

电离层中 ELF 辐射源向下传播衰减理论分析

杨巨涛^{1,2}, 李清亮^{1,2}, 郝书吉^{1,2}, 董 慧^{1,2}

(1. 中国电波传播研究所青岛分所, 山东青岛 266107; 2. 电波环境特性及模化技术重点实验室, 山东青岛 266107)

摘 要: 利用大功率高频(HF)电波调制加热电离层可在电离层中有效形成辐射源,并用于辐射 ELF 电磁波. 本文基于磁流体力学的基本方程通过对电离层中极低频(ELF)辐射源的辐射场分析,获得 ELF 电磁波在电离层中传播的色散关系式,建立电离层中的 ELF 辐射源向下传播衰减模型.并依据建立的传播衰减模型,分析不同纬度地区传播衰减的差异,以及传输频率和背景电离层参数对传播衰减的影响.

关键词: 电离层辐射源; 极低频; 色散关系; 相对衰减率; 传播衰减模型; 衰减特性

中图分类号: P352.3; P353.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2020)12-2319-07

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2020.12.005

Theoretical Analysis of Downward Propagation Attenuation of ELF Radiation in Ionosphere

YANG Ju-tao^{1,2}, LI Qing-liang^{1,2}, HAO Shu-ji^{1,2}, DONG Hui^{1,2}

(1. China Research Institute of Radiowave Propagation, Qingdao, Shandong 266107, China;

2. National Key Laboratory of Electromagnetic Environment, Qingdao, Shandong 266107, China)

Abstract: Sources and resultant radiations of extremely low frequency (ELF) electromagnetic waves can be effectively generated via modulated heating of the ionosphere by powerful high-frequency (HF) waves. With fundamental equations of magneto-hydrodynamics, the radiation field of the ELF radiation source in the ionosphere is derived. The dispersion relation of ELF waves propagating in the ionosphere is then obtained and the downward propagation attenuation model is established. According to this model, the differences of propagation attenuation in distinct latitudes and influences of transmitting frequency and ambient ionospheric parameters on propagation attenuation are analyzed. It is shown that the relative attenuation rate is raised with increase of the geomagnetic inclination and firstly rises and then falls with increase of the transmission frequency, resulting in an optimal transmission frequency value at which the relative attenuation rate reaches minimum. With enhancement of electron density or electron temperature, the relative attenuation rate rises and its growth rate drops.

Key words: ionospheric radiation source; extremely low frequency; dispersion relation; relative attenuation rate; propagation attenuation model; attenuation characteristics

1 引言

对于极低频(ELF, 0.1 ~ 300Hz)频段的电磁波,地面与电离层都是一个良好的反射面,电磁波在地球-电离层波导中的传播衰减特别低,如100Hz的ELF电磁波在波导中传输1000km仅衰减约2dB,入水衰减率约为0.3dB/m,因此ELF电磁波在对核潜艇通讯方面具有极其重要的军事应用,是海军战略通信频段.

传统的ELF电磁波是通过地面布设巨大尺寸的天线系统辐射产生,工程量极大,且辐射效率低,后来随着航天技术的发展,利用近轨卫星拖拽导线可辐射低频信号^[1,2],但考虑到天线的尺寸,其主要用于辐射甚低频

(VLF)信号. 上世纪70年代,随着电离层等离子体非线性调制理论的发展^[3],通过电离层调制加热,可在电离层中形成ELF辐射源^[4-11],称之为“ELF电离层天线”. “ELF电离层天线”在电离层中的位置与调制加热方式密切相关,如利用幅度调制加热电离层振荡改变自然电流强度,ELF辐射源位于电离层70~85km高度^[12-14];再如电离层中不存在自然电流时,通过双频模式^[15-17]或特定频率(低于离子碰撞频率)幅度调制^[18,19]加热高电离层,将在电离层200~400km处形成ELF辐射源. 对于低电离层中的ELF辐射源,Lehtinen等人^[20,21]将低电离层看成非均匀水平分层介质,并采用全波解析算法计算ELF电磁波在低电离层中传播衰减过程. 而对于高电离层中

的 ELF 辐射源,由于其调制激发 ELF 电磁波方式近几年才成为研究热点,通常是将低电离层中 ELF 辐射源传播处理方法外延至高电离层中,将高电离层视为均匀介质,低电离层为非均匀介质^[22,23],其结果虽能大体上反应出辐射的 ELF 电磁波穿透电离层过程中的一般规律,但存在一定的误差,同时由于背景电离层参数不仅会影响到 ELF 源强度,还会影响到其传输参数,因此其研究结果很难反应出这种利用调制加热并在高电离层中形成 ELF 辐射源的辐射特性.

本文将从磁流体力学的基本方程出发,分析 ELF 电磁波在电离层中向下传播衰减过程,并建立高电离层中 ELF 辐射源向下传播衰减模型,分析不同纬度地区传播衰减的差异,以及传输频率和背景电离层参数对传播衰减的影响,以在将来中低纬度地区开展类似实验时,为获得较好实验效果,设计优化的实验参数提供参考.

2 理论模型

2.1 基本方程

在磁流体动力学模型中,电离层中 ELF 的电场强度(\mathbf{E})与磁感应强度(\mathbf{B})由法拉第定律和安培定律决定,同时在低频时可忽略位移电流的影响,满足麦克斯韦方程:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (1)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = \mathbf{J} = \mu_0 n_e (\mathbf{v}_i - \mathbf{v}_e) \quad (2)$$

其中 μ_0 为真空中的磁导率, e 为电子电量, n_e 为电子数密度, \mathbf{J} 为自由电流密度, \mathbf{v}_i 和 \mathbf{v}_e 分别表示离子与电子运动速度. 结合电离层电子与离子动量方程,同时考虑电离层等离子体中电势是德拜短程势,可以忽略电位梯度,则电离层中 ELF 辐射源场满足^[12]:

$$\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} = -\mathbf{E} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} = & -\omega_{ci}(\Gamma_{in} + \Gamma_{en})\mathbf{E} + \frac{\boldsymbol{\varepsilon}^{-1}[\nabla \times (\nabla \times \mathbf{A})]}{\mu_0} \\ & - \frac{\mathbf{R}[\nabla \times (\nabla \times \mathbf{E})]}{\mu_0 \sigma} \\ & + \left(\omega_{ci} \mathbf{G} - \frac{\partial}{\partial t} \right) \frac{\mathbf{B}_0 \times \mathbf{J}}{en_e} \end{aligned} \quad (4)$$

其中 \mathbf{A} 为矢量电势, $\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}$, \mathbf{B}_0 为地磁场, \mathbf{J}_0 为 ELF 辐射源电流强度, Γ_{en} 和 Γ_{in} 分别表示归一化电子、离子

碰撞频率,即 $\Gamma_{en} = \nu_{en}/\omega_{ce}$, $\Gamma_{in} = \nu_{in}/\omega_{ci}$, ν_{en} 和 ν_{in} 分别为电子、离子与中性粒子的碰撞频率, ω_{ce} 和 ω_{ci} 分别为电子与离子回旋频率, $\omega_{ce} = eB/m_e$, $\omega_{ci} = eB/m_i$, e 表示电子电量的数值, m_e 和 m_i 分别为电子与离子的质量, B 表示对于地磁场大小. $\boldsymbol{\varepsilon}^{-1}$ 表示介电张量的逆矩阵,且 $\boldsymbol{\varepsilon}^{-1} = -[\omega_{ci}^2/(\varepsilon_0 \omega_{pi}^2)] \mathbf{R} \mathbf{G}$, \mathbf{R} 和 \mathbf{G} 分别满足:

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \Gamma_{en} & 0 & 0 \\ 0 & \Gamma_{en} & 1 \\ 0 & -1 & \Gamma_{en} \end{bmatrix}, \mathbf{G} = \begin{bmatrix} -\Gamma_{in} & 0 & 0 \\ 0 & -\Gamma_{in} & 1 \\ 0 & -1 & -\Gamma_{in} \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中 ω_{pi} 为离子的等离子体频率,有 $\omega_{pi} = [n_i e^2 / (\varepsilon_0 m_i)]^{0.5}$, n_i 为离子数密度相应的在电离层准中性条件下,有 $n_i = n_e$, ω_{pe} 为电子的等离子体频率, $\omega_{pe} = [n_e e^2 / (\varepsilon_0 m_e)]^{0.5}$, $\sigma = \varepsilon_0 \omega_{pe}^2 / \omega_{ce} = \varepsilon_0 \omega_{pi}^2 / \omega_{ci}$.

为研究 ELF 电磁波通过电离层向下传播过程中的衰减,可仅考虑平面电磁波在电离层中传输过程中的衰减,不需要考虑辐射源本身的强弱,以及辐射源对传播的影响,因此对应式(4)中 \mathbf{J}_0 可忽略. 令 x 轴平行磁力线方向, z 轴垂直磁力线方向, \mathbf{A} 和 \mathbf{E} 分别与 $\exp(ik_{\parallel} x + ik_{\perp} z - i\omega t)$ 成比例,其中 k_{\parallel} 与 k_{\perp} 分别表示电磁波的传播波数 k 在地磁场方向和垂直地磁场方向的分量, $k^2 = k_{\parallel}^2 + k_{\perp}^2$, ω 为辐射波频率. 对变量 $\mathbf{E}(r, t)$ 在 $(0, +\infty)$ 区间做时间傅里叶变换 $\mathbf{E}(r, \omega) = \int_0^{+\infty} \mathbf{E}(r, t) e^{-i\omega t} dt$, 以及在 $(-\infty, +\infty)$ 区间做空间傅里叶变换 $\mathbf{E}(k, \omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} \mathbf{E}(r, t) e^{ikr} dr$, 为了方便起见,上述变换后变量都简写为 \mathbf{E} , 其它变量亦然.

对式(3)两边同时做时间傅里叶变换,有:

$$\mathbf{A} = -i\mathbf{E}/\omega \quad (6)$$

对式(4)两边同时做时间与空间傅里叶变换,有:

$$\begin{aligned} -i\omega \mathbf{E} = & -\omega_{ci}(\Gamma_{in} + \Gamma_{en})\mathbf{E} \\ & + \frac{\boldsymbol{\varepsilon}[\nabla \times (\nabla \times \mathbf{A})]}{\mu_0} - \frac{\mathbf{R}[\nabla \times (\nabla \times \mathbf{E})]}{\mu_0 \sigma} \end{aligned} \quad (7)$$

将式(7)代入式(6),并合并相同项有:

$$[\omega_{ci}(\Gamma_{in} + \Gamma_{en}) - i\omega]\mathbf{E} = \left(\frac{\boldsymbol{\varepsilon}}{i\omega\mu_0} - \frac{\mathbf{R}}{\mu_0 \sigma} \right) [\nabla \times (\nabla \times \mathbf{E})] \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \frac{\boldsymbol{\varepsilon}^{-1}}{i\omega\mu_0} - \frac{\mathbf{R}}{\mu_0 \sigma} = & \frac{-\omega_{ci}^2 \mathbf{R} \mathbf{G}}{i\omega\mu_0 \varepsilon_0 \omega_{pi}^2} - \frac{\omega_{ci} \mathbf{R}}{\mu_0 \varepsilon_0 \omega_{pi}^2} \\ = & \frac{-\omega_{ci}^2}{i\omega\mu_0 \varepsilon_0 \omega_{pi}^2} \left(\begin{bmatrix} \Gamma_{en} & 0 & 0 \\ 0 & \Gamma_{en} & 1 \\ 0 & -1 & \Gamma_{en} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\Gamma_{in} & 0 & 0 \\ 0 & -\Gamma_{in} & 1 \\ 0 & -1 & -\Gamma_{in} \end{bmatrix} - \frac{i\omega}{\omega_{ci}} \begin{bmatrix} -\Gamma_{in} & 0 & 0 \\ 0 & -\Gamma_{in} & 1 \\ 0 & -1 & -\Gamma_{in} \end{bmatrix} \right) \end{aligned}$$

$$= \frac{-\omega_{ci}^2}{i\omega\mu_0\varepsilon_0\omega_{pi}^2} \begin{bmatrix} \Gamma_{en}\Gamma_{in} - (i\omega/\omega_{ci})\Gamma_{en} & 0 & 0 \\ 0 & 1 + \Gamma_{en}\Gamma_{in} - (i\omega/\omega_{ci})\Gamma_{en} & \Gamma_{in} - \Gamma_{en} - (i\omega/\omega_{ci}) \\ 0 & \Gamma_{en} - \Gamma_{in} + (i\omega/\omega_{ci}) & 1 + \Gamma_{en}\Gamma_{in} - (i\omega/\omega_{ci})\Gamma_{en} \end{bmatrix} \quad (9)$$

令 $a = \Gamma_{en}\Gamma_{in} - (i\omega/\omega_{ci})\Gamma_{en}$, $b = 1 + \Gamma_{en}\Gamma_{in} - (i\omega/\omega_{ci})\Gamma_{en}$, $c = \Gamma_{in} - \Gamma_{en} - (i\omega/\omega_{ci})$, 同时 $\varepsilon_0^{-1}\mu_0^{-1}(\omega_{ci}/\omega_{pi})^2 = \nu_c^2$, 其中 ν_c 为阿尔芬波速, 代入式(9)得:

$$\frac{\boldsymbol{\varepsilon}^{-1}}{i\omega\mu_0} - \frac{\mathbf{R}}{\mu_0\sigma} = \frac{-\nu_c^2}{i\omega} \begin{bmatrix} a & 0 & 0 \\ 0 & b & c \\ 0 & -c & b \end{bmatrix} \quad (10)$$

令波矢量 $\mathbf{k} = (k_1, k_2, k_3)^T = (k_{\parallel}, 0, k_{\perp})^T$, 电场强度 $\mathbf{E} = (E_1, E_2, E_3)^T$, 则有:

$$\begin{aligned} & \nabla \times (\nabla \times \mathbf{E}) \\ &= \nabla(\nabla \cdot \mathbf{E}) - \nabla^2 \mathbf{E} = \nabla(i\mathbf{k} \cdot \mathbf{E}) - \begin{bmatrix} \nabla^2 E_1 \\ \nabla^2 E_2 \\ \nabla^2 E_3 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} -k_{\parallel}(k_{\parallel}E_1 + k_{\perp}E_3) \\ 0 \\ -k_{\perp}(k_{\parallel}E_1 + k_{\perp}E_3) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k^2 E_1 \\ k^2 E_2 \\ k^2 E_3 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} k_{\perp}^2 & 0 & -k_{\perp}k_{\parallel} \\ 0 & k^2 & 0 \\ -k_{\perp}k_{\parallel} & 0 & k_{\parallel}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (11)$$

将式(10)和(11)代入式(8), 并令 $Y = \omega[\omega + i\omega(\Gamma_{in} + \Gamma_{en})]/\nu_c^2$, 可得:

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} Y & 0 & 0 \\ 0 & Y & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \mathbf{E} \\ &= \begin{bmatrix} a & 0 & 0 \\ 0 & b & c \\ 0 & -c & b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_{\perp}^2 & 0 & -k_{\perp}k_{\parallel} \\ 0 & k^2 & 0 \\ -k_{\perp}k_{\parallel} & 0 & k_{\parallel}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} ak_{\perp}^2 & 0 & -ak_{\perp}k_{\parallel} \\ -ck_{\perp}k_{\parallel} & bk^2 & ck_{\parallel}^2 \\ -bk_{\perp}k_{\parallel} & -ck^2 & bk_{\parallel}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (12)$$

简化有:

$$\begin{bmatrix} Y - ak_{\perp}^2 & 0 & ak_{\perp}k_{\parallel} \\ ck_{\perp}k_{\parallel} & Y - bk^2 & -ck_{\parallel}^2 \\ bk_{\perp}k_{\parallel} & ck^2 & Y - bk_{\parallel}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} = 0 \quad (13)$$

对式(13)求行列式, 可得 ELF 电磁波在电离层中传播的色散关系, 有:

$$\det = \begin{vmatrix} Y - ak_{\perp}^2 & 0 & ak_{\perp}k_{\parallel} \\ ck_{\perp}k_{\parallel} & Y - bk^2 & -ck_{\parallel}^2 \\ bk_{\perp}k_{\parallel} & ck^2 & Y - bk_{\parallel}^2 \end{vmatrix}$$

$$\begin{aligned} &= (Y - ak_{\perp}^2) [(Y - bk^2)(Y - bk_{\parallel}^2) + c^2 k^2 k_{\parallel}^2] \\ &\quad + ak_{\perp}k_{\parallel} (c^2 k^2 k_{\perp}k_{\parallel} - bk_{\perp}k_{\parallel}Y + b^2 k^2 k_{\perp}k_{\parallel}) \\ &= 0 \end{aligned} \quad (14)$$

化简式(14)可得:

$$Y^2 - [k_{\perp}^2 a + (k^2 + k_{\parallel}^2)b]Y + k^2 k_{\parallel}^2 (b^2 + c^2) + k^2 k_{\perp}^2 ab = 0 \quad (15)$$

式(15)即为 ELF 电磁波在电离层中传播的色散关系式.

令 $k = k_R + ik_I$, 其中 k_R 、 k_I 分别对应波数 k 的实部和虚部, k_I 也表示 ELF 电磁波传播过程中的损耗因子, 从高度 z_1 传输到高度 z 过程中 ELF 电磁波强度相对衰减率 δ 可表示为:

$$\delta = e^{-\left| \int_{z_1}^z k_I dz \right|} \quad (16)$$

2.2 背景电离层参数及物理参数

在本文仿真中, 背景电离层电子、离子的温度及密度由国际参考电离层模型(IRI-2017)确定, 中性大气密度和温度由 MSIS90 经验模式给出. 地球磁场(B_e)采用中心偶极子模型, 其表达式为:

$$B_e = B_0 \left(\frac{r_e}{r_e + h} \right)^2 \sqrt{1 + 3 \sin^2 \theta} \quad (17)$$

其中 B_0 为常数, 通常取 $B_0 = 3.085 \times 10^{-5} T$, θ 为地磁纬度, r_e 为地球平均半径, 取 $r_e = 6371 \text{ km}$, h 是离地高度. 电子与中性粒子的碰撞频率 ν_{en} 及离子和 ν_{in} 分别为:

$$\begin{aligned} \nu_{en} &= 9.32 \times 10^{-12} [N_2] (1 - 3.44 \times 10^{-5} T_e) \\ &\quad + 1.21 \times 10^{-10} [O_2] (1 + 2.15 \times 10^{-12} T_e^{0.5}) T_e \\ &\quad + 5.49 \times 10^{-10} [O] T_e^{0.5} \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \nu_{in} &= (4.34 \times 10^{-10} [N_2] + 4.28 \times 10^{-10} [O_2] \\ &\quad + 2.44 \times 10^{-10} [O]) \sqrt{\frac{T_i}{300}} \end{aligned} \quad (19)$$

其中 $[N_2]$ 、 $[O_2]$ 和 $[O]$ 分别对应电离层中中性成分 N_2 、 O_2 和 O 的密度, T_e 和 T_i 分别对应电离层中电子和离子温度. 基于上述模型及条件, 图 1 给出了海口 ($20^\circ N$, $110.3^\circ E$) 2017 年 8 月 1 日 12:00 (UT), 电离层中 n_e 、 T_e 、 ν_c 、 Γ_{in} 和 Γ_{en} 的高度 (h) 剖面, 其中 ELF 电磁波传输频率 (f_{ELF}) 为 10 Hz, 底部电离层高度为 90 km. 以下本文将分析不同纬度地区电离层中 ELF 波传播损耗差异, 同时对不同条件下 ELF 波的传播衰减, 掌握其辐射规律, 为将来条件许可下开展电离层调制加热激励 ELF 辐射实验时参数选择提供参考.

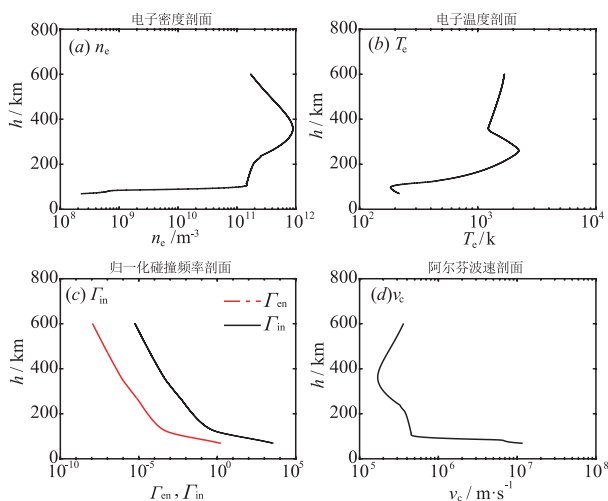


图1 电离层背景参数及物理参数高度剖面

3 数值模拟与分析

3.1 地磁影响

由于受到太阳照射以及地球磁场的影响,不同纬度区域电离层背景参数存在差异,同时 ELF 在电离层中的传播衰减受地磁场的影响也不同. 设磁倾角为 I , 则有 $k_{\parallel} = k \sin I$, $k_{\perp} = k \cos I$, 将 k_{\parallel} 和 k_{\perp} 用 k 表示代入式(15)并化简得:

$$Y^2 - k^2 [a \cos^2 I + (1 + \sin^2 I)b] Y + k^4 [(b^2 + c^2) \sin^2 I + ab \cos^2 I] = 0 \quad (20)$$

求解关于 Y 的方程可得:

$$Y = \frac{k^2 [a \cos^2 I + (1 + \sin^2 I)b]}{2} \pm \frac{k^2 \sqrt{[a \cos^2 I + (1 + \sin^2 I)b]^2 - 4[(b^2 + c^2) \sin^2 I + ab \cos^2 I]}}{2} \quad (21)$$

即有:

$$k^2 = -2Y \left\{ [a \cos^2 I + (1 + \sin^2 I)b] \pm \sqrt{[a \cos^2 I + (1 + \sin^2 I)b]^2 - 4[(b^2 + c^2) \sin^2 I + ab \cos^2 I]} \right\}^{-1} \quad (22)$$

其中,“+”号表示离子回旋剪切阿尔芬波(用“ I 波”表示),“-”号表示哨声剪切阿尔芬波(用“ S 波”表示),相对于前者,后者是强阻尼模. 在图1背景电离层参数条件下,当辐射传输频率分别为10Hz和20Hz时,上述两种波的相对衰减率 δ 随传输位置变化如图2所示. 图2表明,从辐射源位置传输到电离层底部时,“ S 波”相对衰减率明显高于“ I 波”,如当传输频率为10Hz时,“ S 波”对应的 δ 为0.503,而“ I 波”对应的 δ 为0.226,尤其当传输频率为20Hz时,“ S 波”向下传输到157km时,对应的 δ 为1.0,表明该模式的波不能传输到电离层底

部,而“ I 波”传输到电离层底部(90km) δ 仅为0.417. 综合上述分析,由于本文研究对象是电离层中 ELF 辐射源能够传输到地球-电离层波导中,因此以下将仅考虑“ I 波”在电离层中的传输衰减,即只考虑式(21)中对应的“+”波模.

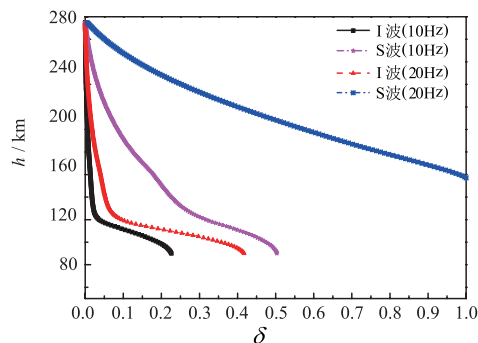


图2 不同传输波模相对衰减率对比

将 Y 、 a 、 b 和 c 表达式代入式(21),即得出关于 k 的表达式,进而获得不同纬度地区 ELF 电磁波在电离层中的损耗因子 k_r ,再由式(17)获得其相对衰减率 δ . 由于背景电离层参数随着时间时刻变化,且不同纬度地区变化也不相同,为对比不同地区的差异,本仿真中选取图1背景电离层参数,即在背景电离层参数一致的情况,传输频率 f_{ELF} 为10Hz,改变地磁倾角,分析地磁倾角改变对 δ 的影响,如图3所示. 图3表明,随着地磁倾角的增大, δ 的值相应增大,且地磁倾角由 0° 变成 20° 时, δ 增长速度最快,增量超过总增量的80%,当地磁倾角超过 50° 后, δ 值趋于平缓.

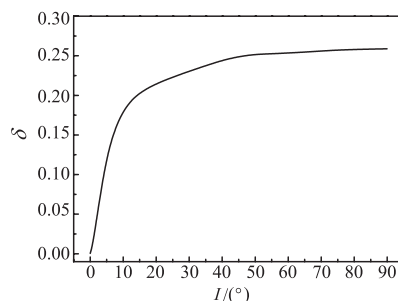


图3 相对衰减率随磁倾角变化

3.2 传输频率影响

随着传输频率的改变,与频率有关的各参数(如 Y 、 a 、 b 和 c 等)也发生变化,进而会影响损耗因子 k_r 和相对衰减率 δ 的值,图4给出了 δ 随传输频率(0.1~300Hz)的变化,仿真的背景参数选取图1对应参数,对应 $I = 27.1^\circ$. 图4表明,随着传输频率的增加,相对衰减率 δ 先减小后增大,对应传输频率范围内存在一个极小值,即对应的背景参数下,存在一个最优传输频率 f_{opt} ,使得 δ 的值最小,图4中 f_{opt} 为11.2Hz. 图5给出在背景参数(电子密度、温度等)不变化的情况下,改变 I ,研究

最优传输频率随 I 的变化. 图 5 表明, 随着 I 的增大, 电离层中 ELF 源的最优传输频率增大, 即在相同的背景条件下, 高纬度地区最优传输频率要高于中低纬度地区.

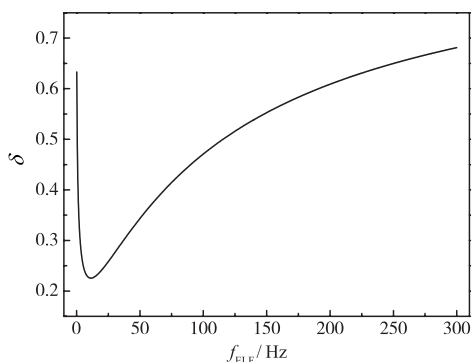


图4 相对衰减率 δ 随传输频率 f_{ELF} 变化

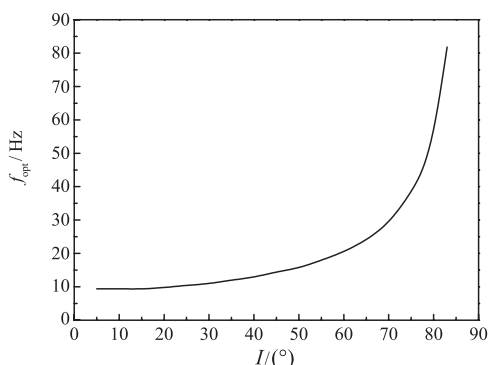


图5 最优传输频率 f_{opt} 随磁倾角 I 变化

3.3 背景电离层参数影响

以上分析不同地区电离层中 ELF 源向下传播衰减时, 获得的结论是基于的同一背景电离层参数, 而实际上, 随着地理纬度的变化, 同一时间不同 I 对应的电离层背景不同, 下面将分析海口 (20°N , 110.3°E , $I = 27.1^{\circ}$), 以及国外主要加热站 HAARP (62.39°N , 145.15°W , $I = 75.8^{\circ}$), EISCAT (69.6°N , 19.2°E , $I = 78.0^{\circ}$), Arcibo (18.3°N , 68.8°W , $I = 45.2^{\circ}$) 在同一时刻 (2017 年 8 月 1 日 12:00, UT) 下, f_{ELF} 为 10Hz 时, 电离层中 ELF 源向下传播 k_1 、 δ 差异, 由于本文的研究 ELF 辐射源是由电离层调制加热形成, 因此在各种背景电离层条件下 ELF 辐射源位于电离层临界频率高度, 图 6 给出海口、HAARP、EISCAT 和 Arcibo 四个地点电子密度和温度的高度剖面. 图 6 表明, 海口、HAARP、EISCAT 和 Arcibo 四个地点对应的临界频率高度分别为 297km、259km、297km 和 242km, 即其高度分别对应各地点 ELF 辐射源所在高度; 在 ELF 源高度以下, 海口和 Arcibo、HAARP 和 EISCAT 电子温度与电子密度强度比较接近, 其原因是其地理纬度比较接近, 但 HAARP 和 EISCAT 的电子温度与密度要明显高于海

口和 Arcibo 两地, 其原因是仿真对应时刻对于高纬度的 HAARP 和 EISCAT 两地为白天, 而对于中低纬度的海口和 Arcibo 两地为夜晚. 图 7 给出同一时刻各地点 ELF 辐射源向下传播 k_1 、 δ 对比. 图 7(a) 表明, 衰减因子 k_1 的最大值主要集中在 100 ~ 110km 高度处, 即 ELF 波向下传播过程中, 其能量的衰减主要发生在电离层由 F 区向 E 区过渡的区域; HAARP 和 EISCAT 两地 k_1 的最大值约是海口和 Arcibo 两地的 4 倍左右. 图 7(b) 显示随着传输高度下降 (即从辐射源到传输高度的距离越远), 相对衰减率 δ 增大, 且当高度低于 120km 时, δ 的增长率快速增加; 海口和 Arcibo、HAARP 和 EISCAT 对应的 δ 分别为 0.2、0.23、0.75 和 0.78, 单从四个地点的地磁倾角 I 的差异看, 其变化规律满足图 3 给出的结论: 随着 I 值增大, δ 值逐渐增大. 但 δ 随 I 值变化的变化率与图 3 是不相同的, 如在图 3 中, 对应地点 Arcibo ($I = 45.2^{\circ}$) 到 EISCAT ($I = 78.0^{\circ}$), δ 由 0.24 变为 0.26, δ 仅变化了 8.3%, 而图 7(b) 中 δ 变化了 239.1%, 两者差异巨大, 其原因是两处仿真 Arcibo 和 EISCAT 所用的背景电离层参数差异很大. 又如, 在图 3 中, 对应地点 HAARP ($I = 75.8^{\circ}$) 到 EISCAT ($I = 78.0^{\circ}$), δ 由 0.251 变为 0.26, δ 变化了约 4.0%, 对应图 7(b) 中 δ 变化了 4%, 两者差异很小, 其原因是两处仿真中 HAARP 和 EISCAT 背景电离层参数比较接近.

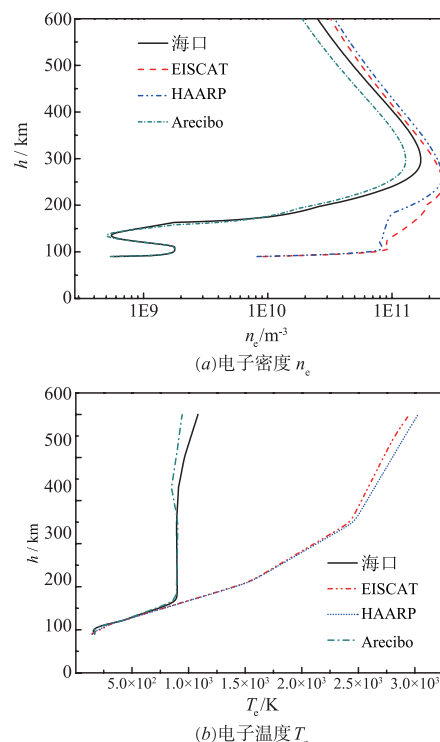


图6 背景电离层参数对比

图 6、图 7 结果表明, 随着电离层参数 (电子密度、温度) 的改变, 电离层中 ELF 辐射源向下传播的 k_1 、 δ 将

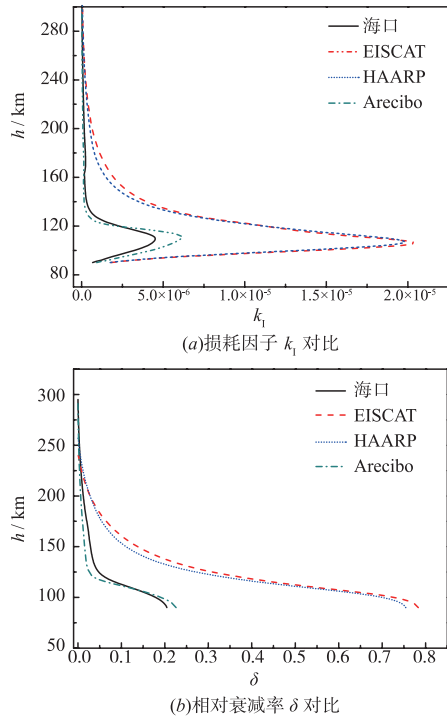


图7 不同地点ELF辐射源向下传播参数对比

发生改变. 设 n_{e0} 、 T_{e0} 分别表示初始背景电离层电子密度和电子温度, 对应的相对衰减率用 δ_0 表示, 则 n_e/n_{e0} 、 T_e/T_{e0} 和 δ/δ_0 表示电子密度变化、电子温度变化和相对衰减率变化, 以图 1 对应参数作为背景电离层初始参数, 图 8 给出了电子密度变化、电子温度变化与相对衰减率 δ 变化的关系, 其中传输频率 f_{ELF} 为 10Hz. 图 8 表明, 随着电子密度或电子温度的增大, 相对衰减率增大, 但其增长率随着电子密度或电子温度的增大逐渐减小, 该结论是图 7(b) 不同地区 δ 存在较大差异的重要原因, 如 Arecibo 和 EISCAT 两地. 同时, δ 受电子密度的变化的影响要明显强于受电子温度变化的影响. 综合上面分析, 电离层中 ELF 辐射源为在电离层中得到较好的传输效果, 应选择背景电子密度和温度较弱时段, 即夜间时段.

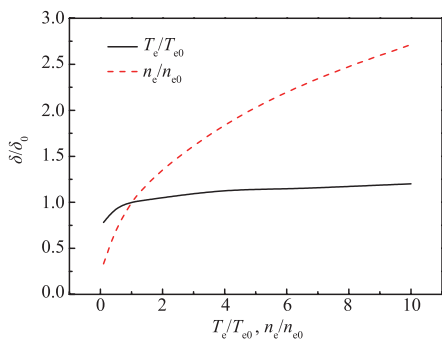


图8 背景电离层参数变化对相对衰减率的影响

4 结论

本文基于磁流体力学的基本方程, 通过对电离层中 ELF 辐射源场分析, 建立 ELF 辐射源在电离层中向下传播衰减模型, 分析地磁倾角、传输频率和背景电离层电子密度和温度对相对衰减率的影响. 研究表明随着地磁倾角的增大, 相对衰减率增大, 因此位于中低纬度地区, 地磁倾角低于高纬度地区, 有利于电离层中 ELF 源的辐射; 存在一个最优传输频率, 使得相对衰减率最小; 相对衰减率又随着背景电子密度或电子温度的增大而增大.

根据目前电离层调制加热激励 ELF 辐射技术水平来看, ELF 辐射效率相对较低, 对于工程运用如对潜通信而言, 还存在一定的差距, 因此通过本文的研究, 选择合适的传输频率、合适时间段, 将促进电离层调制加热激励 ELF 辐射向应用的发展. 同时, 通过增强加热系统能力以增强 ELF 辐射源强度、采用预加热方式改变背景电离层参数等方法来增强 ELF 辐射效率, 将是本文作者下一步研究探讨的内容.

参考文献

- [1] Armand N A, Semenov I P, Chertok B E, et al. Experimental researches in the ionosphere of the earth of the radiation of loop antenna in a range VLF waves, installed onboard the orbital complex "Progress-28"- "Souz TM-2" [J]. Radiotekhnika Electronic, 1988, 33: 2225 - 2233.
- [2] Reznikov A E, Rudenchik E A, Sarostin S V. VLF radiation generated by a loop antenna in F2 layer of the ionosphere-2. Interpretation of the measurements [J]. Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics, 1995, 57 (11): 1299 - 1308.
- [3] Willis S W, Davis J R. Radio frequency heating effect on the electron density in the lower E region [J]. Journal of Geophysical Research, 1973, 78(25): 5710 - 5717.
- [4] Stubbe P, Kopka H. Modulation of the polar electrojet by powerful HF waves [J]. Journal of Geophysical Research, 1977, 82(16): 2319 - 2325.
- [5] Ferraro A J, Lee H S, Allshouse R, et al. VLF/ELF radiation from the ionospheric dynamo current system, modulated by powerful HF signals [J]. Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics, 1982, 44(12): 1113 - 1122.
- [6] Barr R, Stubbe P, Kopka H. Long-range detection of VLF radiation produced by heating the auroral electrojet [J]. Radio Science, 1991, 26(4): 871 - 879.
- [7] Platino M, Inan U S, Bell T F, et al. DEMETER observations of ELF waves injected with the HAARP HF transmitter [J]. Geophysical Research Letters, 2006, 33(16): 627 - 642.

- [8] Cohen M B, Inan U S, Golkowski M A. Geometric modulation: A more effective method of steerable ELF/VLF wave generation with continuous HF heating of the lower ionosphere [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2008, 35 (12): L12101.
- [9] Cohen M B, Inan U S, Golkowski M A, et al. ELF/VLF wave generation via ionospheric HF heating: Experimental comparison of amplitude modulation, beam painting, and geometric modulation [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2010, 115 (A12): A02302.
- [10] 李清亮, 杨巨涛, 闫玉波, 等. 中低纬调制高频加热电离层 ELF/VLF 辐射模拟 [J]. *电波科学学报*, 2008, 23 (5): 883 - 887.
- [11] 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.
- [12] Stubbe P, Kopka H, Rietveld M T, et al. ELF and VLF generation by modulated HF heating of the current carrying lower ionosphere [J]. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 1982, 44 (12): 1123 - 1135.
- [13] Moore R C, Inan U S, Bell T F. ELF waves generated by modulated HF heating of the auroral electrojet and observed at a ground distance of ~ 4400 km [J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 112 (A5): A05309.
- [14] Jin G, Spasojevic M, Cohen M B, et al. Utilizing nonlinear ELF generation in modulated ionospheric heating experiments for communications applications [J]. *Radio Science*, 2013, 48 (1): 61 - 68.
- [15] Kuo S P, Lee M C. On the VLF wave generation by beating of two HF heaters [J]. *Physics of Plasmas*, 2017, 24 (2): 022902.
- [16] Kuo S P, Snyder A, Kossey P, et al. Beating HF waves to generate VLF waves in the ionosphere [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2012, 117 (A3): A03318.
- [17] Fedorenko Y, Tereshchenko E, Pilgaev S, et al. Polarization of ELF waves generated during "beat-wave" heating experiment near cutoff frequency of the earth-ionosphere waveguide [J]. *Radio Science*, 2014, 49 (11 - 12): 1254 - 1264.
- [18] Papadopoulos K, Gumerov N A, Shao X, et al. HF driven currents in the polar ionosphere [J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38 (12): L12103.
- [19] Eliasson B, Chang C L, Papadopoulos K. Generation of ELF and ULF electromagnetic waves by modulated heating of the ionospheric F2 region [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2012, 117 (A10): A10320.
- [20] 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]. *Journal of Geophysical Research*, 2008, 113 (A6): A06301.
- [21] Lehtinen N G, Inan U S. Full-wave modeling of transionospheric propagation of VLF waves [J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36 (3): L03104.
- [22] 李凯, 潘威炎, 苗永瑞. 星载的 VLF 发射环天线在海面上产生的场 [J]. *电波科学学报*, 1998, 13 (1): 21 - 26.
- [23] 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. 341 - 417.

作者简介



杨巨涛 男, 1982 年生于湖南. 现为中国电波传播研究所高级工程师, 主要研究方向为电波传播和等离子体物理.
E-mail: yyjt521@126.com



李清亮 男, 1963 年生于河南. 现为中国电波传播研究所研究员, 中国电子科技集团公司集团首席科学家. 主要研究方向为电波传播, 空间环境调控技术, 目标及其环境特性等.
E-mail: liq1220103@126.com



郝书吉 男, 1978 年生于河南. 现为中国电波传播研究所研究员. 主要研究方向为电波传播、空间环境调控技术等.



董慧 女, 1978 年生于河北. 现为中国电波传播研究所高级工程师. 主要研究方向为电波传播、数值分析与仿真等.