基于 FDTD 方法的电波在等离子体中传输特性*

郭 彤,彭 坚,肖卫东

(国防科技大学信息系统工程重点实验室,湖南长沙 410073)

摘 要:根据时域有限差分(Finite Difference Time Domain, FDTD)法的基本原理,分析了等离子体的物理 场特性及数值计算,介绍了飞行器再入时等离子鞘的形成以及等离子体相对介电常数对波的衰减,通过三维 FDTD 和二维 FDTD 模拟了电磁波在等离子体中的传播情况,证明了 FDTD 方法是解决电磁波在复杂媒质中 传播的一种有效方法,并探究了飞行器再入段黑障区通信的理论和方法。

关键词: 电磁波传播;时域有限差分;等离子体

中图分类号: 文献标志码:A 文章编号:1001-2486(2013)06-0191-04

The transmission characteristics of radio wave in the plasma based on finite difference time domain

GUO Tong, PENG Jian, XIAO Weidong

(Science and Technology on Information Systems Engineering Laboratory,

National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: According to the basic principles of the finite difference time domain (FDTD) method, firstly the physical field characteristics and the numerical calculation of the plasma were analyzed; and then the reentry plasma sheath formed and plasma relative dielectric constant of the wave attenuation were introduced; lastly the propagation of electromagnetic waves in the plasma with three-dimensional FDTD method and twodimensional FDTD method were simulated. Simulation results proved that the FDTD method is an effective method to solve the electromagnetic wave propagation in the complex medium.

Key words: electromagnetic waves; Finite Difference Time Domain (FDTD); plasma

1 时域有限差分(FDTD)法简介

时域有限差分(FDTD)方法是 Yee 在 1966 年 首先提出来的一种计算电磁场问题的有效方 法^[1],后来由 Mur 及 Taflove 等加以完善和发 展^[2-3],目前已成功地运用于计算和模拟电磁波 的传播、导引、散射和辐射等多个方面^[4]。它所 需的存储空间和运行所需的时间只与所研究空间 的离散网格数成正比。本文根据其特点,研究了 电磁波在等离子体中的传播情况,并模拟了电磁 波在等离子体复杂媒质中的传播,为克服黑障区 通信奠定了理论基础。

FDTD 法的基本原理是把所求解的空间划分 成一定数量的网格,在每个网格上对含 *E*, *H* 的 Maxwell 方程进行空间和时间上的离散化处 理^[5]。如图1 所示,将电场分量置于网格的棱上, 而将磁场分量置于网格面上,直观地表示电磁场 互为旋度的关系,而且用中心差分代替旋度方程

中的微分进行编程,避免了半格空间步长。将 Maxwell 方程在空间和时间上进行离散化处理时, 将每个节点进行编号,节点的编号和其空间坐标 位置按照下面的方式对应起来(i,j,k) < = > ($i\Delta x,j\Delta y,k\Delta z$),而该点的任意函数 F(x,y,z,t)= $F(i\Delta x,j\Delta y,k\Delta z,n\Delta t)$ 在时刻 $n\Delta t$ 的值可以表 示为: $Fn(i,j,k) = F(i\Delta x,j\Delta y,k\Delta z,n\Delta t)$,式中 $\Delta x,\Delta y,\Delta z$ 和 Δt 分别表示 x,y,z沿方向上离散的 空间步长和时间步长。用二阶精度的中心差商代 替微商,可以得到 E和 H的迭代方程,在一定激 励条件下,对这些方程在时间上进行迭代计算,就 可以得到计算空间中任一时刻任一点场的大小。 其具体的迭代公式见文献[6]。

FDTD 优点:在计算机资源允许的条件下,可 以精确地计算出计算区域中每个点的场。其缺点 是:由于受计算机资源限制,可计算的传播区域 有限。

FDTD 对于计算较小区域的电波传播研究十





图 1 FDTD 网络中电磁场分量的分布 Fig. 1 The distribution of electromagnetic field components in the FDTD network

分有利,它能精确地计算出空间场强和相位,并由 此推导出路径损耗,了解信号的概率分布、积累分 布,这些对于无线通信系统的可靠设计是十分有 用的。

2 飞行器再入时的等离子鞘的形成

飞行器再入时,以超高音速进入地球大气层, 飞行器表面与周围的大气发生剧烈的摩擦和强大 的挤压,会产生大量的冲击热,使飞行器表面与周 围部分气体呈粘滞状态,表面热量散发速度降低, 在冲激波与飞行器之间形成一个温度高达几千度 的高温区。当温度高于周围大气的分裂及离子化 温度极限时,高温气体和飞行器表面材料的分子 分解、电离和重新复合,形成一个等离子区,像鞘 套一样包围着飞行器表面。等离子体鞘内电子浓 度在 10¹⁴~10²⁰/m³, 它能吸收和反射电波, 使传 播衰减。当电子密度高于通讯雷达频率的截止密 度时,将造成飞行器与外界通信的暂时中断。随 着飞行器飞行高度的下降,大气密度增大,对飞行 器的阻力也越来越大,使飞行器的速度减小。当 飞行器的速度降到一定程度时,不再有足够的温 度使气体分子电离,等离子体鞘套随之消失,通信 系统可恢复工作,飞行器与外界的通信的暂时中 断得到恢复[7]。

这种在一定的高度和时间内与地面之间的通 信质量严重恶化,甚至通信完全中断的现象被称 为"黑障",该区域称为黑障区。黑障区通信问题 是世界各航天大国一直面临的技术难题,各国分 别采取不同的措施,试图解决这一技术难题。截 至目前,未见到有正式报道声明某国已经完全解 决这一问题。但世界各国都采取一些方法,力图 克服黑障现象造成的不利影响。

3 等离子体相对介电常数对波的衰减

等离子体带有大量的自由电子,电子因为质 量较小,容易对电磁波的传播有很大影响。考虑 等离子体的碰撞,非磁化冷等离子体的相对介电 常数(折射率的平方)可以表示为

$$\varepsilon_r = 1 - \omega_p^2 / \omega (\omega - jv) \tag{1}$$

这里,v是电子与中性气体的碰撞批频率, ω 是电 磁波角频率, $j = \sqrt{-1}$ 。相对介电常数式(1)可以 写为实部和虚部之和。

$$\varepsilon_r = 1 - \omega_p^2 / (\omega^2 + v^2) - jv\omega_p^2 / \omega(\omega^2 + v^2) \quad (2)$$

电磁波在等离子体中的传播常数也可以写为 实部和虚部之和

$$k = k_0 \sqrt{\varepsilon_r} = k_r + jk_i \tag{3}$$

这里, $k_0 = \omega/c$,为真空中的波数;c为真空中的光 速; k_r , k_i 分别为传播常数的实部和虚部。

显然,由于等离子体的碰撞,传播常数 k 出现 虚部,这就意味着电磁波在等离子体中传播时将 被衰减。

为了简单,这里仅讨论均匀非时变等离子体 的情况,此时电磁波的波动方程为

$$d^{2}E(z)/dz^{2} + k^{2}E(z) = 0$$
 (4)

其解为

$$E(z) = E_0 \exp\left[-j \int_0^z k(z') dz'\right]$$
 (5)

解有效的条件为

$$\frac{1}{k^2}\frac{\mathrm{d}k}{\mathrm{d}z}\ll 1\tag{6}$$

电磁波能量是传播距离的函数

$$p(z) = P_0 \exp(-2k_i z) \tag{7}$$

这里,z是电磁波传播距离, P_0 是z = 0处电磁波的 能量。

电磁波的能量衰减为(dB)

Attenuation =
$$\left| 10 \lg \frac{p(z)}{p_0} \right| = 8.69 \left| k_i \right| z$$
 (8)

由此可见,均匀等离子体的电子碰撞能衰减入射 到其内部的电磁波。

4 用时域有限差分法模拟电磁波由空气 到等离子体中的传播

4.1 用时域有限差分法模拟电磁波在空气中的 传播

图 2 是用三维 FDTD 方法模拟波在空气介质中传播时空间各点电场强度分布结果。三维 FDTD 方法非常消耗计算机资源,图 2 仅计算了 50 × 50 × 50 个空间步长,内存占用达 65 M。











图 3 用二维 FDTD 方法计算波在空气中传播时空间 各点电场强度分布

Fig. 3 Calculate the electric field intensity of the point distribution with two-dimensional FDTD method when the wave spread in the air space

图 3 是用二维 FDTD 方法模拟波在空气介 质中传播时空间各点电场强度分布结果。计算了 100×100 个空间步长。从图 3 的轮廓上可以清 晰地看出波的传播规律,能够反映波的传播情况。 如果想进一步更加真实地模拟波的传播情况,需 要进一步将网格剖分得更小一些,当然,占用的计 算机资源非常巨大,花费的时间也更多。

4.2 降维处理

在研究波源被等离子体鞘包围时的传播情况 时,可以简化为点源由空气入射到等离子体区的 传播情况。点源在传播时,是向四周以球面波前 的形式向外传播,由于空气和等离子体的各向同 性特征,所以,这种传播方式是对称的。基于计算 机资源和时间的考虑,可以对这个问题进行降维 处理,三维传播的问题就转化为一维传播的问题。

图 4 和 5 分别是波源频率为 2.2GHz 和 5.6GHz 时用一维 FDTD 方法模拟波由空气向等 离子体区传播时的电场强度分布,其中横坐标为 空间步长,纵坐标为电场强度。电子密度为 10^{10.9} 电子/cm³,等离子体碰撞频率 10⁷/s,剖分网格长 度相等,为工作波长的二十分之一。在第 149 个 空间步长处加入波源,为正弦波。



图 4 波在 2.2GHz 时穿过等离子体时的电场分布 Fig. 4 The electric field distribution when the wave is 2.2GHz through the plasma

如图 4 中第 99 和 200 个空间步长处分别是 自由空间和等离子体区的分界面。



图 5 波在 5.6GHz 时穿过等离子体时的电场分布 Fig. 5 he electric field distribution when the wave is 5.6GHz through the plasma

从图4可以看出,分界面处,经过透射、多次 反射,最终波在等离子体区衰减到很小。如果该 值衰减到某一要求的值以下,通常认为,该波无法 通过等离子体区。从图5可以看出,波在由空气 向等离子体区传播时,衰减很小,可以认为是可以 穿过等离子体区。

从以上计算结果可以看出,这种算法可以简 单地说明波在介质中的传播情况,基本反映了电 磁波信号在穿过均匀非时变等离子体区时的衰减 情况。对于电磁波信号在穿越非均匀时变等离子 体区时的情况,可以采取下述方法处理: 首先,在某一时刻某一区域的等离子体分布 是固定的、不均匀的,处理在该时刻电磁波信号穿 越非均匀等离子体区的情况,可将该区域划分为 若干个微小区域,只要微小区域足够小,则在每一 个区域的等离子体被认为是均匀的,可以用电磁 波信号穿越均匀非时变等离子体区时的方法进行 计算;然后,再选取下一时刻该区域的非均匀等离 子体进行类似的处理。最终可以求得该区域不同 时刻各个点的电场强度分布。

5 结束语

本文应用 FDTD 方法分析了电磁波在等离子 体中的传播情况,并采用三维 FDTD 和二维 FDTD 模拟计算了波在空气中传播时空间各点电场强度 分布情况,然后采用降维方法比较了波在 2.2 GHz 和 5.6 GHz 时穿过等离子体时的电场分布情况。 最后通过该方法精确地计算出空间场强,并由此 能够进一步推导出路径损耗,这些对于实现黑障 区通信有十分重要的参考意义。

参考文献(References)

- [1] Yee K S. Numericalsolution ofinitial boundary value problems involving Maxwell's equation in isotropic media [J]. IEEE Transactions, 1996, 14(3):302 - 307.
- [2] Mur G. Absorbing boundary conditions forfinite difference approximation of the Time-domain electromagneticfield equations [J]. IEEE Transactions, 1981, ENX - 23 (4): 377.382.
- [3] Taflove A. Application of the finite difference timedomain method to sinusoidal steady-state electromagnetic penetration problems[J]. IEEE Transactions, 1980, EMC - 22:191 - 202.
- [4] Taflove A, Hagness S C. Computational electrodynamics: the finite difference time domain method [M]. Boston; Artech House, 2005.
- [5] Young J L. Antennas Propagate. IEEE Transactions, 1995.
- [6] 葛德彪,闫玉波.电磁波时域有限差分法[M].西安电子科技大学出版社,2002.
 GE Debiao, YAN Yubo. The finite-difference time-domain method of Electromagnetic wave [M]. The Press of Xi'an University of Electronic Science and Technology, 2002. (in Chinese)
- [7] 陈松林. 等离子体电磁特征分析[D]. 海军工程大学, 2005.
 CHEN Songlin. The electromagnetic characteristics of plasma [D]. Naval University of Engineering, 2005. (in Chinese)