

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2016.11.010

引用格式:张驰,芮国胜,王瑞,等. 计算电离层 VLF 波传输特性的时域有限差分算法[J]. 电讯技术,2016,56(11):1235-1241. [ZHANG Chi, RUI Guosheng, WANG Rui, et al. A finite difference time domain algorithm for calculating VLF wave transmission characteristics in ionosphere [J]. Telecommunication Engineering, 2016, 56(11):1235-1241.]

计算电离层 VLF 波传输特性的时域有限差分算法*

张 驰**a, 芮国胜^b, 王 瑞^b, 薛 鹏^b

(海军航空工程学院 a. 研究生管理大队; b. 电子信息工程系, 山东 烟台 264001)

摘 要:在星载甚低频(VLF)通信技术中,研究甚低频信号在电离层中的传输特性具有重要意义。现有的利用时域有限差分(FDTD)算法研究电离层传输特性大多基于高频脉冲信号,且传播模型相对粗略,计算存在一定误差。为此,建立了更为精确的电离层各向异性传播模型,对常规的 FDTD 算法引入变步长因子,并用该算法对 VLF 波在电离层中的场强衰减进行了数值计算,研究了昼夜变化及频率对其传输特性的影响。仿真结果与卫星实测数据对比表明:与常规的 FDTD 算法以及全波分析方法相比,引入变步长因子的 FDTD 算法精度更高;在 VLF 频段,降低频率有利于电磁波穿透电离层,且白天的衰减明显大于夜间;VLF 波在射入电离层并穿透 D 层时衰减严重(30~40 dB),约为 F1 层中衰减的 3 倍。

关键词:甚低频通信;甚低频波;电离层传输特性;时域有限差分算法;变步长因子

中图分类号:TN011 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2016)11-1235-07

A Finite Difference Time Domain Algorithm for Calculating VLF Wave Transmission Characteristics in Ionosphere

ZHANG Chi^a, RUI Guosheng^b, WANG Rui^b, XUE Peng^b

(a. Graduate Students' Brigade; b. Electronic Information Engineering Department, Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China)

Abstract: Research on very low frequency(VLF) signal transmission characteristics in the ionosphere is vital for satellite VLF communications. Existing finite difference time domain(FDTD) algorithms on the study of ionospheric propagation properties are mostly based on high-frequency pulse signal and propagation model is relatively coarse, and there is a certain calculation error. Therefore, a more precise anisotropic ionospheric propagation model is established, and variable step size factor is introduced to conventional FDTD method. With the algorithm, VLF wave field in the ionosphere strong attenuation is calculated to study the frequency changes and effect on the transmission characteristics of day and night. Comparison between simulation results and satellite data shows that compared with the conventional FDTD algorithm and full-wave analysis method, FDTD method introducing variable step factor has a higher calculation accuracy; at VLF band, reducing the frequency is helpful for electromagnetic waves to penetrate the ionosphere and the attenuation during the day is significantly greater than that at night; VLF waves attenuate greatly in entering the ionosphere and penetrating the D layer (30~40 dB), which is about 3 times in F1 layer.

Key words: very low frequency(VLF) communication; VLF wave; ionosphere transmission characteristics; finite difference time domain(FDTD) algorithm; variational step factor

* 收稿日期:2016-04-22;修回日期:2016-06-12 Received date:2016-04-22;Revised date:2016-06-12
基金项目:国家自然科学基金资助项目(41476089)
Foundation Item:The National Natural Science Foundation of China(No. 41476089)
** 通信作者:1322635768@qq.com Corresponding author:1322635768@qq.com

1 引言

甚低频(Very Low Frequency,VLF)通信应用领域广阔,具有极其重要的意义。目前的地基发信台存在体积庞大、易受破坏、天线辐射效率低、接收点信号微弱等缺点。为了解决以上问题,开发新的甚低频通信手段与传统地基发信台形成互补已势在必行,而星载甚低频通信技术可以很好地解决在实际应用中面临的这些问题^[1-4]。目前,对 VLF 波在海水及地面波导中传播的理论研究已较为成熟,因此,决定星载甚低频通信是否可行的关键因素是 VLF 波能否穿透电离层。已有一些学者对相关问题进行了研究。文献[5]对强电磁脉冲向上穿透电离层的幅值和频谱进行研究,为低轨卫星等飞行器的电磁脉冲防护设计提供了参考。文献[6]介绍了目前卫星通信的频段分布并对其进行了对比,对 S 频段卫星通信给出了链路预算。文献[7]用指数时域有限差分(Finite Difference Time Domain,FDTD)方法模拟了电磁脉冲在电离层中的传播。文献[8]应用 Z 变换获得 FDTD 推导中电位移矢量 D 到电场强度 E 的迭代关系式,并分析了高频雷达信号在电离层中的传播特性。文献[9]计算了电磁波折射率与电子浓度随高度的变化关系。文献[10]采用有限差分时分域法进行电磁场数值模拟,建立了电磁波透地通信 FDTD 数值计算模型,并利用实际测井数据进行了仿真计算。文献[11]通过传播矩阵法计算了均匀半空间电离层的反透射系数。Lehtinen 和 Inan^[12]采用基于全波有限单元逼近的 FWM 方法定量分析了澳大利亚 VLF 人工源 NWC 在电离层中激发的响应。这些研究方法各具特点且行之有效,但就应用背景而言,文献[5-9]多是基于高频电磁脉冲,且传播模型比较简单,存在一定的误差,FDTD 步长的选取也是固定不变的,而文献[10]研究对象为地层中电磁波的传播情况;就研究方法而言,文献[11]采用传播矩阵法对低频地震电磁辐射信号进行了研究,但是对于电离层中复杂的各向异性介质,其计算结果准确度不够,因而在星载甚低频通信的分析及应用上存在局限性,理论结果尚需完善。

本文从 Maxwell 方程组出发,针对甚低频信号,通过建立 VLF 电磁波在电离层中传播的数学模型,采用变步长的时域有限差分算法对其在电离层中的传输特性进行了数值计算,并与现有 DEMETER 卫星观测结果进行了对比分析,为星载甚低频通信的工程实现提供了理论支撑。

2 系统模型

2.1 VLF 波在电离层中传播原理

VLF 波在电离层中传输特性研究是实现星载甚低频通信的基础。当 VLF 波在电离层中的传播方向垂直于地磁场时,可得到两个均为线极化波的电磁波分量,分别为寻常波和非寻常波。当 VLF 波传播方向平行于地磁场时,同样得到两个传播分量,而此时这两个分量均为圆极化波,分别为左旋和右旋。其中,非寻常波占有比例很大,且寻常波在电离层中传播衰减较大,而非寻常波衰减较小,这保证了 VLF 信号能够穿透电离层。

2.2 电离层传播模型

电离层呈水平分层结构^[13],一般分为 D 层(所在高度 60 ~ 90 km)、E 层(90 ~ 160 km)、F1 层(160 ~ 220 km)和 F2 层(延伸 1 000 km 以上),电子密度在 300 km 高度附近达到最大值。此外,电离层还存在不均匀结构,如偶发 E 层和扩展 F 层。其中,D 层对电磁波的吸收和削弱具有关键影响,F2 层对无线通信十分重要,因为 F2 层全天存在,而 D 层、E 层和 F1 层在夜间基本消失,仅 F2 层仍可用于无线通信,且其所在高度能够容纳最长的传播路径,具有最高的可用频率。

电离层分层结构是理想状态,实际电离层随经纬度呈现复杂的空间变化,并且在时间上随昼夜、季节、太阳黑子周等变化。电离层特性主要由电子密度、离子密度、碰撞频率、电子温度等参量的空间分布来描述。由经典理论知,电磁波在介质中的传播是受到介质中带电粒子影响,特别是电子在电磁波作用下,以电磁波的频率振动时激发电磁辐射的结果。在 VLF 频段,电波频率远大于离子回旋频率,但与电子回旋频率差别不大,所以可忽略离子对电波传播的影响,重点研究电子密度及电子碰撞频率对传播的影响即可。电离层中电磁波传播的物理模型如图 1 所示。

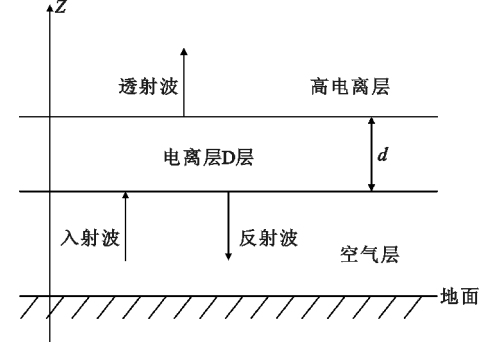


图 1 电离层中电磁波传播模型
Fig.1 Electromagnetic wave propagation model in the ionosphere

目前,国际上广泛使用的最新电离层模型是 2000 年由国际无线电科学联盟(URSI)和空间研究委员会(COSPAS)推荐的国际参考电离层 2000 (IRI2000)^[14-15]。

为了便于将文中仿真计算结果与 DEMETER 卫星对澳大利亚地面 Ω 导航台 NWC 发射的 VLF 信号的观测结果进行比较,根据国际参考电离层 2000 (IRI2000),得到 2015 年 11 月 1 日 Ω 导航台所在地区(南纬 21.8°,东经 114.2°)白天及夜间的电子密度 N_e 和电子碰撞频率 ν 随高度变化的曲线,如图 2 和图 3 所示。同理,可以得到其他地区的参数变化曲线。

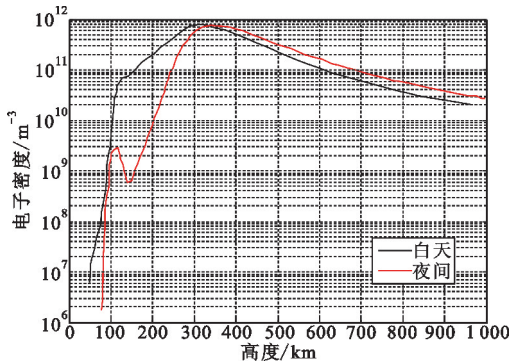


图 2 2015 年 11 月 1 日电子密度

Fig. 2 Electron density on November 1, 2015

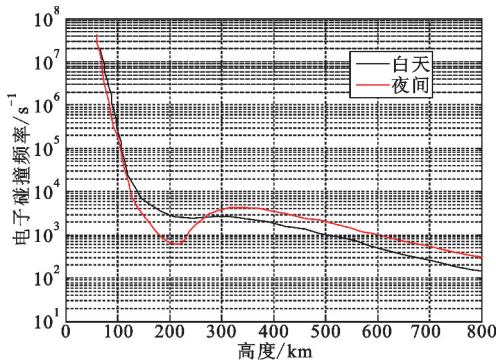


图 3 2015 年 11 月 1 日电子碰撞频率

Fig. 3 Electron collision frequency on November 1, 2015

电离层是不均匀色散介质,电子浓度 N_e 和电子碰撞频率 ν 随高度而变,介电常数 ε 也随之改变。由此建立了电离层系统传播模型,其电参量随高度不断变化,取值也更为准确。

3 FDTD 算法应用

3.1 相关参量

在电离层中,等离子体的固有振荡频率可表

示为

$$\omega_p = \sqrt{\frac{N_e e^2}{m_e \varepsilon_0}} \tag{1}$$

其中, N_e 为等离子体电子密度; m_e 和 e 分别为电子质量和电量; ε_0 为真空中介电常数。

当考虑电子碰撞时,磁导率 $\mu \approx \mu_0$, μ_0 为真空中磁导率;介电常数 $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$, 且相对介电系数 ε_r 为

$$\varepsilon_r = 1 + \frac{\omega_p^2}{\omega(j\nu - \omega)} \tag{2}$$

式中: ω 为入射信号频率; ν 为电子平均碰撞频率。

3.2 FDTD 递推算法

在上节建立的电离层传播模型基础上,Maxwell 方程组可写为

$$\nabla \times \boldsymbol{H} = \varepsilon \frac{\partial \boldsymbol{E}}{\partial t} + \boldsymbol{J} \tag{3}$$

$$\nabla \times \boldsymbol{E} = -\mu \frac{\partial \boldsymbol{H}}{\partial t} \tag{4}$$

$$\frac{\partial \boldsymbol{J}}{\partial t} + \nu \boldsymbol{J} = \varepsilon \omega_p^2 \boldsymbol{E} \tag{5}$$

电位移矢量 $\boldsymbol{D}$ 与电场强度 $\boldsymbol{E}$ 之间的本构关系为

$$\boldsymbol{D} = \varepsilon \boldsymbol{E} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \boldsymbol{E} \tag{6}$$

式中: $\boldsymbol{H}$ 为磁场强度; $\boldsymbol{E}$ 为电场强度; $\boldsymbol{J}$ 为感应电流密度; $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$ 为介电常数; $\mu \approx \mu_0$ 为磁导率; ν 为等电子平均碰撞频率; ω_p 为等离子体固有振荡频率。其中,电离层相对介电常数 ε_r 在频域的表达式为

$$\varepsilon_r(\omega) = 1 + \frac{\omega_p^2}{\omega(j\nu - \omega)} = 1 + \frac{\omega_p^2/\nu}{j\omega} - \frac{\omega_p^2/\nu}{j\omega + \nu} \tag{7}$$

综上可知,图 1 中所建立的系统模型参数随高度变化,可视为以垂直地面向上为 z 轴正向的一维情况。由此,在直角坐标系下,式(3)~(6)可简化为

$$\frac{\partial H_y}{\partial z} = -\varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{\partial E_x}{\partial t} - J_x \tag{8}$$

$$\frac{\partial E_x}{\partial z} = -\mu \frac{\partial H_y}{\partial t} \tag{9}$$

$$\frac{\partial J_x}{\partial t} + \nu J_x = \varepsilon_0 \varepsilon_r \omega_p^2 E_x \tag{10}$$

$$\boldsymbol{D}_x = \varepsilon \boldsymbol{E}_x = \varepsilon_0 \varepsilon_r \boldsymbol{E}_x \tag{11}$$

用中心差分对式(8)和式(9)取二阶精度,可得一维 Maxwell 方程的 FDTD 离散式:

$$\begin{aligned} E_x^{(n+1)}(k) &= E_x^n(k) - \frac{\Delta t}{\varepsilon_0 \varepsilon_r \Delta z} \left[H_y^{(n+\frac{1}{2})}(k+\frac{1}{2}) - H_y^{(n+\frac{1}{2})}(k-\frac{1}{2}) \right] - \frac{\Delta t}{\varepsilon_0 \varepsilon_r} J_x^{(n+\frac{1}{2})}(k), \\ J_x^{(n+\frac{1}{2})}(k) &= J_x^{(n-\frac{1}{2})}(k) + \frac{\Delta t}{\varepsilon_0 \varepsilon_r} \left[E_x^{(n)}(k) - E_x^{(n-1)}(k) \right] \end{aligned} \tag{12}$$

$$H_y^{(n+\frac{1}{2})}(k+\frac{1}{2})=H_y^{(n-\frac{1}{2})}(k+\frac{1}{2})-\frac{\Delta t}{\mu\Delta z}[E_x^{(n)}(k+1)-E_x^{(n)}(k)]。(13)$$

式中:Δt 和 Δz 分别为时间步长和空间步长。根据式(10)的频域表达式,可得 J_x 与 E_x 的本构关系为

$$J_x=\frac{\varepsilon_0\varepsilon_r\omega_p^2}{j\omega+v}E_x, (14)$$

进而得到其 FDTD 差分迭代公式:

$$J_x^{(n+\frac{1}{2})}(k)=J_x^{(n-\frac{1}{2})}(k)e^{-v\Delta t}+\frac{\varepsilon_0\varepsilon_r\omega_p^2}{v}[1-e^{-v\Delta t}]E_x^{(n)}(k)。(15)$$

将式(13)和式(15)代入式(12),即可进行 FDTD 时域递推计算。

3.3 空间步长 Δz 的选取

对于第 2 节中所建立的电离层传播模型,电离层参量随高度变化,尤其是在60 km、90 km、160 km 这些电离层分层处波动剧烈。这时,如果在每个高度上都用稠密的空间步长 Δz 来进行计算,将需要计算机较长的运行时间;如果全部采用稀疏的空间步长 Δz, FDTD 的计算结果将产生较大的误差。

由于 VLF 波长较大,根据经验,本文在用传统 FDTD 算法进行计算时,空间步长 Δz 取值为1 km。由 FDTD 稳定性条件,时间步长 Δt 取值为 Δz_{min}/2c, 其中 c 为光速,Δz_{min} 为所取空间步长的最小值,则 Δt=5/3 μs。

在此,引入变步长因子 q,使得 Δz 随着传播介质属性的变化而变化,在不影响计算时间复杂度的同时提高计算精度。具体方法是:在电离层各层交界的高度附近,采用较小的空间步长;而在各层的中心处,采用较大的空间步长。此外,需要使相邻的两个空间步长缓慢变化,否则可能导致数值色散从而引起误差增大。Δz 示意图见图 4。

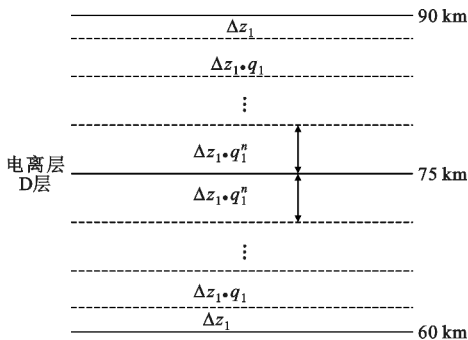


图 4 电离层 D 层空间步长 Δz 示意图
Fig. 4 A visual illustration space step Δz of D attenuation in the ionosphere

高度在 60 km 时,空间步长拟定为 Δz₁ = 0.5 km,D 层中迭代计算共取 30 步,即 n=15,Δz 从 0.5 km 开始按恒定增长比率 q₁ 递增 15 步,经过中间高度(75 km)达到 0.5 · q₁¹⁵ km,随后再以 q₁ 的比率递减,到90 km时 Δz 变回0.5 km。则由等比数列求和公式,可得

$$S=2\times\frac{\Delta z_1(1-q_1^n)}{1-q_1}。(16)$$

式中:S=30 km;Δz₁=0.5 km;n=15。由此可以求得电离层 D 层中的变步长因子 q₁。同理,在电离层其他分层中,初始空间步长均设为0.5 km,变步长因子 q 也可用此法求得,从而得到各高度的空间步长 Δz。由 FDTD 稳定性条件,Δt 取5/6 μs。

将 Δz 与 Δt 代入 FDTD 时域递推公式,对入射 VLF 波进行差分迭代,再经过傅里叶变换即可求得 VLF 波的透射系数 T 和衰减量 A^[16] 分别为

$$T=\left|\frac{E_t}{E_r}\right|, (17)$$

$$A=-10\lg|T|^2。 (18)$$

式中:E_r 和 E_t 分别为入射 VLF 波和透射 VLF 波的电场振幅稳态解。

当选择网格单元长度足够小时,其数值色散可以降低。然而,随着时间步长和网格单元长度的减小,计算网格的数目增加,相应的计算时间和数值色散也要增加。因此,在实际问题分析中不可能无限地减小步长,且固定的步长会降低计算精度。本节引入变步长的 FDTD 算法,针对电离层具体的分层特性,在电离层交界处采用较小的空间步长,在各层中心采用较大的空间步长,折衷了步长过小或固定步长的优劣势,由此提高了计算精度。

4 仿真分析

本节将首先通过仿真对算法的计算精度进行验证,然后对 VLF 波在电离层中的传输特性进行实验分析。

4.1 实测数据与仿真验证

为了验证本文算法对模型的计算精度,将澳大利亚 Ω 导航台发射的 VLF 信号源在特定纬度上的计算结果与全波法计算结果以及卫星实测数据^[17] 进行比较。计算条件和参数为:发射源为中心频率 19.8 kHz,带宽300 Hz的脉冲信号,介质中电子浓度和电子碰撞频率由 2.2 节中的传播模型得到,入射

角近似为 90° 。从南纬 17° 到南纬 25° 的传播衰减变化如图 5 所示。

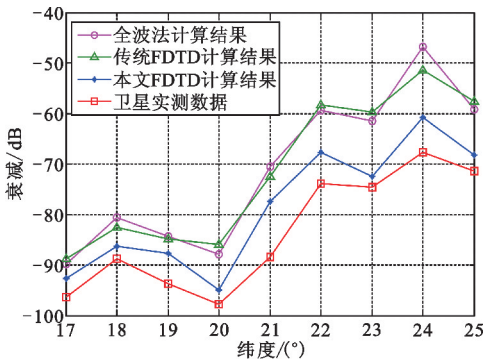


图 5 计算结果与卫星实测数据比较
Fig. 5 Comparison between calculation results and actual satellite data

由图 5 可见,计算结果与卫星观测结果具有很好的-致性,证明了算法的有效性。其中,传统 FDTD 算法与全波法计算值相差不大,而引入变步长因子的 FDTD 计算结果更接近卫星实测数据,计算精度获得了提升。而计算衰减量略小于卫星观测值,这可能是由于算法实现时计算步数选取较少、数值色散或者没有考虑电离层噪声的影响而造成的。

4.2 电离层传输特性仿真

下面利用变步长 FDTD 算法,研究昼夜变化以及 VLF 波频率对电离层 VLF 传输特性的影响。

4.2.1 昼夜变化对传输特性的影响

仍采用中心频率 19.8 kHz、带宽 300 Hz 的脉冲信号,通过文中所建模型,计算 VLF 波场强白天和夜晚时随高度的衰减,结果如图 6 所示。

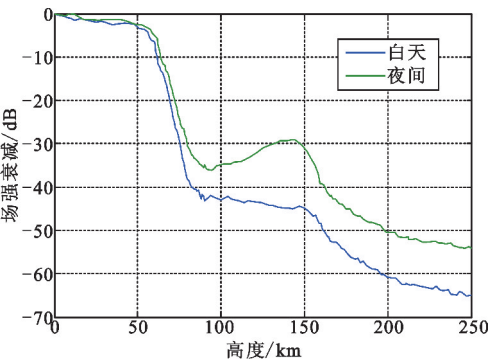


图 6 白天和夜间 VLF 波随高度的衰减
Fig. 6 Attenuation of VLF wave with height in day and night

可以看出,白天和夜间 VLF 波虽然衰减趋势大致相同,但白天的衰减要明显大于夜间,这与实际情

况相符。另外,VLF 波在夜间100 ~ 150 km高度上场强出现局部增强的现象,这是由于夜间电子密度与电子碰撞频率变化,使得等离子体固有振荡频率与 VLF 频率接近,从而引发谐振造成的。

4.2.2 频率对传输特性的影响

本节重点研究白天 VLF 波在电离层 D 层和 F1 层中的衰减特性,并分析入射波频率对其透射系数的影响。

图 7 反映了 15 kHz、19.8 kHz、25 kHz 3 种不同频率的 VLF 波在白天随高度的衰减情况。可以看出,在电离层中,15 kHz 的 VLF 波衰减最小,19.8 kHz 次之,而 25 kHz 的 VLF 波衰减最为严重。这说明在 VLF 频段,随着频率的增大,电磁波的衰减也越来越大。其中,VLF 波在射入电离层并穿透 D 层的过程中衰减最为严重,达到 30 ~ 40 dB,约为 F1 层中衰减(10 ~ 15 dB)的 3 倍,而在其他高度衰减较小。

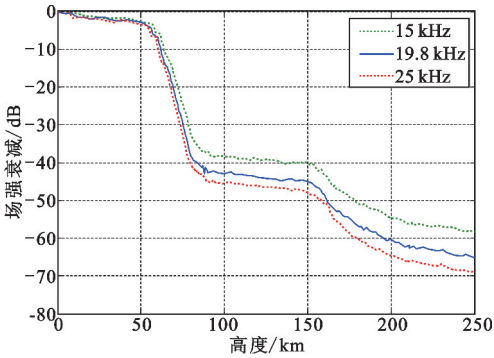


图 7 不同频率 VLF 波随高度的衰减
Fig. 7 Attenuation VLF wave with height of different frequency

为了进一步探究频率对 VLF 波在电离层中衰减的影响,分别计算了10 ~ 30 kHz 的 VLF 波在 D 层及 F1 层中的透射系数,结果如图 8 所示。

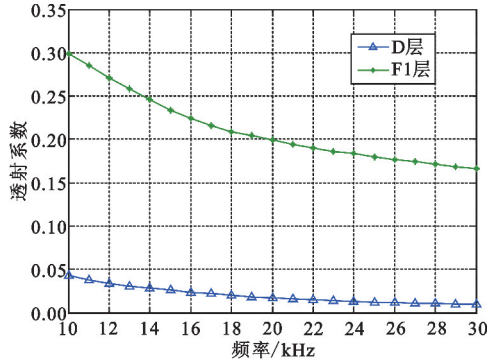


图 8 D 层及 F1 层透射系数随频率变化
Fig. 8 Penetrance coefficient with frequency in D and F1 attenuation

由图 8 可以更加直观地发现,VLF 波在电离层 D 层的透射系数仅为 0.01 ~ 0.04,远远小于 F1 层,且 VLF 波的频率越小,透射系数越大。这是由以下原因造成的:

(1)D 层相较于 F1 层,相对介电常数 ϵ_r 随高度变化更加剧烈,使得等离子体对 VLF 波衰减作用更大;

(2)大气层与电离层交界处的边界效应使得 VLF 波在射入 D 层时获得了较大的衰减;

(3)反射耦合随着入射波频率的增加而增加,即降低频率有利于 VLF 波穿透电离层。

5 结束语

本文从 Maxwell 方程组出发,结合电磁波在电离层中的传播原理,建立了更为完善的电离层各向异性系统模型,通过引入变步长因子,提高了传统 FDTD 算法的计算精度;用该算法对 VLF 波在电离层中的衰减特性进行了数值仿真,研究了频率及昼夜变化对 VLF 在电离层中传输特性的影响。数值仿真和分析表明,降低频率有利于 VLF 波穿透电离层,白天的衰减明显大于夜间;其中,电离层 D 层对 VLF 传播衰减影响最大,F1 层次之,而其他分层衰减较小。该算法对计算机内存要求较高,仍存在一定的局限性。

本文研究结果为星载甚低频通信的工程实现提供了理论支撑,但实际的电离层传播机理更加复杂,VLF 下行链路分析、接收机设计以及电离层噪声干扰问题是下一步研究的重点。

参考文献:

- [1] 杨红俊. 国外数据中继卫星系统最新发展及未来趋势[J]. 电讯技术,2016,56(1):109-116.
YANG Hongjun. Latest development progress and trends of foreign data relay satellite systems[J]. Telecommunication Engineering,2016,56(1):109-116. (in Chinese)
- [2] 夏维华,王一璐. 潜艇通信系统综述[J]. 计算机与网络,2002,6(7):55-57.
XIA Weihua, WANG Yilu. Review of submarine communication system[J]. Computer & Network,2002,6(7):55-57. (in Chinese)
- [3] THOMPSON G C. Design of an ELF/VLF satellite for under the ice submarine communications[D]. Monrerey, USA:Naval Postgraduate School,1988.
- [4] 刘汉超,梁昊. 卫星移动通信系统低信噪比抗干扰数字接收机设计[J]. 电讯技术,2014,54(10):1418-1423.
LIU Hanchao, LIANG Hao. Design of an anti-interference digital receiver for satellite mobile communication systems in low SNR application[J]. Telecommunication Engineering,2014,54(10):1418-1423. (in Chinese)
- [5] 李宏杰,刘得成. 强电磁脉冲在空间中的传播[C]//第十届全国抗辐射电子学与电磁脉冲学术年会论文集. 三亚:中国电子学会,2009:405-410.
LI Hongjie, LIU Decheng. Propagation of strong electromagnetic pulse in space[C]//Proceedings of the Tenth National Anti-radiation Electronics and Electromagnetic Pulse Annual Academic Conference. Sanya:Chinese Institute of Electronics,2009:405-410. (in Chinese)
- [6] 尚俊娜,李林,刘春菊,等. S 频段低信息速率卫星通信系统的探索和实验[J]. 电讯技术,2016,56(1):54-59.
SHANG Junna, LI Lin, LIU Chunju, et al. Exploration and experiment of low information rate satellite communication system in S-band[J]. Telecommunication Engineering,2016,56(1):54-59. (in Chinese)
- [7] 叶志红,廖成,傅海军. 电磁脉冲在电离层中传播特性的分析[J]. 科学技术与工程,2011,11(19):4449-4452.
YE Zhihong, LIAO Cheng, FU Haijun. Analysis of electromagnetic pulse propagation in the ionosphere[J]. Science Technology and Engineering,2011,11(19):4449-4452. (in Chinese)
- [8] 吴跃丽,葛德彪,叶明. 用 FDTD 及 Z 变换方法分析电离层中电磁波传播[J]. 杭州电子工业学院学报,2002,22(6):57-60.
WU Yueli, GE Debiao, YE Ming. Analysis of electromagnetic wave propagation in ionosphere by using FDTD combined with Z transform method[J]. Journal of Hangzhou Institute of Electronic Engineering,2002,22(6):57-60. (in Chinese)
- [9] 虞超,沈国柱,顾斌,等. 电磁波在电离层的传播特性研究[J]. 南京信息工程大学学报(自然科学版),2013,5(4):379-384.
YU Chao, SHEN Guozhu, GU Bin, et al. Characteristics of electromagnetic wave propagating through ionosphere[J]. Journal of Nanjing University of Information Science and Technology(Natural Science Edition),2013,5(4):379-384. (in Chinese)
- [10] 苏毅,许泽玮,骆科东. 基于 FDTD 的电磁波透地通信分层传输模型数值计算[J]. 传感器与微系统,2016,35(4):123-126.
SU Yi, XU Zewei, LUO Kedong. Numerical calculation of hierarchical transmission model of electromagnetic wave communication through formation based on FDTD[J]. Transducer and Microsystem Technologies,2016,

- 35(4):123-126.
- [11] 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 Shufan, SHEN Xuhui, ZHANG Xuemin, 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)
- [12] LEHTINEN N G, INAN U S. Full-wave modeling of transionospheric propagation of VLF waves[J]. Geophysicale Research Letters, 2009, 36(3):151-157.
- [13] 黄捷. 电波大气折射误差修正[M]. 北京:国防工业出版社,2000:25-63.
- HUANG Jie. Correction foratmospheric refractive error of radio wave[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2000:25-63. (in Chinese)
- [14] BILITZA D. International reference ionosphere 200[J]. Radio Science, 2001, 36(2):261-275.
- [15] BILITZA D. International reference ionosphere - status 1995/96[J]. Advance Space Research, 1997, 20(9):1751-1754.
- [16] 焦淑卿,冯德光. 等离子体鞘套的反射系数与穿透系数[J]. 数学物理学报,1984,4(4):456-466.
- JIAO Shuqing, FENG Deguang. Plasma sheath of the reflection coefficient and transmission coefficient of the double exponential distribution[J]. Journal of Mathematical Physics, 1984, 4(4):456-466. (in Chinese)
- [17] 赵庶凡. 地震岩石层-大气层-电离层耦合机理研究[D]. 北京:中国地震局地震预测研究所,2010.
- ZHAO Shufan. Research of lithosphere-atmosphere-ionospherecoupling mechanism related to earthquakes[D]. Beijing: Institute of Earthquake Science, China Earthquake Administration, 2010. (in Chinese)

作者简介:



张 弛(1992—),男,山东烟台人,2014 年于海军航空工程学院获工学学士学位,现为硕士研究生,主要研究方向为无线通信及信号处理;

ZHANG Chi was born in Yantai, Shandong Province, in 1992. He received the B. S. degree from Naval Aeronautical and Astronautical University in 2014. He is now a graduate student. His research concerns wireless communication and signal processing.

Email:1322635768@qq.com

芮国胜(1968—),男,山东烟台人,2000 年于哈尔滨工程大学获博士学位,现为教授、博士生导师,主要研究方向为现代通信系统、非线性滤波理论、小波理论与应用等;

RUI Guosheng was born in Yantai, Shandong Province, in 1968. He received the Ph. D. degree from Harbin Engineering University in 2000. He is now a professor and also the Ph. D. supervisor. His research concerns modern communication system, nonlinear filter theory, wavelet theory and its application, etc.

王 瑞(1985—),男,河南周口人,2015 年于海军航空工程学院获博士学位,现为讲师,主要研究方向为无线通信及信号处理;

WANG Rui was born in Zhoukou, Henan Province, in 1985. He received the Ph. D. degree from Naval Aeronautical and Astronautical University in 2015. He is now a lecturer. His research concerns wireless communication and signal processing.

薛 鹏(1985—),男,吉林桦甸人,2013 年于清华大学获工学硕士学位,现为讲师,主要研究方向为新型无线通信技术。

XUE Peng was born in Huadian, Jilin Province, in 1985. He received the M. S. degree from Tsinghua University in 2013. He is now a lecturer. His research concerns new technology of wireless communication.