

人工沿场不均匀体对短波垂直探测影响的理论分析

吕立斌 李清亮 郝书吉 吴振森

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

Lü Li-Bin Li Qing-Liang Hao Shu-Ji Wu Zhen-Sen

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, **66**, 059401 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.059401

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.059401>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2017/V66/I5>

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 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.019401>

低纬电离层人工调制所激发的 ELF 波射线追踪

Raytracing of extremely low frequency waves radiated from ionospheric artificial modulation at low latitude

物理学报.2012, 61(19): 199401 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.199401>

人工沿场不均匀体对短波垂直探测影响的理论分析*

吕立斌^{1)†} 李清亮²⁾ 郝书吉²⁾ 吴振森^{1)‡}

1) (西安电子科技大学物理与光电工程学院, 西安 710071)

2) (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)

(2016年8月31日收到; 2016年11月14日收到修改稿)

从人工沿场不均匀体的产生机制出发, 分析其对无线电波的散射特性, 基于射线追踪技术, 建立了短波垂直探测波经人工沿场不均匀体散射的传播模型, 理论分析了不同纬度人工沿场不均匀体对垂直探测波传播路径的影响. 结果表明: 人工沿场不均匀体所导致的垂直探测电离图人工扩展描述随地理纬度升高和地磁倾角增大而变短, 解释了高纬度地区电离层加热不能有效观测人工扩展描述的原因. 最后对中低纬度地区存在人工沿场不均匀体时可能产生的人工扩展描述现象进行了预测评估, 并分析了其重要应用方向.

关键词: 电离层加热, 人工沿场不均匀体, 短波垂直探测, 人工扩展描述

PACS: 94.20.Vv, 94.30.Tz

DOI: 10.7498/aps.66.059401

1 引言

地基大功率高频无线电波照射电离层, 会改变局部电离层的电子密度分布结构, 在F层加热区域, 由于加热波能量的注入, 在电离层对流和扩散的作用下, 将增强电子密度的不均匀性, 生成人工电离层不均匀体, 从而对无线电波的传播路径产生重要影响. 国外学者对此开展了一系列的理论和实验研究^[1-8], 其中把短波垂直探测作为人工不均匀体探测的最直观手段, 并利用其进行了大量实验观测和探测结果研究分析. 1970年, Utlaut等^[1,2]利用电离层垂测仪在Platteville加热站附近首次观测到了人工扩展F现象, 即在加热开启30 s后, 垂测电离图中F层O波(寻常波)和X波(非寻常波)描述发生扩展(称作人工扩展F); Georges等^[3]认为人工扩展F和人工不均匀体的产生有关. 针对这一推测, 在Platteville站的加热试验中首次观测到并确

认了来自人工不均匀体的雷达回波^[4], 并进一步研究了人工不均匀体的物理模型和散射特性^[5]. Tsai等^[6]于1992年在HIPAS站的加热试验中, 利用短波垂直探测研究了人工不均匀体的空间位置及其强度的探测方法. 随着HAARP站大规模加热试验的开展, 在垂测电离图上观测到了明显的高度扩展^[7], 并通过分析人工扩展F的形式及其随时间的演化规律, 研究了参量不稳定性的激发阈值及产生机理^[8].

近年来, 我国学者开始对电离层加热理论进行关注, 开展了相关理论和数值模拟研究^[9-14]. 谢红和肖佐^[11]对中低纬度地区电离层F区中的Rayleigh-Taylor不稳定性进行了研究, 认为可能成为导致中纬人工扩展F发展的一种机制; 黄朝松和李钧^[12]研究了中纬电离层F区大尺度不均匀体的基本性质; 周磊和唐昌建^[13]对不均匀等离子体中电磁波与Langmuir波的相互作用进行了研究; 邓峰等^[14]对中低纬电离层加热大尺度场向不均匀体

* 电波环境特性及模化技术重点实验室开放课题专项资金(批准号: 201600017)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: libin_lv@163.com

‡ 通信作者. E-mail: wuzhs@mail.xidian.edu.cn

进行了二维数值模拟. 此外, 在对电离层及自然不均匀体的短波垂直探测方面, 国内学者也进行了深入的理论和实验研究, 积累了丰富的经验 [15-17].

大量理论和实验研究结果 [18-21] 表明, 基于电离层加热产生的人工不均匀体是沿地磁场方向排列的, 因此也被称为人工沿场不均匀体 (artificial field-aligned irregularities, AFAI). 不同纬度的地磁倾角不同, 加热产生的人工不均匀体的沿场方向不同, 其对垂直探测波产生的影响也将不同. 国外加热实验大多集中在高纬地区, 地磁倾角大, 目前基于电离层垂测仪观测到的人工扩展 F 集中表现为距离扩展 (电离图描述在虚高方向扩散) 和频率扩展 (电离图描述在频率方向扩散). 若将这些实验现象“移植”到中低纬度地区, 情况如何? 目前未见公开报道.

本文尝试从 AFAI 的产生机制出发, 分析其对无线电波的散射特性. 利用射线追踪技术, 建立垂直探测波经 AFAI 散射的传播模型, 进而仿真垂直探测波经 AFAI 的传播路径, 通过分析不同纬度地区 AFAI 对垂直探测波传播路径的影响, 对国外人工扩展描述的观测结果进行解释. 最后, 对中低纬度地区开展电离层加热可能产生的人工扩展描述现象进行预测评估, 并分析 AFAI 的重要应用方向.

2 物理模型

2.1 AFAI 产生机制

电动力学理论认为, 电离层中的扩散和热传导是影响电子密度分布的主要因素. 扩散系数可以用两个相互关联的参量描述: 平均自由程 L (两次碰撞之间粒子平均运动的距离定义为平均自由程, $L = (3k_B T_e / m_e)^{1/2} / v$, 其中 k_B 为玻尔兹曼常数, T_e 为电子温度, m_e 为电子质量) 和碰撞频率 ν , 且扩散系数正比于 $L^2 v$. 在平行于磁场方向, 平均自由程正比于电子 (或离子) 的热速率和碰撞频率的倒数, 即 $L \propto (k_B T_e / m_e)^{1/2} v^{-1}$, 这意味着扩散速率 $D_{//}$ 正比于 $k_B T_e / (m_e v)$. 在垂直于磁场方向, 电子的平均自由程被磁场束缚, 它正比于电子的磁旋半径 $r_e = (k_B T_e / m_e)^{1/2} \omega^{-1}$ (其中 ω_e 为电子的磁选频率), 将其代入平均自由程得到 $D_{\perp} = (k_B T_e v) / (m_e \omega_e^2) \simeq r_e^2 v$. 可以看出, 垂直于磁场的扩散系数正比于 v . 因此, 垂直于磁场和平

行于磁场的扩散系数之比为: $D_{\perp} / D_{//} \propto v^2 / \omega_e^2$.

热传导可以用方程 $Q = -\kappa \nabla k_B T$ 来描述, 其中 Q 是热流, κ 是热导率, $\nabla k_B T$ 是电子温度的梯度. Braginskii [22] 给出了平行于磁场的电子热导率 $\kappa_{//} = 3.16 N_e k_B T_e / (m_e v)$ 和垂直于磁场的电子热导率 $\kappa_{\perp} = 4.66 N_e k_B T_e v / (m_e \omega_e^2)$ (其中 N_e 为电子密度). 两者之比有如下表达式: $\kappa_{\perp} / \kappa_{//} \propto v^2 / \omega_e^2$.

图 1 给出了中纬度地区 (30°N, 120°E) 白天 (当地时间上午 10 时) 的 F 层电子碰撞频率和磁旋频率比值, 可以看出, 在电离层 F 区, $v^2 / \omega_e^2 \ll 1$. 因此, 电子在平行于磁场方向上的扩散和热导率远远大于在垂直于磁场方向, 这也意味着, 无论什么样的初始电子密度扰动或者温度扰动, 都快速倾向于转换为沿地磁场方向剧烈拉伸的不均匀体结构, 即 AFAI, 如图 2 所示.

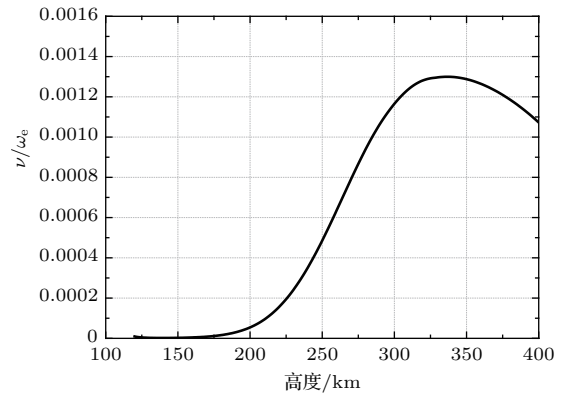


图 1 电子碰撞频率和磁旋频率比值

Fig. 1. Ratio of the electron collision frequency to the gyrofrequency.

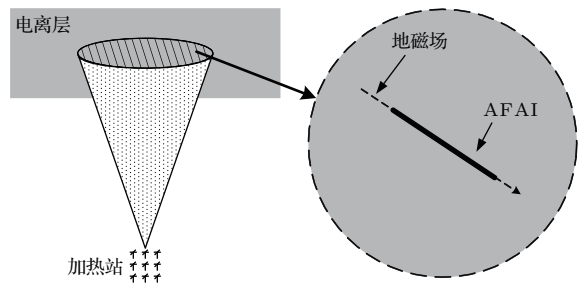


图 2 AFAI 物理模型

Fig. 2. Physical model of AFAI.

2.2 垂直探测波经 AFAI 散射的传播模型

理论和试验研究 [4,5,18-21] 表明, 照射到 AFAI 上的无线电波会发生依赖于地磁场方向的散射 (即沿场散射, field-aligned scattering, FAS), 特别地,

当无线电波垂直于 AFAI 入射时, 会发生很强的后向散射 [5]. 也就是说, AFAI 的存在会使无线电波的传播路径发生变化, 甚至是沿原路径返回.

无线电波在电离层中传播时, 由于电子密度的变化和地磁场的影响, 使折射率发生变化, 进而导致传播方向的偏移. 基于此, 本文采用射线追踪方法 [23], 通过计算无线电波在电离层中的折射率变化来追踪射线的传播轨迹. 该方法中包含了由六个微分方程组成的方程组:

$$\frac{dr}{dP'} = -\frac{1}{c} \frac{\partial H / \partial k_r}{\partial H / \partial \omega}, \quad (1)$$

$$\frac{d\theta}{dP'} = -\frac{1}{rc} \frac{\partial H / \partial k_\theta}{\partial H / \partial \omega}, \quad (2)$$

$$\frac{d\varphi}{dP'} = -\frac{1}{rc \sin \theta} \frac{\partial H / \partial k_\varphi}{\partial H / \partial \omega}, \quad (3)$$

$$\frac{dk_r}{dP'} = \frac{1}{c} \frac{\partial H / \partial r}{\partial H / \partial \omega} + k_\theta \frac{d\theta}{dP'} + k_\varphi \sin \theta \frac{d\varphi}{dP'}, \quad (4)$$

$$\frac{dk_\theta}{dP'} = \frac{1}{r} \left(\frac{1}{c} \frac{\partial H / \partial \theta}{\partial H / \partial \omega} - k_\theta \frac{dr}{dP'} + k_\varphi r \cos \theta \frac{d\varphi}{dP'} \right), \quad (5)$$

$$\frac{dk_\varphi}{dP'} = \frac{1}{r \sin \theta} \left(\frac{1}{c} \frac{\partial H / \partial \varphi}{\partial H / \partial \omega} - k_\varphi \frac{dr}{dP'} - k_\varphi \cos \theta \frac{d\theta}{dP'} \right), \quad (6)$$

其中 H 为哈密顿算符,

$$H = \text{Re} \left\{ \frac{1}{2} \left[\frac{c^2}{\omega^2} (k_r^2 + k_\theta^2 + k_\varphi^2) - n^2 \right] \right\},$$

n 是折射率, Re 为对复变量求实部. P' 为群路径, r, θ, φ 为射线路径上点的球坐标, k_r, k_θ, k_φ 为传播矢量(在自由空间中有 $k_r^2 + k_\theta^2 + k_\varphi^2 = \omega^2/c^2 = k^2$, $\omega = 2\pi f$ 为波的角频率, c 是电磁波在自由空间中的传播速度, \mathbf{k} 为波矢量, f 为电磁波频率)的分量.

在球坐标系中, 定义射线参量(位置参数和传播矢量参数)集:

$$\begin{cases} r = r_e + h, & \theta = 90 - l_a, & \varphi = l_o, \\ k_r = \frac{\omega}{c} n \sin \psi_e, \\ k_\theta = -\frac{\omega}{c} n \cos \psi_e \cos \psi_a, \\ k_\varphi = \frac{\omega}{c} n \cos \psi_e \sin \psi_a, \end{cases} \quad (7)$$

其中, r_e 为地球半径, h 为射线距离地面高度, l_a 和 l_o 分别为纬度和经度; 射线仰角和方位角由 ψ_e 和 ψ_a 表示. 利用初始位置和初始传播矢量, 结合背

景电离层参数, 即可实现对任意射线的传播路径计算.

在利用短波垂直探测手段研究电离层加热产生的 AFAI 过程中, 根据电离层电波传播理论, 大部分探测波将在反射高度 h_r (等离子体频率和探测波频率相等的高度) 上发生反射, 其中一部分将沿原路径返回, 形成通常情况下的电离图描述. 与此同时, 频率等于或高于加热频率 ($f_{\text{diag}} \geq f_{\text{heat}}$) 的探测波能够到达 AFAI, 根据沿场散射理论, 若垂直入射 AFAI 将发生强烈的后向散射, 沿原路径返回并被地面接收, 由于传播路径长度的差异, 将在电离图中形成人工扩展描述. 存在 AFAI 时的垂直探测波传播路径如图 3 所示.

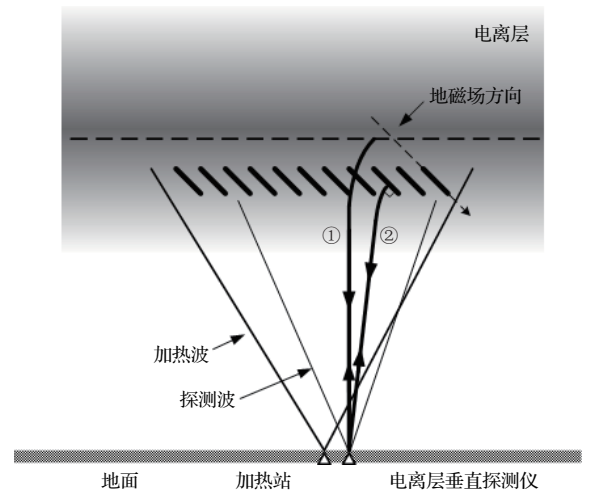


图 3 存在 AFAI 时的探测波传播机制 ① 在 h_r 发生反射, 其中垂直向上的探测波沿原路径返回; ② $f_{\text{diag}} \geq f_{\text{heat}}$ 时, 在 AFAI 发生沿场散射, 其中垂直地磁场方向入射时发生后向散射, 沿原路径返回

Fig. 3. Propagation mechanism of sounding wave with AFAI: ① Reflect at h_r , vertical part will turn back; ② FAS occurs when $f_{\text{diag}} \geq f_{\text{heat}}$, the part which perpendicular to the geomagnetic will turn back.

基于射线追踪技术仿真电离层加热过程中存在 AFAI 条件下的垂测电离图的基本方法是, 根据垂测电离图数据反演背景电子密度剖面, 在此基础上利用射线追踪技术计算各个频率探测波的射线路径, 最终获得频率-虚高描述, 即仿真电离图. 根据对存在 AFAI 时的垂直探测波传播路径的分析, 仿真计算分为两部分.

1) 正常描述仿真. 射线垂直向上指向, $\psi_e = 90^\circ$, 初始参数集为:

$$\begin{cases} r = r_e, & \theta = 90 - l_{a0}, & \varphi = l_{o0}, \\ k_r = \frac{\omega}{c}, & k_\theta = 0, & k_\varphi = 0. \end{cases} \quad (8)$$

2) 人工扩展描述仿真. 根据图3所示原理, 为了仿真探测波在AFAI上后向散射的射线路径, 首先根据电离层加热理论, 近似将等离子体频率和加热频率相等时所对应的电离层高度 h_{uh} , 作为AFAI所在高度; 然后采用试射法在垂直探测波束中寻找能够垂直入射AFAI的射线, 计算不同仰角的射线路径, 满足条件: A) 射线能够到达 h_{uh} , B) 到达 h_{uh} 时和地磁场的夹角为 90° 时, 可发生后向散射. 因此, 射线的初始传播矢量

$$\begin{cases} r = r_e, \quad \theta = 90 - l_{a0}, \quad \varphi = l_{o0}, \\ k_r = \frac{\omega}{c} \sin \psi_e, \\ k_\theta = -\frac{\omega}{c} \cos \psi_e \cos \psi_a, \\ k_\varphi = \frac{\omega}{c} \cos \psi_e \sin \psi_a, \\ 0 < \psi_e < 90, \quad \psi_a = 0. \end{cases} \quad (9)$$

此外, 射线有约束条件

$$r \geq r_e + h_{uh} \text{ 以及 } \begin{cases} k_r = -k_r, \\ k_\theta = -k_\theta, \\ k_\varphi = -k_\varphi. \end{cases} \quad (\text{当 } r = r_e + h_{uh} \text{ 时}) \quad (10)$$

至此, 在(1)—(7)式的基础上, 将人工沿场不均匀体存在时的(8)—(10)式融合进来, 即可实现存在AFAI条件下的垂测电离图的仿真.

3 理论分析

3.1 模型验证

为验证垂直探测波经AFAI散射的传播模型, 首先给出中低纬度地区 (30°N , 120°E) 白天(当地时间2015年6月28日10时)典型的垂测电离图, 如图4所示, 其中红色描述对应O波, 蓝色描述对应X波. 图5为依据电离图反演得到的背景电子密度剖面. 图6给出了利用模型对垂测电离图的仿真结果, 和实测结果一致.

3.2 AFAI存在时电离图仿真

利用模型以及3.1节中的参数, 对存在AFAI条件下的垂测电离图进行仿真, 结果如图7所示. 可以看出, 除正常描述外, 还形成了人工扩展描述,

并且人工扩展描述具有如下特点: 1) 从加热频率附近开始向更高频率扩展; 2) 随着信号频率的增大, 虚高(射线传播路径长度) 逐渐减小.

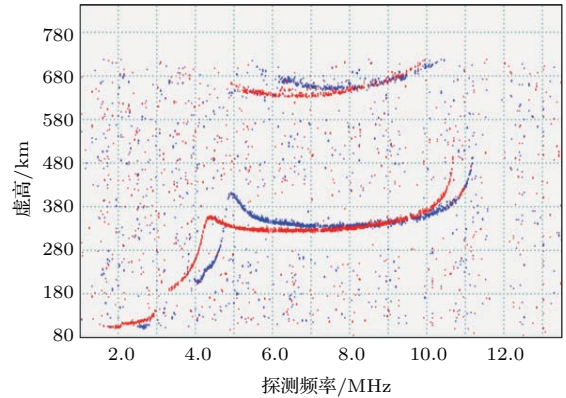


图4 垂测电离图

Fig. 4. Ionogram for HF vertical sounding.

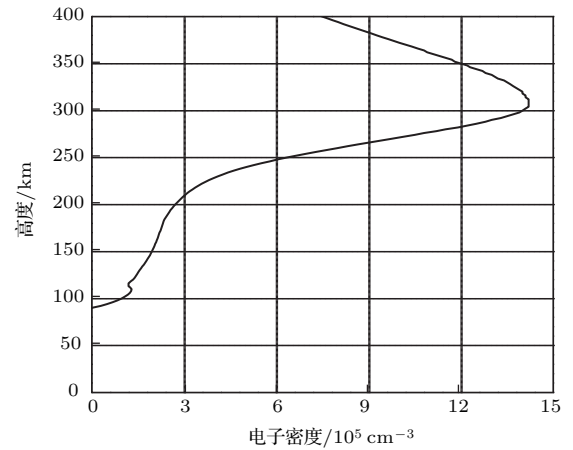


图5 根据电离图得到的电子密度剖面

Fig. 5. Electron density profile obtained from ionogram.

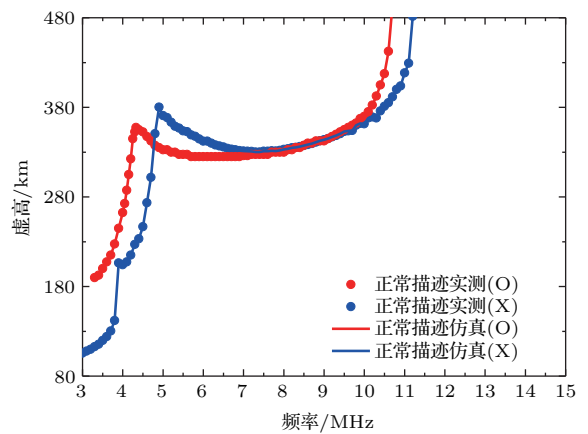


图6 垂测电离图仿真(无AFAI)

Fig. 6. Ionogram simulation (without AFAI).

根据垂直探测波经 AFAI 散射的传播特性, 分析认为: 1) 当探测波频率超过加热频率时, 更容易到达不均匀体高度并满足后向散射条件, 因此 AFAI 导致的人工扩展描述从加热频率附近开始向更高频率扩展; 2) 探测波信号频率越大, 电离层中的折射效应越小, 满足后向散射条件的射线路径越短, 导致电离图中的虚高越小.

根据沿场散射理论, 散射波的传播具有很强的方向性, 并且和地磁场方向密切相关. 利用模型对不同纬度地区存在 AFAI 时的垂测电离图进行仿真, 图 8 是典型的仿真结果. 图 9 给出了人工扩展

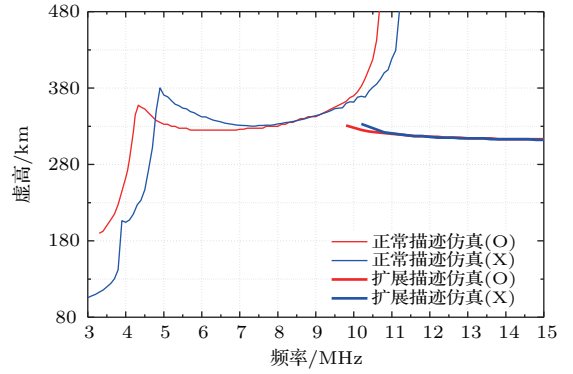


图 7 垂测电离图仿真(存在 AFAI)
Fig. 7. Ionogram simulation(with AFAI).

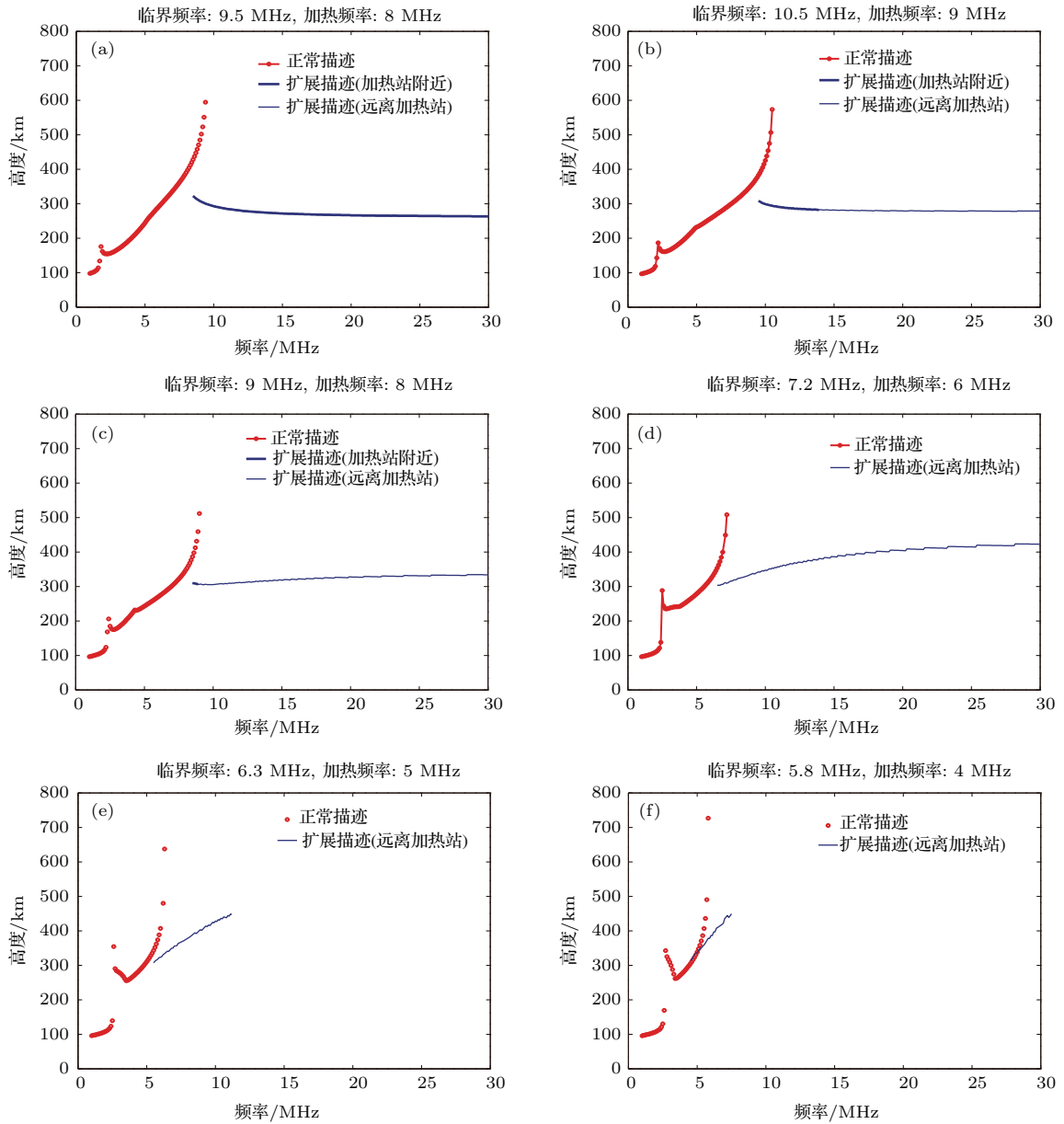


图 8 AFAI 存在时不同地区电离图仿真 (a) 10°N, 120°E; (b) 20°N, 120°E; (c) 30°N, 120°E; (d) 40°N, 120°E; (e) 50°N, 120°E; (f) 60°N, 120°E

Fig. 8. Ionogram simulation with AFAI for different location: (a) 10°N, 120°E; (b) 20°N, 120°E; (c) 30°N, 120°E; (d) 40°N, 120°E; (e) 50°N, 120°E; (f) 60°N, 120°E.

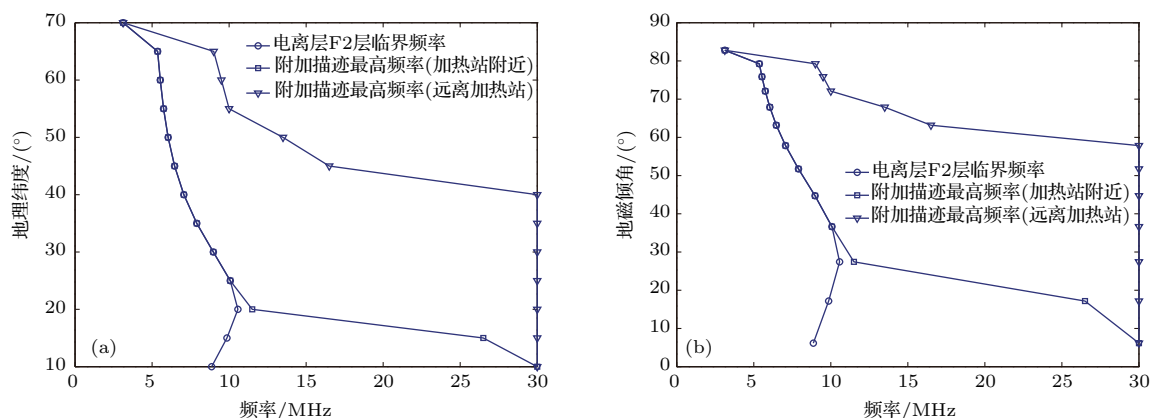


图9 人工扩展描述变化 (a) 随地理纬度变化(120°E); (b) 随地磁倾角变化

Fig. 9. Change of spread trace: (a) with latitude(120°E); (b) with inclination.

描述随地理纬度(以120°E为例)和地磁倾角的变化。计算中,背景电离层参数来源于国际参考电离层模型IRI-2016,地磁场参数来源于IGRF-12,计算时间选择当地时间2015年6月25日18:00时,假设人工散射体半径为100 km,探测波束宽度为120°。

图8和图9的仿真结果表明: AFAI存在时所导致的垂测电离图人工扩展描述,随地理纬度(120°E)升高而减小,随地磁倾角增大而减小: a)10°N—25°N,地磁倾角5°—40°范围内,从AFAI正下方入射的探测波可产生明显的人工扩展描述,若将入射的探测波向南移动,人工扩展描述可延伸到短波频段高端; b) 25°N—70°N,地磁倾角40°—80°范围内,从AFAI正下方入射的探测波不能产生人工扩展描述;若将入射的探测波向南移动,可产生明显人工扩展描述; c) 70°N,地磁倾角80°以上,从AFAI正下方入射的探测波不能产生人工扩展描述,即使将入射的探测波向南移动,也不会产生人工扩展描述。

3.3 国外实验现象解释

国外主要加热站多位于高纬度地区,且电离层垂测仪一般位于加热站附近,在其加热试验中并没有观测到图7中类似的人工扩展描述。下面根据本文建立的模型,对国外主要加热站存在AFAI条件下的垂直探测波传播路径进行仿真分析。计算中,背景电离层参数来源于国际参考电离层模型IRI-2016,地磁场参数来源于IGRF-12,计算时间选择当地时间2015年6月25日18:00时,

假设人工散射体半径为100 km,探测波束宽度为120°。

图10—图12所示分别为电离层垂测仪位于Arecibo站(18.48°N, 66.67°W,地磁倾角约44°,临界频率约9.4 MHz),Platteville站(40.18°N, 104.73°W,地磁倾角约67°,临界频率约为6.1 MHz),HAARP站(62.87°N, 146.83°W,地磁倾角约76.5°,临界频率约为5.2 MHz)附近时,垂直探测波的传播路径仿真结果。

仿真结果表明:

1) Arecibo站的探测波束内,能够满足后向散射条件(到达AFAI高度并且和地磁场垂直)的射线,对于探测频率10, 15, 20和30 MHz,射线偏移距离分别为130, 200, 215和230 km,均已超出了AFAI范围;

2) Platteville站的探测波束内,能够满足后向散射条件的射线,对于探测频率6.5, 7, 8, 10和12 MHz,射线偏移距离分别为210, 230, 270, 340和380 km,均已超出了AFAI范围;13 MHz时探测波束内没有满足后向散射条件的射线;

3) HAARP站的探测波束内,能够满足后向散射条件的射线,对于探测频率5.5, 6和7 MHz,射线偏移距离分别为280, 320和370 km,均已超出了AFAI范围;8 MHz时探测波束内没有满足后向散射条件的射线。

因此,电离层垂测仪位于Arecibo加热站、Platteville加热站和HAARP加热站内时,不能探测到由于AFAI存在所形成的人工扩展描述。通过上述仿真计算可知,国外典型加热站由于大都

地处高纬度地区, 由于地磁倾角较大, 即使加热产生了 AFAI, 若电离层垂测仪位于加热站内, 也无法观测到人工扩展描述. 但是, 根据垂直探测波经 AFAI 散射的传播理论, 若在这些加热站将电离层垂测仪向南移动, 其探测波束更容易垂直入射到 AFAI 并发生后向散射, 就可能观测到由于 AFAI 存在所形成的人工扩展描述, 如图 13 所示. 对于 Arecibo 站, 若将电离层垂测仪向南移

动约 130 km, 则理论上可观测到明显的人工扩展描述, 其频率范围可达 9.4—30 MHz; 对于 Platteville 站, 若将电离层垂测仪向南移动约 370 km, 则理论上可观测到较为明显的人工扩展描述, 其最高频率可达 6.1—12 MHz; 对于 HAARP 站, 若将电离层垂测仪向南移动约 350 km, 则理论上可观测到有限的人工扩展描述, 其最高频率可达 5.2—7 MHz.

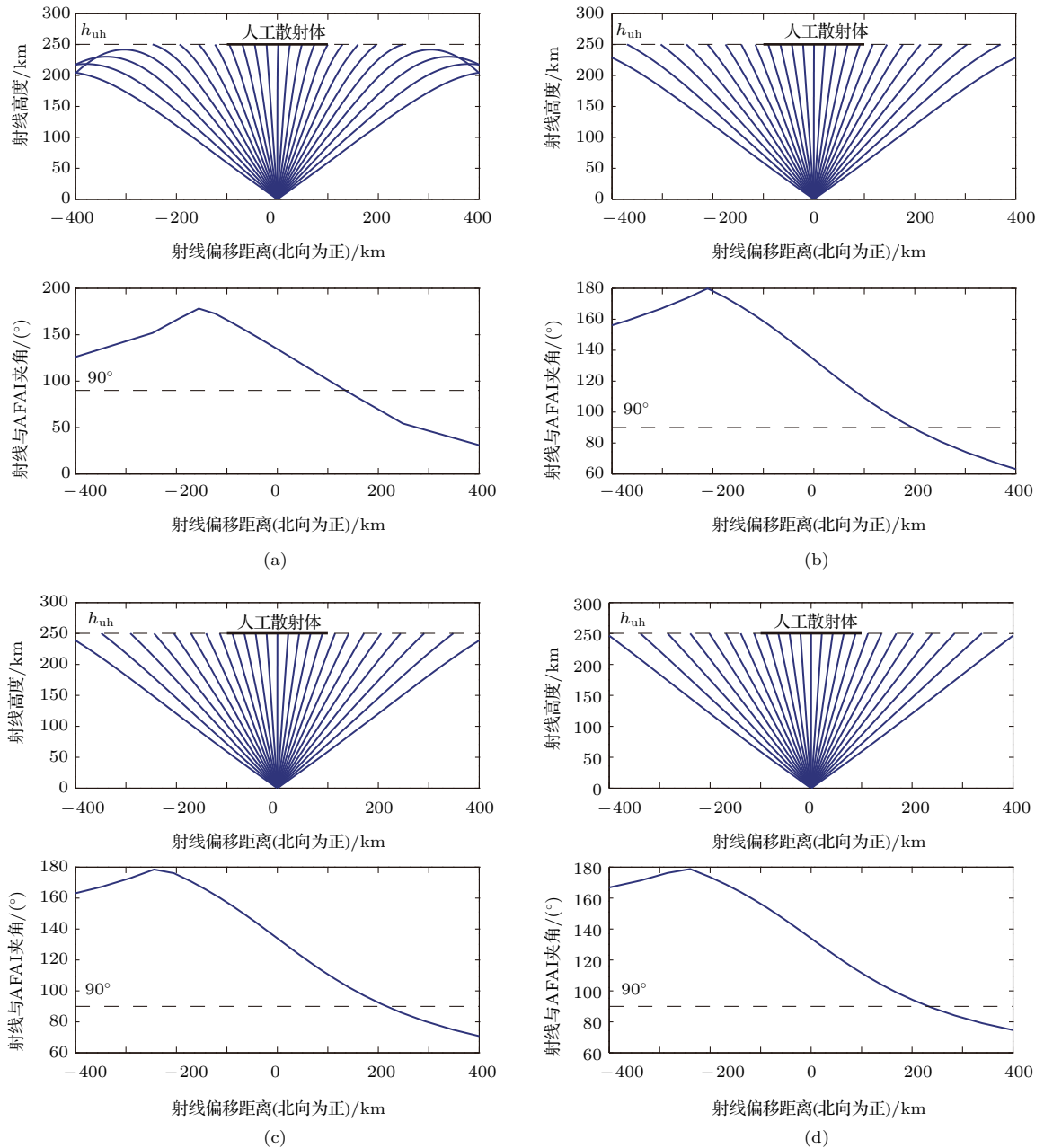


图 10 Arecibo 站不同频率探测波路径 (图的上部表示射线传播路径, 图的下部表示射线入射 AFAI 时和地磁场方向的夹角) (a) 10 MHz; (b) 15 MHz; (c) 20 MHz; (d) 30 MHz

Fig. 10. Ray paths of sounding wave with different frequency at Arecibo. The upper part is ray paths of the sounding wave, the lower part is the incident angles of the rays to AFAI: (a) 10 MHz; (b) 15 MHz; (c) 20 MHz; (d) 30 MHz.

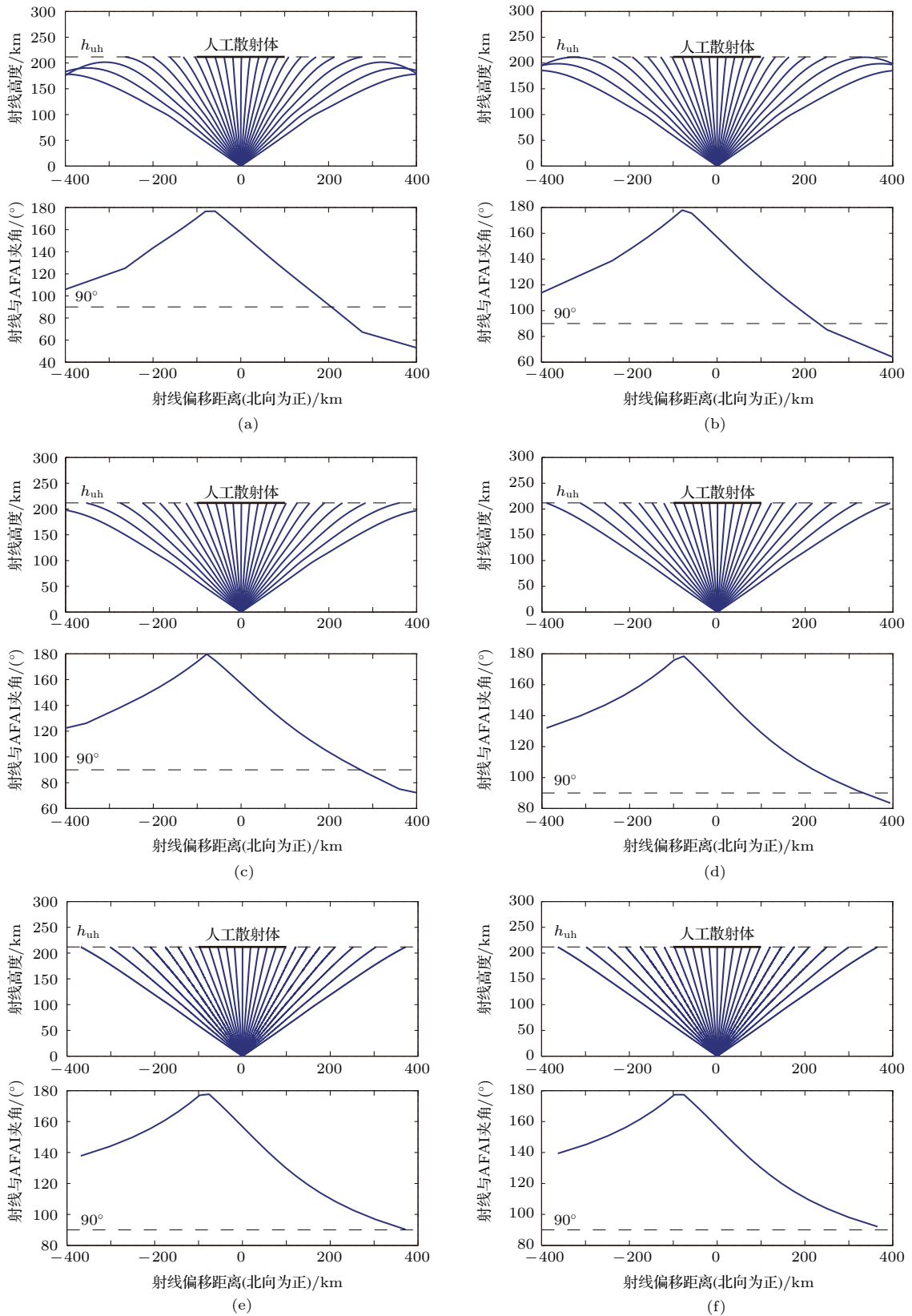


图 11 Platteville 站不同频率探测波传播路径 (图的上部表示射线传播路径, 图的下部表示射线入射 AFAI 时和地磁场方向的夹角) (a) 6.5 MHz; (b) 7 MHz; (c) 8 MHz; (d) 10 MHz; (e) 12 MHz; (f) 13 MHz

Fig. 11. Ray paths of sounding wave with different frequency at Platteville. The upper part is ray paths of the sounding wave, the lower part is the incident angles of the rays to AFAI: (a) 6.5 MHz; (b) 7 MHz; (c) 8 MHz; (d) 10 MHz; (e) 12 MHz; (f) 13 MHz.

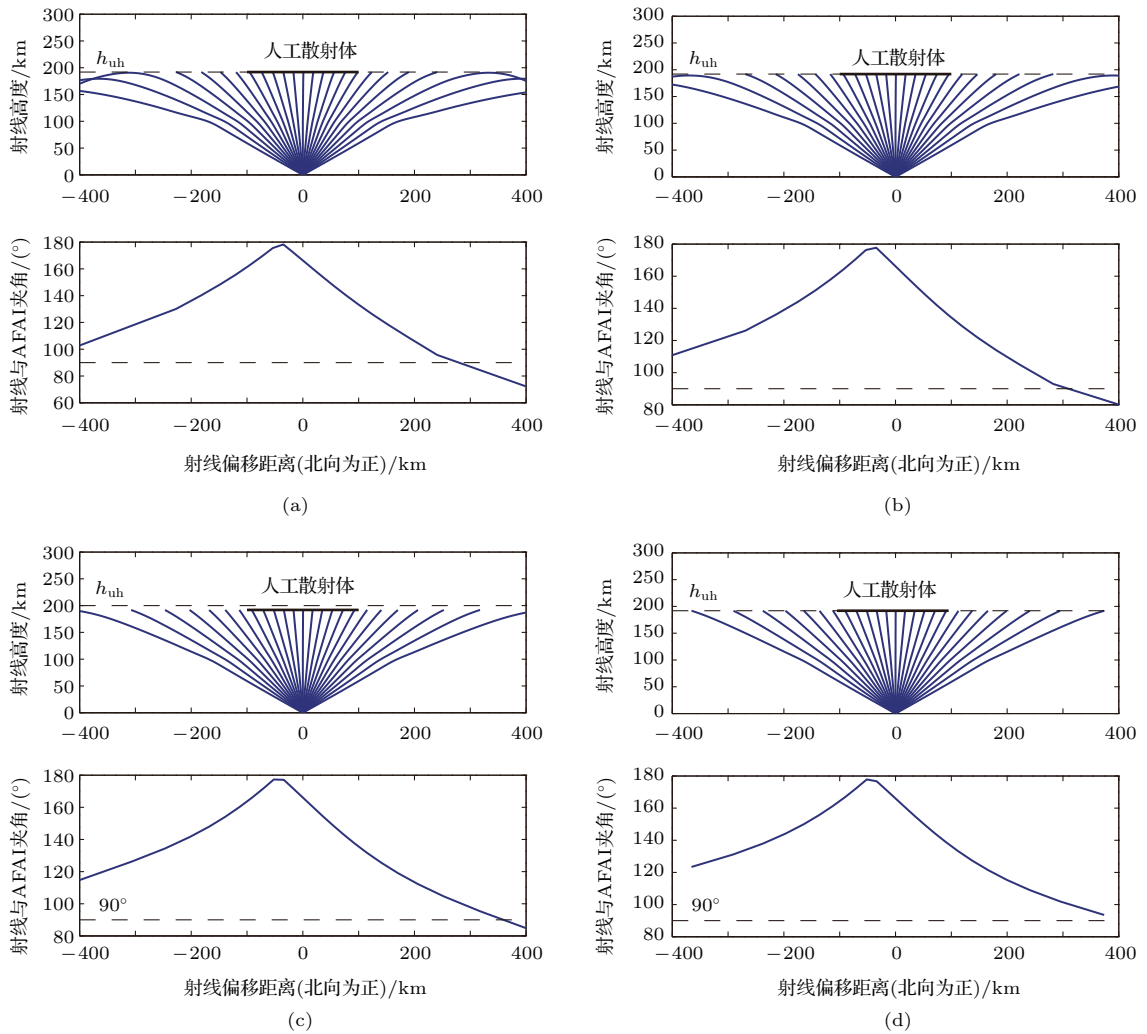


图 12 HAARP 站不同频率探测波传播路径 (图的上部表示射线传播路径, 图的下部表示射线入射 AFAI 时和地磁场方向的夹角) (a) 5.5 MHz; (b) 6 MHz; (c) 7 MHz; (d) 8 MHz

Fig. 12. Ray paths of sounding wave with different frequency at HAARP. The upper part is ray paths of the sounding wave, the lower part is the incident angles of the rays to AFAI: (a) 5.5 MHz; (b) 6 MHz; (c) 7 MHz; (d) 8 MHz.

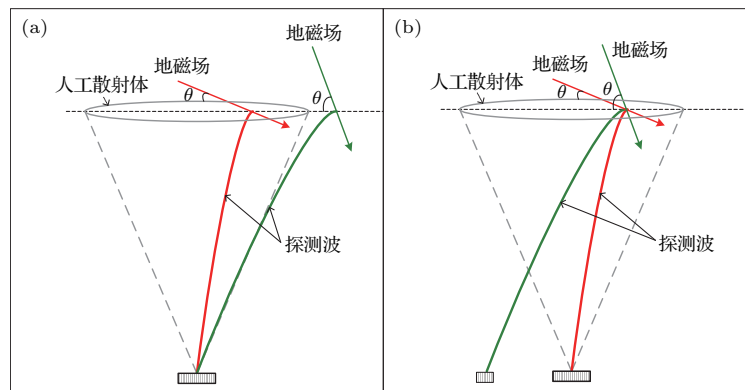


图 13 地磁倾角的影响 (a) 满足后向散射条件的射线不能到达人工散射体范围; (b) 将电离层垂测仪向南移动, 满足后向散射条件的射线能够到达人工散射体范围内

Fig. 13. The influence of inclination: (a) Rays satisfying the scattering condition can not arrive at the scatter; (b) move the sounding equipment to the south, rays satisfying the scattering condition can arrive at the scatter.

4 结 论

本文从人工沿场不均匀体的产生机制及其对无线电波的人工沿场散射特性出发, 基于射线追踪原理, 建立了垂直探测波经人工沿场不均匀体散射的传播模型. 基于此模型, 模拟分析了不同纬度电离层存在 AFAI 条件下的垂直探测波传播路径, 根据仿真结果得到以下结论.

1) 在低纬度地区, 如在 10°N — 25°N , 地磁倾角约 5° — 40° 区间, 在正下方垂直入射的探测波经 AFAI 散射后可产生明显的人工扩展描述, 若将入射的探测波向南移动, 人工扩展描述可延伸到短波频段高端;

2) 在中高纬地区, 如在 25°N — 70°N , 地磁倾角约 40° — 80° 区间, 在正下方垂直入射的探测波经 AFAI 散射后不能产生人工扩展描述, 若将入射的探测波向南移动, 可产生有限人工扩展描述;

3) 在较高纬度地区, 如在 70°N , 地磁倾角 80° 以上, 从正下方入射的探测波经 AFAI 散射后不能产生人工扩展描述, 即使将入射的探测波向南移动, 也不会产生人工扩展描述.

根据本文分析结果, 进一步对国外加热试验站基于电离层垂测仪的探测结果进行了仿真, 结果表明在 Arecibo, Platteville, HAARP 等国外典型加热站, 若电离层垂测仪位于加热站内, 即使加热产生了 AFAI, 也不能观测到人工扩展描述. 但若将其向南移动, 探测波束就更容易垂直入射到 AFAI 并发生后向散射, 进而观测到人工扩展描述.

对于中低纬度地区, 假设开展电离层加热试验并能够产生 AFAI, 可以预期在垂测电离图中会观测到人工扩展描述现象, 并且根据图 8 和图 9 的仿真结果, 这种人工扩展描述会延伸到比较高的频段. 特别是在电离层临界频率较低的时段, 若通过电离层加热产生 AFAI, 将会使超过电离层临界频率的无线电波发生沿场散射, 从而达到扩展短波通信可用频段的目的, 可大大提升电离层反射原理的短波通信、干扰和探测能力, 甚至是形成新型的短

波通信、干扰和探测手段. 针对这些潜在的应用, 需要在今后条件许可的情况下开展试验验证, 并进行深入研究.

参考文献

- [1] Utlaut W F 1970 *J. Geophys. Res.* **75** 6402
- [2] Utlaut W F, Violette E J, Paul A K 1970 *J. Geophys. Res.* **75** 6429
- [3] Georges T M 1970 *J. Geophys. Res.* **75** 6436
- [4] Thome G D, Blood D W 1974 *Radio Sci.* **9** 917
- [5] Fialer P A 1974 *Radio Sci.* **9** 923
- [6] Tsai L C, Berkey F T, Wong A Y, Pau J 2001 *J. Atoms. Solar-Terr. Phys.* **63** 107
- [7] Kuo S, Snyder A 2013 *J. Geophys. Res. Space Phys.* **118** 2734
- [8] Kuo S, Snyder A, Lee M C 2014 *Phys. Plasmas* **21** 062902
- [9] Hao S J, Li Q L, Yang J T, Wu Z S 2013 *Chinese J. Geophys.* **56** 2503 (in Chinese) [郝书吉, 李清亮, 杨巨涛, 吴振森 2013 地球物理学报 **56** 2503]
- [10] Hao S J, Li Q L, Yang J T, Wu Z S 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 229402 (in Chinese) [郝书吉, 李清亮, 杨巨涛, 吴振森 2013 物理学报 **62** 229402]
- [11] Xie H, Xiao Z 1993 *Chinese J. Geophys.* **36** 18 (in Chinese) [谢红, 肖佐 1993 地球物理学报 **36** 18]
- [12] Wang C S, Li J 1994 *Acta Phys. Sin.* **43** 1476 (in Chinese) [黄朝松, 李钧 1994 物理学报 **43** 1476]
- [13] Zhou L, Tang C J 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 8254 (in Chinese) [周磊, 唐昌建 2009 物理学报 **58** 8254]
- [14] 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]
- [15] Song L, Miao J S, Li Q L 2014 *Chinese J. Radio Science* **29** 539 (in Chinese) [宋磊, 苗建苏, 李清亮 2014 电波科学学报 **29** 539]
- [16] Huang C S, Keley M C 1996 *Acta Phys. Sin.* **45** 1830 (in Chinese) [黄朝松, Keley M C 1996 物理学报 **45** 1830]
- [17] Hou J C 1986 *J. Wuhan Univ. (Nat. Sci. Ed)* **4** 49 (in Chinese) [侯昌杰 1986 武汉大学学报 **4** 49]
- [18] Minkoff J, Kugelmann P, Weissman I 1974 *Radio Sci.* **9** 941
- [19] Minkoff J, Laviola M, Abrams S, Porter D 1974 *Radio Sci.* **9** 957
- [20] Minkoff J 1974 *Radio Sci.* **9** 997
- [21] Perkins F W 1974 *Radio Sci.* **9** 1065
- [22] Braginskii S I 1965 *Rev. Plasma Phys.* **1** 205
- [23] Jones R M 1975 *OT Report* **75** 6

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

Lü Li-Bin^{1)†} Li Qing-Liang²⁾ Hao Shu-Ji²⁾ Wu Zhen-Sen^{1)‡}

1) (*School of Physics and Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China*)

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

(Received 31 August 2016; revised manuscript received 14 November 2016)

Abstract

Ionospheric heating experiments have been conducted widely at high power heating stations, such as Arecibo, Platteville, HAARP, etc. It has been found that once high-power high-frequency (HF) radio wave is injected into the ionosphere, the electron temperature and density in the illuminated region of the ionosphere can be disturbed, and furthermore, a large number of nonlinear phenomena may be triggered because of the complicated instabilities. One of the most interesting heating effects is the generation of the artificial field-aligned irregularities (AFAI), which has profound influences on electromagnetic wave propagation. Many diagnostic methods have been used for studying the characteristics of AFAI, such as the HF vertical/oblique sounding, HF/VHF coherent radar, etc. During the heating experiments, traces spreading on frequency or height are observed from the HF vertical sounding ionograms, which suggests that the propagation of the sounding wave will be affected by AFAI.

In the ionosphere F region, the electron diffusion and thermal conductivity rate are greater along the geomagnetic field lines than across the field line, leading to a stretch of AFAI along the geomagnetic field line. For the special structure, the AFAI will scatter the incident wave in a cone with the axis parallel to the geomagnetic field direction, which is called artificial field-aligned scattering (AFAS). Because of the high sensitivity to the geomagnetic field of AFAS, we try to study different effects on the HF vertical sounding of AFAI generated at different latitudes, by constructing a propagation model and performing a simulation, in order to seek the potential applications in HF transmission.

Based on the special scattering feature of AFAI and the ray tracing technique, a propagation model for HF vertical sounding scattered by AFAI is proposed. With this model the ray paths of the sounding waves with AFAI are simulated in amid-latitude region, and a new kind of artificial spread trace is found to start from the heating frequency and spread to higher band. Taking account of the strong dependence of the AFAS on the geomagnetic field, the influences of AFAI on the HF vertical sounding at different latitudes are analyzed theoretically. It is indicated that the artificial spread traces will appear only when the following two conditions are satisfied: 1) the sounding wave can reach the AFAI height; 2) the sounding wave is incident perpendicularly to the AFAI. It is also shown that the spread trace becomes shorter with the latitude and the inclination increasing. Furthermore, the simulations from different heating stations suggest that artificial spread traces do not exist when HF vertical sounding is located just below the AFAI, which explains why such phenomena cannot be observed at high latitudes. Nevertheless, if the HF vertical sounding moves outside the heating station toward the south, the spread traces will be apparent for Arecibo, limited for Platteville and still unavailable for HAARP. Finally, if the AFAI is assumed to be present, apparent artificial spread traces of the mid-low latitude are predicted, and the important valuable applications of AFAI in HF transmission are proposed.

Keywords: ionospheric heating, artificial field-aligned irregularities, high frequency vertical sounding, artificial spread trace

PACS: 94.20.Vv, 94.30.Tz

DOI: 10.7498/aps.66.059401

* Project supported by the National Key Laboratory of Electromagnetic Environment, China (Grant No. 201600017).

† Corresponding author. E-mail: libin_lv@163.com

‡ Corresponding author. E-mail: wuzhs@mail.xidian.edu.cn