificial modulation into a stratified ionosphere [J]. *Chin. J. Geophys.*, 2012, **55**(7): 2167-2176 (汪枫, 赵正予, 常珊珊, 等. 电离层人工调制在水平分层电离层中所激发的 ELF 波辐射 [J]. 地球物理学报, 2012, **55**(7): 2167-2176)

[49] KUMAR A, KUMAR S, HAYAKAWA M, *et al.* Subionospheric VLF perturbations observed at low latitude associated with earthquake from Indonesia region [J]. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.*, 2013, **102**(3): 71-80

[50] PARROT M, INAN U S, LEHTINEN N G. V-shaped VLF streaks recorded on DEMETER above powerful thunderstorms [J]. *J. Geophys. Res.*, 2008, **113**: A10310. DOI: 10.1029/2008JA013336

[51] SMITH R L. VLF observations of auroral beams as sources of a class of emissions [J]. *Nature*, 1969, **224**(5217): 351-352

[52] JAMES H G. VLF saucers [J]. *J. Geophys. Res.*, 1976, **81**(4): 501-514

[53] HAYAKAWA M, MOLCHANOV O A, ONDOH T, *et al.* Anomalies in the sub-ionospheric VLF signals for the 1995 Hyogo-ken Nanbu earthquake [J]. *J. Phys. Earth*, 1996, **44**(4): 413-418

[54] MOLCHANOV O A, HAYAKAWA M. Subionospheric VLF signal perturbations possibly related to earthquakes [J]. *J. Geophys. Res.*, 1998, **103**(A8): 17489-17504

[55] ZHAO Shufan, ZHANG Xuemin, ZHAO Zhengyu, *et al.* The numerical simulation on ionospheric perturbations in electric field before large earthquakes [J]. *Ann. Geophys.*, 2014, **32**(12): 1487-1493

[56] XU Wenyao. Effects of the ionization density distribution on non-ducted whistler wave propagation at middle and low latitudes [J]. *Acta Geophys. Sin.*, 1989, **32**(3): 245-255 (徐文耀. 电离密度分布对中低纬非导管哨声波传播的影响 [J]. 地球物理学报, 1989, **32**(3): 245-255)

[57] ZHAO Shufan, ZHANG Xuemin, ZHAO Zhengyu, *et al.* Temporal variations of electromagnetic responses in the ionosphere excited by the NWC communication station [J]. *Chin. J. Geophys.*, 2015, **58**(7): 2263-2273 (赵庶凡, 张学民, 赵正予, 等. NWC 通信台在电离层中激发电磁响应的时变特征 [J]. 地球物理学报, 2015, **58**(7): 2263-2273)

[58] GRAF K L, LEHTINEN N G, SPASOJEVIC M, *et al.* Analysis of experimentally validated trans-ionospheric attenuation estimates of VLF signals [J]. *J. Geophys. Res.*, 2013, **118**(5): 2708-2720