

·光电系统·

太赫兹波对抗等离子体隐身技术的探讨

李茜¹, 徐晟¹, 刘少聪¹, 王高^{1,2}

(1.中北大学 仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 山西 太原 030051; 2.天津大学 光电信息科学教育部重点实验室, 天津 300072)

摘要: 等离子体隐身是隐身技术的一个新分支。在等离子体隐身机理分析中, 重点探讨了等离子体折射隐身和吸收隐身特性。对太赫兹辐射具有的高穿透性、高分辨率和反隐身能力进行了研究。依据对等离子体隐身技术的局限性分析, 提出了采用太赫兹雷达探测等离子体隐身飞行器的可行性及技术途径。

关键词: 太赫兹探测; 等离子体隐身; 反隐身

中图分类号: O46; TN974

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2011)02-0009-03

Discussion on Terahertz Against Plasma Stealth Technology

LI Qian¹, XU Sheng¹, LIU Shao-chong¹, WANG Gao^{1,2}

(1. Key Laboratory of Instrument Science & Dynamic Measurement Ministry of Education, North University of China, Taiyuan 030051, China; 2. Key Laboratory of Opto-electronics Information and Technical Science, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: The plasma stealth technology is a new branch of the stealth technology. The plasma refractive stealth and absorption stealth characteristic are discussed in the analysis of stealth mechanism of the plasma. The high penetration, high resolution and anti-stealth capabilities of terahertz radiation are studied. Based on the limit of the plasma stealth technology, the feasibility and technical approach using terahertz radar to detect the plasma stealth aircraft are proposed.

Key words: terahertz radar; plasma stealth; anti-stealth

等离子体隐身技术作为一种新概念、新原理的隐身技术, 近年来受到世界各国的广泛关注, 成为隐身技术研究中一个十分活跃的分支。由于等离子体隐身具有隐身效果好、吸波频带宽、吸收率高等优点, 因此具有很高的学术价值和应用价值。

1992年D.J Gregoire等人在美国国防报告中首次提出等离子体折射隐身的概念^[1], 1999年俄国人成功地将等离子体发生器安装在“米格”喷气战斗机上, 使其具有隐身特性。俄罗斯目前已研制成功一种全新的等离子体隐身技术, 即将用于其第五代战斗机^[2]。据报道, 俄罗斯克尔德什研究中心已经开发出第一代和第二代等离子体发生器。该研究

所在地面模拟设备和自然条件下以及飞机上的试验已经充分地证明了这种隐身技术的实用性。

太赫兹探测技术是一项极具应用前景的技术。太赫兹探测雷达能够以极高的重复频率发射纳秒以至皮秒级的脉冲, 并且具有高距离(时间)分辨率、强穿透力、低截获率、强抗干扰性以及优越的反隐身能力, 完全可用于探测等离子体隐身的飞行器。美军国家地面情报中心资助的便携式太赫兹雷达研究项目中, T. M. Goyette等人使用1.562 THz的雷达波对1/16比例的军用拖车和T72坦克模型的雷达探测成像^[3], 标志着太赫兹雷达探测小型的机动目标将成为现实。

收稿日期: 2011-02-11

基金项目: 高等学校博士学科点科研基金(20070420118); 中北大学校基金

作者简介: 李茜(1987-), 女, 贵州贵阳人, 硕士研究生, 研究方向为多传感器数据融合及太赫兹光电检测技术。

1 等离子体隐身技术机理分析

等离子体隐身技术是利用磁化或非磁化等离子体来规避雷达探测系统的一种新技术。与美国B-2等传统战斗机所广泛采用的外形和材料隐身技术相比,等离子体隐身技术具有很多独特的优点:吸波频带宽、吸收率高、隐身效果好、使用简便。并且由于没有吸波材料和吸波涂层,可极大地降低维护费用。其基本原理是通过等离子体层对入射电磁波具有折射特性和特殊的吸收,使反射的回波偏离接收方向或者雷达接收到的回波能量极少,因而使探测系统难以探测,从而达到被保护目标隐身的目的。

等离子体隐身技术机理包括:等离子体对入射电磁波的折射使电磁波传播轨迹发生弯曲的折射隐身;等离子体对入射电磁波的碰撞吸收的吸收隐身;等离子体波与入射电磁波相互作用产生其他频率的电磁波;时变等离子体隐身;磁化等离子体隐身等。较为常用的有两种:折射隐身和吸收隐身。

(1) 折射隐身

通过非均匀等离子体对入射电磁波的折射使电磁波传播轨迹发生弯曲,雷达回波偏离对方雷达的接收方向,从而使目标难以被雷达发现,以此达到隐身的目的。

不均匀非磁化等离子体中电磁波的传播主要取决于等离子体的折射率,考虑电磁波在等离子体中传播时可以忽略等离子体碰撞,此时,其折射率可近似表示为

$$n = \left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \right) = \left(1 - \frac{n_e e^2}{\epsilon_0 m_e \omega^2} \right)^{1/2} \quad (1)$$

其中, ω 为电磁波角频率; ω_p 是等离子体角频率; n_e 、 m_e 是电子的密度和质量; ϵ_0 是真空中介电常数。

由于等离子体的折射率与等离子体自由电子密度有关,适当设计隐身等离子体密度分布,使入射到等离子体内部的雷达电磁波向外发生弯曲,减小目标与雷达的相互作用,即可实现对雷达波的折射隐身。

(2) 吸收隐身

等离子体能以电磁波反射体的形式对雷达进行电子干扰,同时对入射到等离子体内部的电磁波通过碰撞吸收其大部分能量。考虑等离子体碰撞,非磁化等离子体的相对介电常数可以表示为

$$\epsilon_r = n^2 = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega - j\nu)} = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \nu^2} - j \frac{\nu \omega_p^2}{\omega(\omega^2 + \nu^2)} \quad (2)$$

其中, ν 是碰撞频率; ω 是电磁波角频率。

等离子体具有高通滤波器的性质,由式(2)可知,当雷达波频率低于等离子体频率时,等离子体的折射率出现虚部,电磁波在传播方向上按指数衰减,沿传播方向的平均传输功率为零,即电磁波不能在等离子体内传播,电磁波将被等离子体完全反射。此时,等离子体能以电磁波反射体的形式对雷达进行电子干扰。此外,等离子体中带电子在漂移过程中必然会遇到各种形式的碰撞,当频率大于等离子体频率的电磁波入射到等离子体内部时,等离子体通过碰撞吸收大部分入射波的能量。其作用机理是:电磁波的电场对自由电子做功,把一部分能量传给电子,而自身能量被衰减,电子通过与其他粒子的有效碰撞,把能量转化为无规则运动的能量,并按自由度均分。

2 太赫兹波的反隐身特性

2004年,美国MIT将太赫兹科技评为“改变未来世界的十大技术”之一。美国国防部(DARPA),特别是美国重要的国家实验室,如LLNL、LBNL、SLAC、JPL、BNL、NRL、ALS和ORNL等都在开展太赫兹科学技术的研究工作,目前标志性成果是0.225 THz机载雷达研制成功^[4]。太赫兹技术之所以引起科学界广泛的关注是由于太赫兹波位于宏观电子学与微观光子学的过渡区,具有很多独特的性质。其中,高穿透性、高分辨率和优越的反隐身能力是太赫兹探测雷达最突出的优点。

(1) 高穿透性

太赫兹对许多介电材料和非极性物质具有良好的穿透性,是X射线成像和超声波成像技术的有效互补。且其能量为4.1 meV(毫电子伏),低于各种化学键的键能,非常适合生物体存在环境中的探测。另外,太赫兹在浓烟、沙尘环境中传输损耗很少,其良好的穿透沙尘烟雾能力,是反隐身探测的重要保障。

(2) 高分辨率

太赫兹波的脉宽是皮秒级,具有很高的时间分

辨率,是作为高精度雷达的基础。太赫兹辐射具有比微波更短的波长及更精确的时间检测装置,因而使用太赫兹雷达对目标进行敏感探测与监视,能够探测比微波雷达更小的目标。太赫兹单个脉冲的频带可以覆盖吉赫兹至太赫兹的频率范围,能获得物质更丰富的光谱数据。并且,根据材料的共振吸收,可以获得被测目标的材料组成。因此,太赫兹可用作对目标的识别,这是其他远距离探测技术难以做到的。

(3)反隐身能力

太赫兹雷达波的空间分辨率能达到1 cm左右,且频带很宽,使太赫兹雷达接收到的是携带了一系列不同角度信息的集中回波,从而能够很好地对抗外形隐身技术。

通常用吸波材料构成的隐形目标只在一个较窄的波段适合,所以常规的窄带微波雷达无法有效探测雷达截面很小的隐形飞行物体。而太赫兹雷达发射的太赫兹脉冲包含了丰富的频率,可使隐形飞行物体的窄带吸波涂层失去作用。太赫兹雷达对扁平形薄边缘不会像普通雷达那样形成共振吸收而减弱反射强度,它仅产生很小的共振面而反射波仍然较强。因此,太赫兹雷达对材料隐身也有很强的探测能力。

3 太赫兹波对等离子体隐身的探测

3.1 等离子体隐身技术的局限性

等离子体隐身的效果与等离子体的电子数密度、电子碰撞速率、雷达电磁波的频率和等离子体云层的厚度有关。当电磁波的频率越接近等离子体的截止频率时,等离子体对电磁波的吸收能力越强。有研究指出,即使能够很好的控制产生等离子体的电子数密度使其吸波能力达到最强(是截止频率低于但尽量接近电磁波频率),但在频段的低端其隐身能力很不理想。在隐身条件满足的情况下,为了能同时覆盖更宽的雷达频段,则实际应用中产生的等离子体数密度应是一定的,在此条件下,其隐身效果将随雷达电磁波频率的升高而变差。总之,等离子体隐身技术不是全频段的隐身,而是在某些频段范围内的隐身。由式(3)计算可得

$$\epsilon_r = \epsilon_0 \left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \right) \quad (3)$$

对频率 $f=15$ GHz的雷达形成介质条件,所需等离子体密度为 $2.79 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$,这比一般的工业等离子体密度高出2个数量级(一般工业等离子体密度为 10^{16})^[5]。

3.2 太赫兹雷达反等离子体隐身技术分析

(1)反等离子体折射隐身

虽然电磁波在不均匀等离子体中传播折射率会改变,但是通过计算电波轨迹可得到出射电磁波的方位角。采用机载式太赫兹雷达在对应方向探测能够接收到回波信息。

考虑球对称的目标等离子体,为使等离子体边缘的折射率连续,应使等离子体球面的自由电子密度为0,折射率为1。同时,为使目标隐身等离子体成为入射电磁波的通带而非阻带,应取等离子体球的球心处对应的等离子体折射率为0。即等离子体球心处频率等于入射波频率。取折射率与半径 r 的 m 次方成正比

$$n = r^m / r_m^0 \quad (4)$$

由变分原理得

$$\delta \int_A^B n ds = 0 \quad (5)$$

通过计算,有公式

$$z = y^2 = r^2 = -r^2 + cr^{2m+4} \quad (6)$$

式中, c 为积分常数,并获得出射角 θ 为

$$\theta = \frac{1}{m+1} \arcsin(\sqrt{c} r^{m+1}) + d \quad (7)$$

其中, c 、 d 为积分常数。取电磁波入射点的坐标为 (r_0, π) ,且电磁波入射线与等离子体球表面法线的夹角为 φ_0 ,则积分常数为

$$c = \frac{\cot^2 \varphi_0 + 1}{r_0^{2m+2}},$$

$$d = \pi - \frac{1}{m+1} \arcsin(\sqrt{c} r_0^{m+1}) \quad (8)$$

得到反射波的出射角度后,太赫兹雷达的接收方向也就确定了,太赫兹波探测等离子体隐身成为可能。

(2)反等离子体吸收隐身

由前面分析可知,等离子体吸收隐身效果主要取决于电磁波频率与等离子体频率的关系,而等离子体频率取决于等离子体密度。就目前的发展水平而言,等离子体隐身的有效频率范围一般在20 GHz以内,而太赫兹的频段要 (下转第26页)

- Proceedings of SPIE, Imaging Spectrometry VI, 2000, 4132:250.
- [9] FOLK M, PEARLMAN J, LIAO L B, et al. EO-1/Hyperion hyper-spectral imager design, development, characterization, and calibration [C]//Proceedings of SPIE, Hyper-spectral Remote Sensing of the Land and Atmosphere, 2001, 4151:40-51.
- [10] 王之江. 光学设计理论基础[M]. 北京: 科学出版社, 1985.
- [11] 潘君骅. 光学非球面的设计, 加工与检验[M]. 北京: 科学出版社, 1994:157-167.
- [12] 丁学专, 刘银年, 王欣, 等. 航天遥感反射式光学系统设计[J]. 红外技术, 2007, 29(5): 253-256.
- [13] 史光辉. 卫星对地观测高分辨率光学系统和设计问题[J]. 光学精密工程, 1999(2):16-24.
- [14] 李旭阳, 李英才. 高分辨率空间相机共轴三反光学系统实现形式研究[J]. 应用光学, 2009, 30(5):717-723.
- [15] 杨照金. 空间光学仪器与航天相机[J]. 应用光学, 2008, 29(4):665-668.
- [16] 樊学武, 陈荣利, 马臻, 等. 空间三反射望远镜光学系统的研究[C]//瞬态光学和空间光学技术专题, 2004.
- [17] 刘群龙, 吴晗平, 熊衍建, 等. 高空预警探测用450 mm口径红外非球面光学系统设计[J]. 红外技术, 2010, 32(9):517-522.
- [18] Michael R Descour, Mark R Wilier, Dana S Clarke, et al. EUVL projection-camera alignment methods[J]. SPIE, 1999, 3676:663-668.
- [19] ZEMAX 中文使用手册[S]. 南京: 光研科学有限公司, 2007.
- [20] Alexay C C, Palmer T A. A new modular optical system for large format scene projection[C]//Proceedings of SPIE, 2006, 6208: 620811.
- [21] Palmer T A. Infrared catadioptric lens design considerations[C]//Proceedings of SPIE, 2005, 5783: 835-840.

(上接第11页)

高出这一频率3个数量级。由式(3), 一般应用太赫兹频率为1.25 THz, 所需等离子体密度为 $2.325 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$, 比前面给出的工业水平高出4个数量级。因而, 就目前的工业水平而言, 要实现太赫兹隐身的等离子体层是不可能的, 这为太赫兹波对抗等离子体隐身飞机提供了独特的反隐身条件。

(3) 太赫兹雷达技术的发展

前面介绍的T. M. Goyette等人研制的测量坦克模型目标的太赫兹合成孔径成像雷达实验系统, 太赫兹激光发射采用光泵 CH_3OH , 输出光功率100 mW。另外, Takeshi Yasui制造了太赫兹脉冲车载雷达, 用光导天线(PCA)作太赫兹发射源和探测器, 并采用了2台激光器。目前测量精度在2 mm左右^[6]。说明太赫兹雷达具有现实可行性。

太赫兹技术中的关键技术是太赫兹源的问题, 目前, 非相干的热辐射源、电子学的高频微波辐射源、太赫兹激光器、光电子辐射源等多种发射源都为产生高功率的太赫兹波提供可能。其中, 自由电子激光和气体激光可以发射相对较强的太赫兹辐射, 并可以覆盖较宽的频率范围, 是探测雷达的理想太赫兹源。太赫兹波对抗等离子体隐身已发展成为现实可行的新技术。

4 结束语

从等离子体隐身技术的局限性出发, 分析了太

赫兹雷达探测等离子体隐身的现实可行性。提出了具有发展前景的太赫兹反等离子体隐身技术。反隐身技术是综合技术, 单独采用某一种反隐身技术都很难获得较好的反隐身效果, 必须综合运用各种反隐身技术才能提高探测隐身目标的效能, 太赫兹波反隐身技术与现有的其他反隐身技术相结合, 会更有效地探测、识别各种隐身目标。随着太赫兹应用技术不断发展, 太赫兹反隐身探测雷达将进入实用化发展阶段, 成为对抗等离子体隐身的有效手段。

参考文献

- [1] D J Gregoire, J Santoru, R W Schumacher. Electromagnetic-wave propagation in unmagnetized plasmas[P]. AD-A250710, 1992.
- [2] 凌永顺. 等离子体隐身及其用于飞机的可能性[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2000, 1(2): 1-3.
- [3] 朱彬, 陈彦, 邓科, 等. 太赫兹科学技术及其应用[J]. 成都大学学报(自然科学版), 2008, 27(4): 304-307.
- [4] 郑新, 刘超. 太赫兹技术的发展及在雷达和通讯系统中的应用[J]. 微波学报, 2010, 26(6):1-6.
- [5] 林华. 无人机载太赫兹合成孔径雷达成像分析与仿真[J]. 信息与电子工程, 2010, 8(4):373-377.
- [6] YASUI T, KABETANI Y, YOKOYAMA S, et al. Real-time, terahertz impulse radar based on asynchronous optical sampling[C]// Infrared, Millimeter and Terahertz Wave, 2008, IRMMW-THz 2008, 33rd International Conference. CA, Pasadena, 2008.