

电磁波在等离子体中的吸收特性和反射特性研究

贾 龙,马红光,孙璟潇

(第二炮兵工程大学 空间工程系,陕西 西安 710025)

摘 要:飞行器再入时会形成等离子鞘套,而等离子鞘套的形成会严重影响电波的传播,造成通信障碍。因此,需要研究电磁波在等离子鞘套中的传播特性,该文通过理论分析推导了电磁波在等离子体中传播的条件和沿不同方向传播时电磁波传播特性的计算方法。同时利用理论推导的结果来研究了电磁波在等离子体中的吸收特性和反射特性,其结果具有很高的准确性。

关键词:等离子体;吸收特性;反射特性

中图分类号:TN94;TN011 **文献标识码:**A

Study on Absorption and Reflection Characteristics of Electromagnetic Wave in Plasma Sheath

JIA Long, MA Hongguang, SUN Jingxiao

(The Dept. of Space Engineering in Second Artillery Engineering University, Xi'an 710025, China)

Abstract: The plasma sheath will be formed during aircrafts' reentry, and the formation of plasma sheath will seriously affect the spread of the waves, causing the communication barriers. In order to know the transmission characteristics of electromagnetic wave in plasma sheath, this paper deduces the precondition that electromagnetic wave can transmit and the computing method that electromagnetic waves transmit along different directions through theoretical analysis. At the same time, the characteristics of absorption of electromagnetic wave in plasma and reflection characteristics have been studied using the results derived from the theory, and the result has the very high accuracy.

Key words: plasma sheath; absorption characteristic; reflection characteristic

0 引言

当飞行器再入时,由于其速度快,能达到几马赫甚至是十几马赫^[1],飞行器表面及周围的空气会发生电离,从而形成等离子鞘套。目前,关于等离子鞘套的研究很多,电磁波和等离子体之间会相互作用,等离子体对电磁波的许多影响中,吸收和反射特性较受人关注,具有重要的现实意义和应用价值,吸收特性和反射特性会严重影响飞行器与外界的通信状况,轻则电磁波发生衰减,重则导致通信中断,即黑障现象^[2]。本文采用一定的方法分析电磁波在等离子体的吸收和反射特性。本文首先通过理论分析和公式推导得出电磁波要在等离子体中传播需满足的条件及电磁波沿不同方向传播时传播特性的计算方法,且以此方法 MATLAB 编程研究了电磁波在等离子体中的吸收特性及反射特性,为进一步研究等离子鞘套的通信问题提供了一个理论支持。

1 电磁波在等离子体中的传播

首先,需假设等离子体满足磁化条件。

1.1 电磁波的传播方向为 z 方向

根据波动方程:

$$\nabla^2 E + \omega^2 \epsilon E = 0 \quad (1)$$

式(1)处理后的分量形式为

$$\frac{\partial^2}{\partial z^2} \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{pmatrix} + \omega^2 \mu_0 \begin{pmatrix} \epsilon_{11} & \epsilon_{12} & 0 \\ \epsilon_{21} & \epsilon_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{pmatrix} = 0 \quad (2)$$

若假设

$$E = X_0 E_x e^{-ik_z z} \quad (3)$$

此时电磁波满足直线极化条件,将式(2)继续展开可得

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 E_x}{\partial z^2} + \omega^2 \mu_0 \epsilon_{11} E_x = 0 \\ \omega^2 \mu_0 \epsilon_{11} E_x = 0 \end{cases} \quad (4)$$

收稿日期:2014-09-22

作者简介:贾龙(1989-),男,四川南充人,硕士生,主要从事雷达信号处理和对抗技术的研究。E-mail:461976777@qq.com。

使式(4)成立,则必有

$$E_x = 0 \tag{5}$$

此结果表明,如果按先前说的 z 轴传播方向,直线极化波是不能够求的实数解,这就说明沿 z 轴传播的假设存在问题,不能得到满足。

若再假设

$$E = E_0 (X_0 - jY_0) e^{-jk_z z} \tag{6}$$

由式(6)可得此时电磁波为右旋圆极化波,代入式(1),同样采用分量形式可得

$$\frac{\partial^2}{\partial z^2} \begin{pmatrix} E_0 e^{-jk_z z} \\ -jE_0 e^{-jk_z z} \\ 0 \end{pmatrix} + \omega^2 \mu_0 \begin{pmatrix} \epsilon_{11} & \epsilon_{12} & 0 \\ \epsilon_{21} & \epsilon_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_0 e^{-jk_z z} \\ -jE_0 e^{-jk_z z} \\ 0 \end{pmatrix} = 0 \tag{7}$$

根据方程两边 x, y, z 分量之和分别为 0 可得

$$k_z^2 = \omega^2 \mu_0 \epsilon_0 \left(1 + \frac{\omega_p^2 / \omega}{\omega_c - \omega} \right) \tag{8}$$

根据式(8)可看出,必须满足:

$$1 + \frac{\omega_p^2 / \omega}{\omega_c - \omega} > 0 \tag{9}$$

只有满足式(9),电磁波在可能在等离子体中传播,这个只是有可能,因为要实现电磁波在等离子鞘套中传播还需要满足其他一些条件,但是如果不能满足式(9),是肯定传播不了。

当电磁波是左旋圆极化波,即满足:

$$E = E_0 (X_0 + jY_0) e^{-jk_z z} \tag{10}$$

用同样的方法可求得

$$k_z^2 = \omega^2 \mu_0 \epsilon_0 \left(1 - \frac{\omega_p^2 / \omega}{\omega_c - \omega} \right) \tag{11}$$

同样,必须满足:

$$1 - \frac{\omega_p^2 / \omega}{\omega_c - \omega} > 0 \tag{12}$$

只有满足式(12),电磁波在可能在等离子体中传播,前面已经提到,这只是一个必要条件。

无论是左极化波还是右极化波,等离子体频率和电磁波的频率间必须满足一定的条件。但其相速不同,所以传播方向在不断旋转^[3-4]。

1.2 电磁波的传播垂直于 z 轴

根据式(1)可得

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \\ \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \\ \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{pmatrix} + \omega^2 \mu_0 \begin{pmatrix} \epsilon_{11} & \epsilon_{12} & 0 \\ \epsilon_{21} & \epsilon_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{pmatrix} = 0 \tag{13}$$

如果电磁波是直线极化波,即

$$E = Z_0 E_z \tag{14}$$

将式(14)展开为

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) E_z + \omega^2 \mu_0 \epsilon_{33} E_z = 0 \tag{15}$$

令

$$E_z = C e^{-ik_x x} e^{ik_y y} \tag{16}$$

所以只有满足

$$-(k_x^2 + k_y^2) = \omega^2 \mu_0 \epsilon_{33} \tag{17}$$

这种只有 z 方向有电场强度的电波就可传播。

1.3 电磁波沿任意方向传播

假设

$$E = X_0 E'_x + Y_0 E'_y + Z_0 E'_z \tag{18}$$

将式(14)代入式(18),各个分量必须满足相等的要求,即可得

$$\begin{cases} \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) E'_x + \omega^2 \mu_0 (\epsilon_{11} E'_x + \epsilon_{12} E'_y) = 0 \\ \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) E'_y + \omega^2 \mu_0 (\epsilon_{21} E'_x + \epsilon_{22} E'_y) = 0 \\ \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) E'_z + \omega^2 \mu_0 \epsilon_{33} E'_z = 0 \end{cases} \tag{19}$$

假设:

$$\begin{cases} E'_x = A' e^{-ik_x x} e^{-ik_y y} \\ E'_y = B' e^{-ik_x x} e^{-ik_y y} \\ E'_z = C' e^{-ik_x x} e^{-ik_y y} \end{cases} \tag{20}$$

式(20)代入式(19),解得:

$$\begin{cases} \left[\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \omega^2 \mu_0 \epsilon_{11} \right)^2 + \omega^4 \mu_0^2 \epsilon_{12}^2 \right] E'_x = 0 \\ \left[\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \omega^2 \mu_0 \epsilon_{11} \right)^2 + \omega^4 \mu_0^2 \epsilon_{12}^2 \right] E'_y = 0 \\ k'_x{}^2 + k'_y{}^2 = \omega^2 \mu_0 \epsilon_{33} \end{cases} \tag{21}$$

进而可知:

$$A' = B' \tag{22}$$

$$k'_x{}^2 + k'_y{}^2 = \omega^2 \mu_0 \epsilon_{33} \tag{23}$$

$$A' k'_x + B' k'_y = 0 \tag{23}$$

如果电磁波满足

$$\begin{cases} A' = B' \\ k'_x{}^2 + k'_y{}^2 = \omega^2 \mu_0 \epsilon_{33} \\ A' k'_x + B' k'_y = 0 \end{cases} \tag{24}$$

那么沿 x, y 轴的两种波是可以共存的。

实际情况下,电磁波的传播方向不一定是按上述两个方向传播的,所以需在这种情况下将坐标作一个变换,再按上述情况求解即可。

2 电磁波吸收特性与反射特性研究

飞行器再入时形成的等离子体层是一个有限区

域,其外缘是激波波阵面,内缘是飞行器表面。首先需对等离子体的厚度作一个假设,这里假定厚度为 10 mm。实际情况下,等离子体都是不均匀的,很多特性参数都是非线性的^[5]。在研究飞行器整个外形的电子密度分布时,主要研究的是垂直于飞行器表面方向,因为在这个方向上要比沿表面方向上的电子密度分布变化剧烈。同时,在处理等离子体问题时,一种较常用的方法是将等离子体当薄层处理,最好是均匀薄层,然后通过叠加求得最后的结果,这种方法计算起来较方便^[6]。

电磁波射到等离子体上时,会发生反射现象和透射现象^[7]两种,反射系数为

$$R = \left| \frac{1 - \sqrt{\epsilon_r}}{1 + \sqrt{\epsilon_r}} \right|^2 \quad (25)$$

吸收系数为

$$A = \left[1 - \left| \frac{1 - \sqrt{\epsilon_r}}{1 + \sqrt{\epsilon_r}} \right|^2 \right] [1 - \exp(-2\alpha d)] \quad (26)$$

式中: α 为衰减系数; d 为厚度。

此时我们研究电磁波的吸收和反射特性主要是通过吸收和反射功率系数来实现的^[8],正常情况下,研究的是衰减特性,可通过吸收和反射功率系数间接得到衰减特性。在正常情况下,电磁波的方向可能不垂直于 z 轴也不沿 z 轴,而是一种斜入射情况,如图 1 所示:

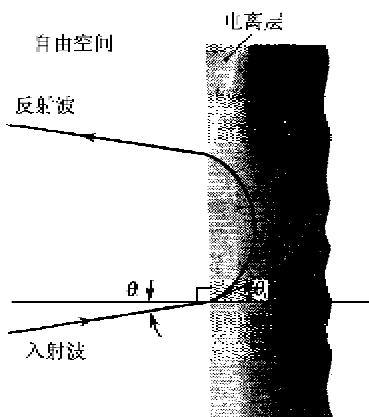


图 1 电磁波斜入射

由反射定律可得入射平面波电场为

$$E_i(x, z) = e_y E_{im} e^{-jk(x \sin \theta_i + z \cos \theta_i)} \quad (27)$$

由斯耐尔折射定律有

$$\sqrt{\epsilon_r} \sin \theta_t = \sin \theta_i \quad (28)$$

则相应的电磁波 R 为

$$R = \frac{\cos \theta_i - \sqrt{\epsilon_r - \sin^2 \theta_i}}{\cos \theta_i + \sqrt{\epsilon_r - \sin^2 \theta_i}} \quad (29)$$

为了获得功率吸收系数和功率反射系数,由式(27)~(29)可知,需知道电子密度和碰撞频率的大小及等离子体的一个厚度等必要的参数值,从而来研究入射角度对整个功率吸收系数和功率反射系数的影响。因此需对相关数据作如下处理:令电子密度 $N_e = 5 \times 10^{18} / \text{m}^3$,碰撞频率为 1.5 GHz,在这里取值不能过大,取 3 个具有代表性的角度 10° 、 20° 和 30° 。按上面的方法进行 Matlab 编程,得到的结果如图 2、3 所示。

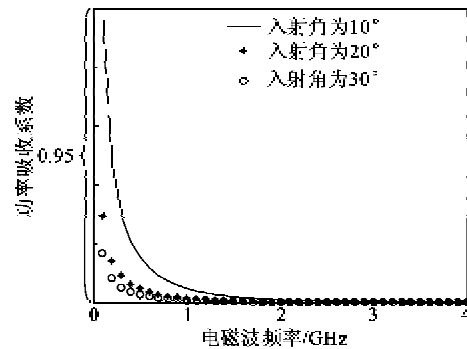


图 2 不同入射角度时的功率吸收系数

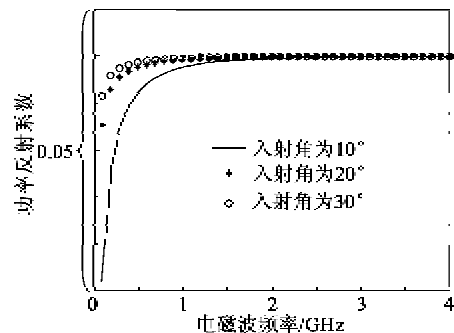


图 3 不同入射角度时的功率反射系数

3 结论

1) 当频率较低时,角度越大,则吸收系数越大;频率很高时,角度越大,则吸收系数越小。

2) 研究入射角度对反射系数的影响时,由图 2、3 可看到入射角度对反射系数的影响,角度越大则系数越大,在这一点上与吸收系数的影响不同,没有进行分段处理。

3) 厚度不同,得到的两个系数也不同;吸收系数随厚度增大逐渐增大,这是因我们将等离子体进行分层处理,每层都有吸收、反射及透射,但电磁波总能量有限,当厚度继续增大时,吸收会越来越多,最后只有很少的能量,不再随厚度的增大而改变。

(下转第 1082 页)