

等离子体隐身技术的研究

赵青¹, 李宏福¹, 任同², 鄢阳¹, 罗勇¹

(1. 电子科技大学物理电子学院 成都 610054; 2. 西南科技大学制造科学与工程学院 四川 绵阳 621010)

【摘要】等离子体隐身是一种全新的隐身技术。建立等离子体隐身的基本模型, 分别从折射效应和吸收衰减两方面论述了等离子体隐身的基本原理, 通过理论分析和数值模拟, 计算了电磁波等离子体中的衰减与等离子体碰撞频率、电磁波频率、等离子体厚度的关系。并对实现等离子体隐身进行研究, 结果表明利用等离子体对雷达波隐身是可行的。

关键词 等离子体隐身; 折射效应; 吸收衰减; 等离子体

中图分类号 O539 文献标识码 A

Study on Plasma Stealth Technology

Zhao Qing¹, Li Hongfu¹, Ren Tong², Yan Yang¹, Luo Yong¹

(1. School of Physical Electronics, UEST of China Chengdu 610054; 2. Southwest University of Science and Technology Shichuan Mianyan 621010)

Abstract Stealth technology is the high technology of the national defenses focused by countries over the world. Plasma stealth is a new type of stealth technology. In this paper, the physic model of the plasma stealth is built up. Two different basic theories for plasma stealth are showed, one is refraction, and the other is the absorption attenuation. The relation between the attenuation of electromagnetic waves and the plasma collision frequencies, the electromagnetic wave frequencies, the plasma thickness is studied. And the result of calculating simulation show the plasma stealth technique is a feasible method.

Key words stealth; refraction; absorption attenuation; plasma

隐身技术自古以来都是大家所关注的重要问题。随着高科技发展, 各种隐身技术应用到现代武器系统发展中, 等离子体隐身技术作为一种全新的隐身概念(为隐身技术提供了一种新颖的思路), 具有吸波频带宽、效率高、使用简便、价格便宜等优点, 特别是应用于飞行器隐身时无须改变飞行器的外形, 解决了隐身措施与气动性的矛盾, 日益受到世界各大国的高度重视^[1,2]。

1 等离子体隐身机理

众所周知, 等离子体是继固、液、气三态后的第四种物质存在形态, 是一种处于电离状态的物质高能聚集态。通常在这种凝聚态中电子所带负电荷与离子所带正电荷的总数相等, 宏观上呈现中性, 因而称为等离子体, 因此当电磁波与等离子体相互作用时, 体现出不同于一般导体或介质的特性。目前, 等离子体隐身技术关键在于如何使目标周围环绕着等离子云, 在对方雷达发出的电磁波同等离子云共同作用下, 会发生几种现象。首先, 电磁波的能量被吸收, 因为电磁波在穿越等离子体时, 电磁波会与等离子体的带电粒子相互作用, 把部分能量传递给带电粒子, 自身能量逐渐衰减。其次, 受一系列物理作用的影响, 电磁波将绕过等离子体。这两种现象会使反射信号大大减弱。图1所示是等离子体隐身机理的简明示意图。

收稿日期: 2003-07-09

作者简介: 赵青(1965-), 男, 博士, 主要从事高功率微波及等离子体应用方面的研究。

由此可知, 等离子体对电磁波的传播有很大影响。在一定条件下, 等离子体能够反射电磁波; 当存在磁场时, 等离子体中沿磁场方向传播的电磁波极化方向产生所谓法拉第旋转, 从而使雷达接收的回波极化方向与发射时不一致, 造成极化失真。即使对地磁场这样的弱磁场, 极化失真也不容忽视。等离子体的这三个性质, 都已经被用于对雷达进行无源干扰^[3,4]。

等离子体频率(又称朗缪尔频率)是等离子体的重要参数之一, 定义为

$$\omega_p = \sqrt{\frac{n_e e^2}{\epsilon_0 m_e}} \quad (1)$$

式中 n_e 为等离子体的自由电子密度, e 和 m_e 分别为电子的电量和质量, ϵ_0 为真空中的介电常数。从式(1)中可以看出, 等离子体频率 ω_p 取决于等离子体中的自由电子密度 n_e 。等离子体作为一种色散媒质, 当忽略带电粒子间碰撞时, 它的介电常数可表示为

$$\epsilon_p = \epsilon_0 \left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega_0^2} \right) \quad (2)$$

式中 ω_0 表示入射电磁波的角频率。等离子体对电磁波的折射率为

$$n_p = \sqrt{1 - \frac{\omega_p^2}{\omega_0^2}} = \sqrt{1 - \frac{n_e e^2}{\epsilon_0 \omega_0^2 m_e}} \quad (3)$$

考察目标被非均匀等离子体球覆盖的情况。假设电磁波波长远小于等离子体的尺度是合理的, 则由 Maxwell 方程组可推导出在等离子体内部电磁波所满足的方程^[5,6]

$$\frac{d}{ds} \left[n_p \frac{dr}{ds} \right] = \nabla n_p \quad (4)$$

式中 s 为电磁波轨迹弧长, r 为轨迹点相对于坐标原点的矢径。当等离子体为球面分层不均匀时, $n_p = n_p(r)$ 。将 n_p 代入式(4)可得广义菲涅尔定律

$$r n_p(r) \sin f = K \quad (5)$$

式中 f 为波轨迹上任意点切线与矢径 r 得夹角, K 为常数。取等离子体电子密度沿径向线性变化, 即分布函数为

$$n_e(r) = n_{e0} \left(1 - \frac{r}{r_0} \right) \quad (6)$$

$$n_{e0} = m_e \omega_{\max}^2 \epsilon_0 / e^2 \quad (7)$$

式中 n_{e0} 为 $r=0$ 处电子密度(即电子密度的最大值), r_0 为等离子体球半径, ω_{\max} 为入射波的最大圆周频率。从式(6)可知, $n_e(r_0) = 0$ 表示在边缘处折射率连续, 避免了自由空间与等离子体球分界面处的明显反射; 其次, $\omega_p(0) = \omega_{\max}$ 表示返转点位于球心, 使得在保证较高电子密度的同时, 避免了等离子体对入射波的全反射。则等离子体的折射率为

$$n_p(r) = \sqrt{r/r_0} \quad (8)$$

把式(8)代入式(5), 并假设电磁射线在外边缘的初始入射角为 f_0 , 得

$$r^{3/2} \sin f = r_0^{3/2} \sin f_0 \quad (9)$$

令 $f = 90^\circ$, 得此射线轨迹到球心的最短距离

$$r_{\min} = r_0 \sin^{2/3} f_0 \quad (10)$$

设目标是半径为 r_t 的圆球, 以 r_t 代替 r_{\min} 得

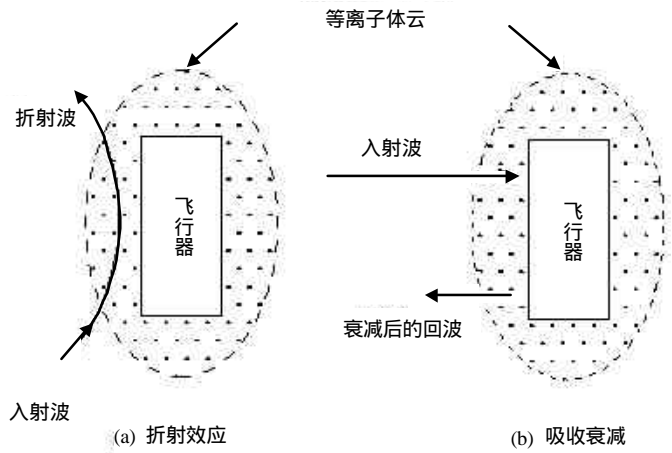


图1 等离子体隐身示意图

$$\left(\frac{r_t}{r_0}\right)^{2/3} = \sin f_0 \quad (11)$$

这表示仅有半径为 $r_t \sin f_0$ 圆内的雷达波能打到目标上。即存在等离子体包层时,打到目标上的电磁波能量与无等离子体包层时打到目标上的电磁波能量(等于球面投射量)之比为 $(r_t / r_0)^{3/2}$ 。也就是说等离子体折射造成的能量衰减

$$Att = -20 \lg \left(\frac{r_t}{r_0}\right)^{3/2} \quad (12)$$

然而,电磁波在等离子体中传播时除了被等离子体折射而改变方向外,同时要被等离子体吸收而逐渐衰减。等离子体对电磁波的吸收分为正常吸收和反常吸收。正常吸收指碰撞吸收,即电磁波的电场对电子做功,电子获得动能,再通过碰撞将所吸收的能量传给离子或中性分子。反常吸收指电磁波与等离子体集体相互作用,在等离子体中形成等离子体波动,从而导致电磁波的能量减少,反常吸收主要包括衰变模吸收,共振吸收和湍流吸收等。理论分析证明,碰撞吸收是主要的,是等离子体隐身研究的主要方面^[5]。

对通常研究的弱电离等离子体而言,碰撞主要发生在电子和中性分子之间,运用统计理论可以推算电子与中性分子的碰撞频率 ν_e ,一般来说, ν_e 是电子密度和温度的函数,实际应用时可取经验值,碰撞吸收的大小与碰撞频率的关系通过等离子体的复介电常数体现,当存在碰撞时,可推导等离子体的介电常数为

$$\epsilon_p = \epsilon_0 \left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega_0^2 + \nu_e^2} - i \frac{\nu_e}{\omega_0} \frac{\omega_p^2}{\omega_0^2 + \nu_e^2}\right) \quad (13)$$

电磁波在有碰撞等离子体中的波数为一个复数值,表示为

$$k = k_0 \sqrt{\frac{\epsilon_p}{\epsilon_0}} = k_r + ik_i \quad (14)$$

式中 $k_0 = \omega_0 / c$ 是自由空间的波数, K_r 、 K_i 分别表示等离子体中波数的实部和虚部。代入式(13)得

$$\begin{cases} k_r = k_0 r \cos(f/2) \\ k_i = k_0 r \sin(f/2) \end{cases} \quad (15)$$

$$\text{其中 } r = \left\{1 - \frac{\omega_p^2}{\omega_0^2 + \nu_e^2} \left(2 - \frac{\omega_p^2}{\omega_0^2}\right)\right\}^{1/4} \quad f = \begin{cases} f_0 & \text{Re}(\epsilon_p > 0) \\ f_0 + \pi & \text{Re}(\epsilon_p < 0) \end{cases} \quad (16)$$

$$\text{其中 } f_0 = \arctg \left[-\frac{\nu_e \omega_p^2}{\omega_0 (\omega_0^2 + \nu_e^2 - \omega_p^2)} \right]$$

由电磁波插值理论可知,波数 K 的实部 K_r 体现波在等离子体中的空间相位延迟;虚部 K_i 体现随波在等离子体中传输其幅度要不断的衰减。据上式可知,只要存在碰撞($\nu_e > 0$), k_r 和 k_i 都不可能等于零,因此电磁波必然要被等离子体吸收而衰减。研究了等离子体密度均匀分布时的情况,入射电磁波的功率为 p_i ,反射电磁波 P_r 在等离子体中某一点 Z 处,电磁波的功率为

$$p(z) = (p_i - p_r) \exp(-2k_r z) \quad (17)$$

电磁波必然要被等离子体吸收而衰减,在厚度为 L 的均匀等离子体中的衰减量为

$$A = 10 \lg \frac{p_i - p_r}{p(L)} = 20k_r \lg e \quad (18)$$

2 计算模拟及结果分析

根据上述理论,对其进行数值模拟。当忽略带电粒子间碰撞时,由式(2)可见: $\omega_0 < \omega_p$ 时折射率 n_p 为虚数,意味着角频率低于等离子体频率的电磁波不可能在等离子体中传播,或者说,电磁波在自由空间与等离子体分界面处被完全反射,电磁波无法进入等离子体。因此, ω_p 为等离子体的截止频率。这种情况是隐身应用必须避开的,因为全反射意味高的后向雷达散射截面(RCS)。

当 $\omega_0 < \omega_p$ 时,折射率 n_p 为 < 1 的实数,电磁波可在等离子体中无衰减地传播,但在自由空间与等离子体

分界面处,或者等离子体内电子密度不均匀处,由于折射率不连续,电磁波要产生折射,从而改变电磁波的传播方向。其结果是;或因目标外等离子体包层的折射,电磁射线严重偏离原方向,根本打不到目标上;即使电磁射线打倒目标上并产生反射,但经过来回两次折射,回波已偏离入射方向,明显降低目标的RCS,达到隐身目的。实际上,大多数情况下产生的等离子体都是非均匀的,且越靠近内层电子密度越高,入射电磁波透过等离子体包层射向目标的每一步都相当于从光密媒质向光疏媒质入射的过程,其折射效果相当明显,可见,等离子体对电磁波的折射是等离子体隐身机理的重要组成部分。

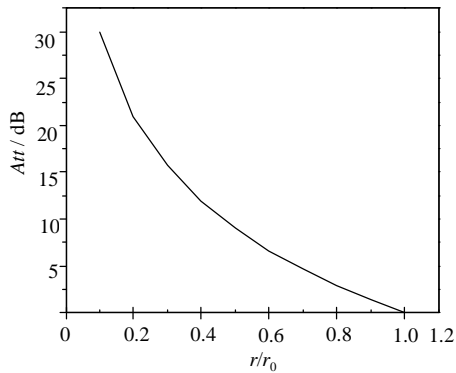


图2 折射衰减量与等离子体包层厚度关系

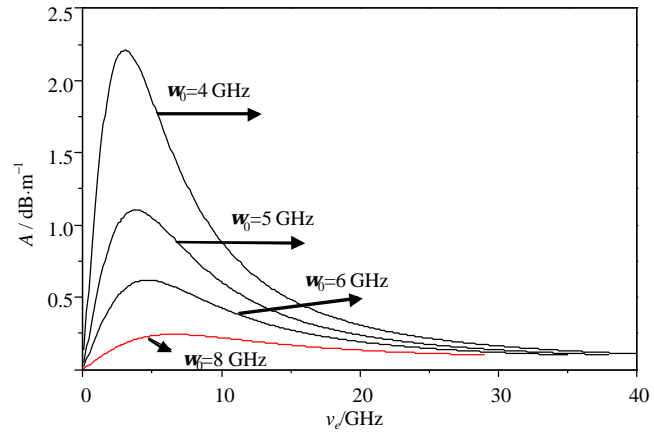


图3 吸收衰减与碰撞频率关系

由图2所示折射效应产生的隐身是可观的,当等离子体包层厚度是目标半径的两倍时,可达8 dB多衰减;对一定的包层厚度,当目标半径缩小时折射衰减急剧增大。

上述分析可知,电磁波在等离子体中传播除了被等离子体折射而改变方向外,同时要被等离子体吸收而逐渐衰减。根据式(18),计算了等离子体密度 $n_e=10^{17} \text{ cm}^{-3}$,厚度为1 cm的均匀等离子体在不同碰撞频率下对不同入射电磁波的衰减,由图3可见,等离子体对电磁波的吸收衰减极为明显,当入射波频率与碰撞频率近似相等时达到最大值。显然,即使目标上只有十多厘米厚的等离子体包层,只要正确控制入射波频率与等离子体频率的比值,其双程衰减也可达20 dB以上,可达到隐身目的。

3 结 论

由上述研究,得到结论如下:1)从理论分析和模拟效果看,等离子体隐身可达到或相当于传统隐身技术中的外形隐身和吸波材料隐身效果;2)等离子体隐身具有吸波频带宽、效率高、使用简便、价格便宜等优点。等离子体隐身技术的发展,将对未来的技术战争,导弹突防和导弹、飞机等武器系统的发展以及作战模式等产生巨大而深远的影响。

本文研究工作得到电子科技大学青年基金(NO.YF020702)资助,在此表示感谢。

参 考 文 献

- [1] Laroussi M, Vidmar R J. Numerical calculation of the reflection, absorption and transmission of microwaves by a nonuniform plasma[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 1990, 2(4): 733-741
- [2] Igor A, Weng L K. A plasma stealth antenna for the US navy[C]. IEEE International Conference on Plasma Science, 1998, 277-282
- [3] Petrin A B. Transmission of microwaves through magnetoactive plasma[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2001, 29(6): 471-478
- [4] Dang D I, Sun A P, Qiu S M, *et al.* Interaction of electromagnetic-wave with a magnetized nonuniform plasmas slab[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2003, 31(3): 405-410
- [5] 林为干. 微波理论与技术[M]. 北京: 科学出版社, 1979
- [6] 李才良, 唐应辉. 麦克斯韦方程和波动方程的唯一延拓定理[J]. 电子科技大学学报, 2002, 12(3): 313

编 辑 孙晓丹