

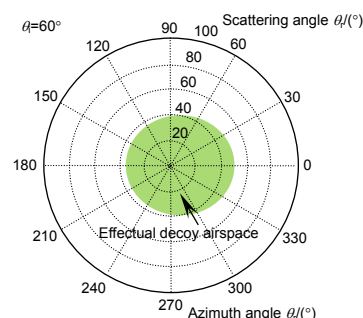


DOI: 10.12086/oe.2019.180453

激光引偏干扰中典型自然地物假目标的引偏能力

孙春生*, 张爽, 张晓晖

海军工程大学兵器工程学院, 湖北 武汉 430033



摘要: 针对自然地物假目标在激光引偏干扰中的应用需求, 以有效引偏空域表征引偏能力, 计算分析了其引偏能力。在充分考虑目标反射特性、干扰-指示激光强度和大气激光衰减系数等因素的前提下, 利用信号压制系数 $K \geq 1$ 的条件建立了假目标引偏能力分析模型, 基于模型分析了典型条件下常见自然地物假目标的有效引偏空域。研究表明, 假目标有效引偏空域与目标类型紧密相关, 相同条件下植被类、砂石类和漫反射体目标的引偏能力依次增强; 植被类和砂石类自然地物的引偏空域存在远小于漫射分量的镜像反射分量; 干扰激光入射角的变化对有效引偏空域分布会产生较明显的影响, 但对植被类目标, 其引偏空域随入射角的变化却没有明显的趋势性变化规律。研究结果对于自然地物假目标的合理运用具有指导意义。

关键词: 激光引偏干扰; 假目标; 自然地物; 引偏空域; 压制系数

中图分类号: TN977

文献标志码: A

引用格式: 孙春生, 张爽, 张晓晖. 激光引偏干扰中典型自然地物假目标的引偏能力[J]. 光电工程, 2019, 46(1): 180453

Deceiving ability of typical natural objects used for false target in laser decoy jamming

Sun Chunsheng*, Zhang Shuang, Zhang Xiaohui

College of Weaponry Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan, Hubei 430033, China

Abstract: Aiming at the application of natural objects false target in laser decoy jamming, its deceiving ability characterized by decoy airspace was calculated and analyzed. On the premise of full considering the reflection characteristics of target, the intensity of jamming-indicating laser, atmospheric laser attenuation coefficient, and other factors, the analysis model of decoy jamming ability for false target was established under the condition of suppression coefficient $K (\geq 1)$. Furthermore, the effectual decoy airspace of common natural objects was analyzed under typical condition. The results show that the effective cheating airspace of false target is closely related to the type of targets, and the deceiving ability of vegetation, gravel and diffuse reflection objects is enhanced in turn under the same conditions. There exists a mirror reflection component that is much smaller than the diffuse reflection component in the decoy airspace of vegetation and gravel natural objects, and the variation of the incident angle of jamming laser has obvious influence on the distribution of effectual decoy airspace. However, there is no obvious trend change rule for the decoy airspace of vegetation targets with the incidence angle. The research results are instructive for the reasonable application of typical natural objects used for false target.

Keywords: laser decoy jamming; false target; natural objects; decoy airspace; suppression coefficient

Citation: Sun C S, Zhang S, Zhang X H. Deceiving ability of typical natural objects used for false target in laser decoy jamming[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2019, 46(1): 180453

收稿日期: 2018-08-30; 收到修改稿日期: 2018-10-20

作者简介: 孙春生(1977-), 男, 博士, 副教授, 主要从事光电对抗技术、光电探测与信息处理方面的研究。E-mail: scs96581@163.com

1 引言

激光引偏干扰是对抗激光半主动制导武器的有效手段。激光引偏干扰的基本思想是：激光假目标诱偏来袭的激光制导武器至假目标自身，通过自身的牺牲换来被保护目标的安全。假目标的引偏能力直接决定着假目标的布设方法与引偏效果。激光引偏干扰系统一般选用漫反射靶板或自然地物作为假目标^[1-2]，由于漫反射靶板具有朗伯反射特性，其引偏能力容易获知；而自然地物的激光反射特性则复杂得多，其引偏能力受地物类型、入射激光参数、来袭弹体导引头参数等诸多因素的影响。研究不同条件下自然地物假目标的引偏能力对提升激光引偏干扰系统使用的灵活性、充分发挥其作战效能具有重要意义。

已有一些文献研究了与自然地物激光假目标引偏能力有关的部分问题^[2-3]。在文献[2]中，作者测量了几种典型自然地物的相对反射系数，分两种情况示意了指示-干扰激光的反射能量空域分布，进而给出了自然地物假目标类型和面形选择建议。文献[3]针对机动编队周围自然地物的选择区域进行了研究，结合激光制导武器攻击特点，计算了一定条件下自然地物作假目标的可选择区域大小，总结了防护运动目标时激光引偏干扰系统选择自然地物假目标的基本要求。这些研究虽然通过定性分析或实验测量或理论计算解决了一些与自然地物激光假目标引偏能力相关应用问题，但没有明确提出自然地物假目标引偏能力的表征方法，更没有给出其引偏能力的量化方法。论文以自然地物假目标的有效引偏空域^[4-5]来表征自然地物假目标的引偏能力，在信号压制系数的基础上建立自然地物假目标引偏能力分析模型，基于模型分析典型条件下常见自然地物假目标的有效引偏空域，为自然地物假目标的科学运用奠定理论基础。为达到成功引偏目的，引偏干扰信号与制导指示信号之间需满足特征、时域和空域相关，前两个相关性由引偏干扰装备的自身性能决定，空域相关性则由假目标的引偏能力密切相关。本文的研究是以激光引偏干扰系统的自身性能满足引偏干扰相关性要求为前提，如能够及时探测来袭激光、识别激光编码、发射超前同步的干扰激光等。

2 假目标的引偏能力分析模型

在激光导引头处干扰信号功率密度与制导信号功率密度的比值称为压制系数 K 。作者在前期的研究中已推导出了压制系数 K 的简化表达式^[5]：

$$K = \frac{P_{ig} \eta_g \cos \theta_{rg} f_{rg}}{P_{tz} T_{iz} \eta_z \cos \theta_{tz} f_{tz}} \quad (1)$$

式中：下标 g 和 z 分别表示干扰激光和指示激光， P_i 表示干扰或指示激光器输出功率， η 表示地物或目标表面激光光斑的利用率， θ_r 为探测方向相对于地物或目标表面面元法线的反射角， f_r 为双向反射分布函数 (bidirectional reflectance distribution function, BRDF)，它是描述物体表面反射特性的物理量， T_i 为激光器到目标距离上激光大气透过率。

由压制系数可以进一步建立假目标引偏能力的分析模型。在装备自身性能满足引偏所需的特征、时域和空域相关时，为保证引偏干扰效果，压制系数 K 应不小于 1。通过 $K \geq 1$ 和式(1)可以得到假目标有效引偏空域的计算公式：

$$f_{rg}(\theta_{ig}, \theta_{rg}, \varphi_g) \cos \theta_{rg} \geq \frac{P_{tz} T_{iz} \eta_z \cos \theta_{tz} f_{tz}}{P_{ig} \eta_g} \quad (2)$$

式中： θ_{ig} 为入射干扰激光相对于假目标上光斑面元 dA 法线的入射角； φ_g 表示假目标表面反射光相对于入射光的方位角。双向反射分布函数 f_r 在实际观测或探测时，会产生一个 $\cos \theta_r$ 投影加权量。为与实际情况一致，一般将 $f_r \cos \theta_r$ 一并考虑，不妨称之为观测双向反射分布函数。结合双向反射分布函数的物理意义，利用式(2)即可计算出一定条件下入射到假目标上的引偏激光经反射后形成的干扰激光的有效引偏空域。因此式(2)可视为假目标引偏能力的分析模型。

为便于计算分析，通常对式(2)进行工程近似。在实际应用中，目标表面指示激光光斑法线与导引头-目标光斑连线的夹角 θ_{tz} 有一定的随机性，在此近似取半球空间内的平均值，即 $\cos \theta_{tz} = 1/2$ ；同时假定被保护目标表面具有朗伯余弦反射特性，即 $f_{tz} = \rho_z / \pi$ ，其中 ρ_z 为目标表面的激光半球反射系数，在这些近似条件下，式(2)可简化为

$$f_{rg}(\theta_{ig}, \theta_{rg}, \varphi_g) \cos \theta_{rg} \geq \frac{\eta_z \rho_z e^{-cL}}{2\pi \alpha \eta_g} \quad (3)$$

式中： α 为干扰激光与指示激光功率的比例系数，即 $\alpha = P_{ig} / P_{tz}$ ； e^{-cL} 为来袭激光指示器到目标距离上激光大气透过率 T_i ，其中 c 为大气激光衰减系数， L 为指示器到目标距离。由式(3)可以看出，假目标的引偏空域与入射激光角度 θ_{ig} 、假目标双向反射分布函数 f_r 、被防护目标激光反射特性 ρ_z 、激光光斑的利用率 η 、干扰激光与指示激光功率比 α 、大气激光衰减系数 c 和指示距离 L 等参数相关的量。在设定条件下，有效引偏空域通过三维空间 $(\theta_{rg}, \varphi_g, f_r \cos \theta_r)$ 表征。

3 典型自然地物假目标引偏空域计算

为了分析典型自然地物的引偏能力，需要先选取合适的双向反射分布函数(BRDF)模型，然后依据式(3)计算出一定条件下典型自然地物的有效引偏空域。

3.1 典型地物 BRDF 模型及参数的选取

典型地物表面相对于激光引偏所使用的光波段属粗糙面。粗糙表面的 BRDF 模型通常分为数值模型、解析模型和经验统计模型。其中经验统计模型是根据粗糙面多角度散射分布实验数据，通过优化理论将双向反射分布函数看成是关于角度和某几个参量为变量的数学函数，它考虑了粗糙表面的分类、各参量因子的物理含义，使用起来简洁、有效，被广泛应用于遥感和军事上，具有广泛的工程使用价值^[6-9]。根据相关学者的研究，吴振森等人在 Torrance-Sparrow 模型^[10]基础上改进而成的五参数半经验统计模型能够较准确地描述自然地物的反射特性^[9,11]。因此，这里采用五参数半经验统计模型研究植被类、砂石类典型地物的激光散射特性，其中植被类地物用树叶近似。

双向反射分布函数的五参数半经验统计模型为

$$f_r(\theta_i, \theta_r, \varphi) = k_b \frac{k_r^2 \cos \alpha}{1 + (k_r^2 - 1) \cos \alpha} \times \exp[b(1 - \cos \gamma)^a] \left[\frac{G(\theta_i, \theta_r, \varphi)}{\cos \theta_i \cos \theta_r} + \frac{k_d}{\cos \theta_i} \right], \quad (4)$$

表 1 五参数半经验统计模型待定系数的选取

Table 1 Selection of undetermined coefficients for five parameters semi-empirical statistical model

目标类型	k_b	k_r	k_d	a	b
植被类	0.1263	0.3002	0.04840	1.133	-10.52
砂石类	0.1565	0.2930	0.1054	1.453	-37.52

其中：

$$\cos \alpha = \frac{\cos \theta_i + \cos \theta_r}{2 \cos \gamma},$$

$$\cos^2 \gamma = \frac{1}{2}(\cos \theta_i \cos \theta_r + \sin \theta_i \sin \theta_r \cos \varphi_r + 1),$$

式中： k_b, k_r, k_d, a, b 为待定参数，这些待定系数直接引用文献[12]对多类目标样片激光散射特性的研究结果，如表 1 所示； $G(\theta_i, \theta_r, \varphi)$ 为遮蔽因子，一般情况下利用遮蔽因子的逼近公式并将其中参数取经验值可获得具体的符合一定工程要求的遮蔽因子值^[13]，这里的遮蔽因子采用此方法获得。

3.2 典型地物引偏空域的计算

在知道了典型地物的 BRDF 模型之后，就能够根据式(3)计算出一般工程应用条件下假目标的有效引偏空域。计算过程中， c 取大气能见度为 15 km 时的激光衰减系数，对常用的 1.06 μm 激光约为 0.17 km^{-1} ；干扰激光光斑的利用率 η_b 取 0.6 指示光斑的利用率 η_z 在此近似取 0.6；典型军用目标的 1.06 μm 激光反射系数 ρ_z 近似取为 0.3；指示器到目标距离 L 取 10 km；干扰激光与指示激光的功率比 α 取为 0.1。计算得到的植被和砂石类目标的 BRDF 三维分布和有效引偏空域如图 1、2 所示。为了比对分析，同时给出了半球反射率为 0.6 的漫反射目标 BRDF 三维分布和有效引偏空域，如图 3 所示。为了突出图形的工程层面的直观性，论文中的 BRDF 三维分布图和有效引偏空域分布图分别

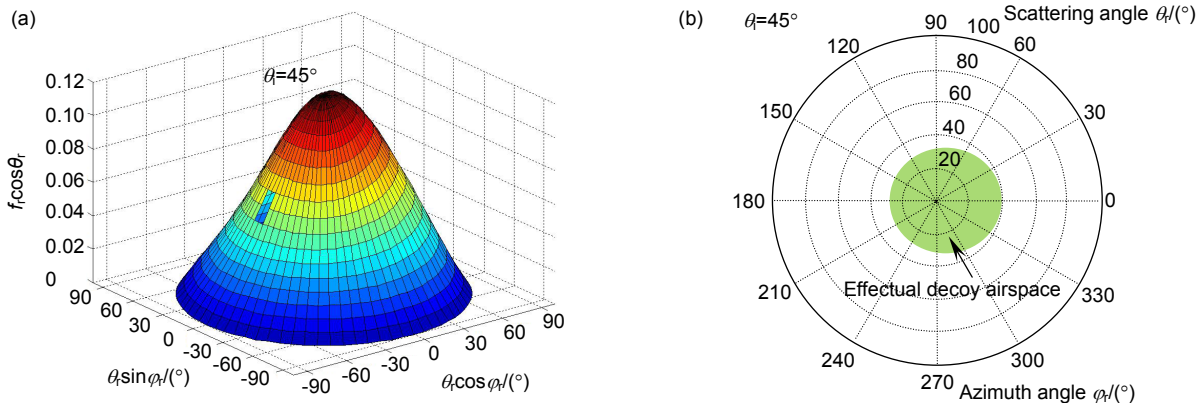


图 1 植被类目标的 BRDF 三维分布(a)和有效引偏空域的极坐标分布(b)

Fig. 1 Three-dimensional distribution of BRDF (a) and polar coordinates distribution of effectual decoy airspace (b) for vegetation object

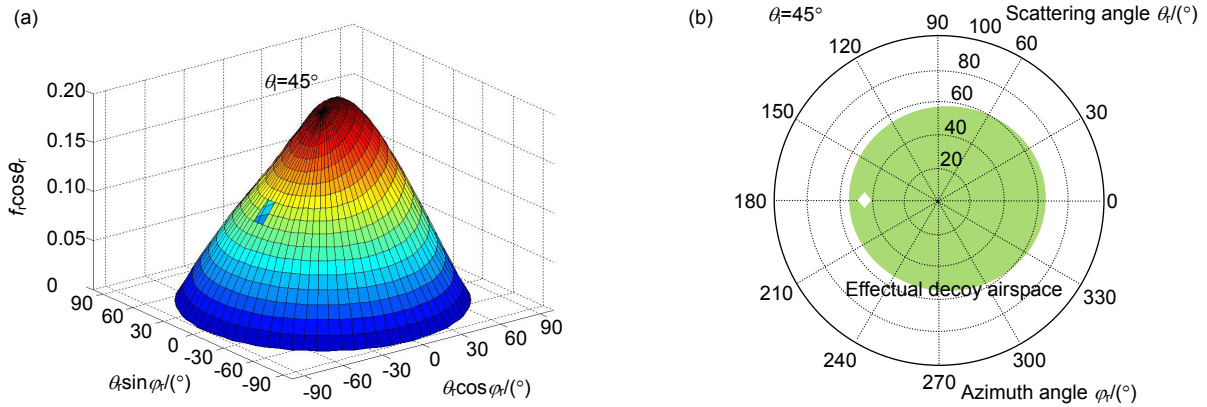


图 2 砂石类目标的 BRDF 三维分布(a)和有效引偏空域的极坐标分布(b)

Fig. 2 Three-dimensional distribution of BRDF (a) and polar coordinates distribution of effectual decoy airspace (b) for gravel object

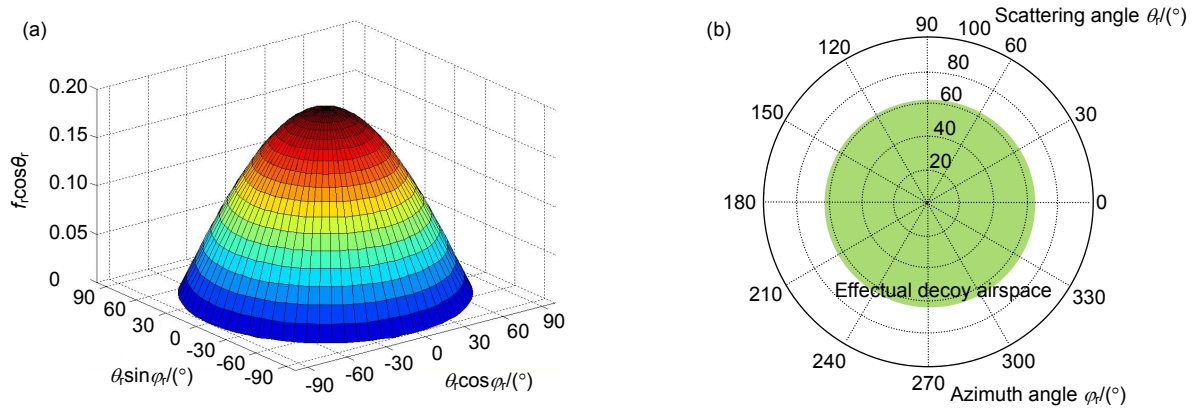


图 3 漫反射目标的 BRDF 三维分布(a)和有效引偏空域的极坐标分布(b)

Fig. 3 Three-dimensional distribution of BRDF (a) and polar coordinates distribution of effectual decoy airspace (b) for diffuse reflection object

采用采用柱面坐标系和极坐标系绘制。

从图 1~图 3 可以看出,在典型工作环境下,激光引偏干扰中假目标的 BRDF 三维分布和有效引偏空域分布与目标类型紧密相关,相同条件下植被类、砂石类和漫反射体目标的引偏空域依次增大;同时植被类和砂石类自然地物假目标反射光中存在一定的镜像反射分量,因此引偏空域也会向入射光的镜像方向有所偏移。

4 典型自然地物假目标引偏能力分析

从式(3)可以看出,自然地物假目标引偏能力或引偏空域由假目标表面的 BRDF 分布特性和大气激光衰减系数 c 、指示器到目标距离 L 、被防护目标半球反射

系数 ρ_z 、激光光斑的利用率 η 、干扰与指示激光功率之比 α 等对抗环境决定。对相同的自然地物目标和相同的干扰激光入射角 θ_i , c 、 L 、 ρ_z 、 η_z 越大, α 、 η_e 越小;引偏空域越大,引偏能力越强。从图 1(b), 2(b), 3(b)可以看出,引偏空域可以在式(3)的基础上利用相对方位角 ϕ_r 和散射角 θ_r 以极坐标的形式清晰表征,但目标表面的 BRDF 及其直接影响的目标引偏能力还与干扰激光的入射角 θ_i 紧密相关。为分析 θ_i 对目标引偏能力的影响,论文计算了 θ_i 分别为 10° 、 30° 和 60° 时,植被类目标的 BRDF 三维分布和有效引偏空域分布情况,如图 4~图 6 所示。

从图 4~图 6 可以看出,在典型工作环境下,对植被类目标,随着干扰激光入射角 θ_i 的增大,目标表面的 BRDF 三维分布和有效引偏空域分布都会发生较为

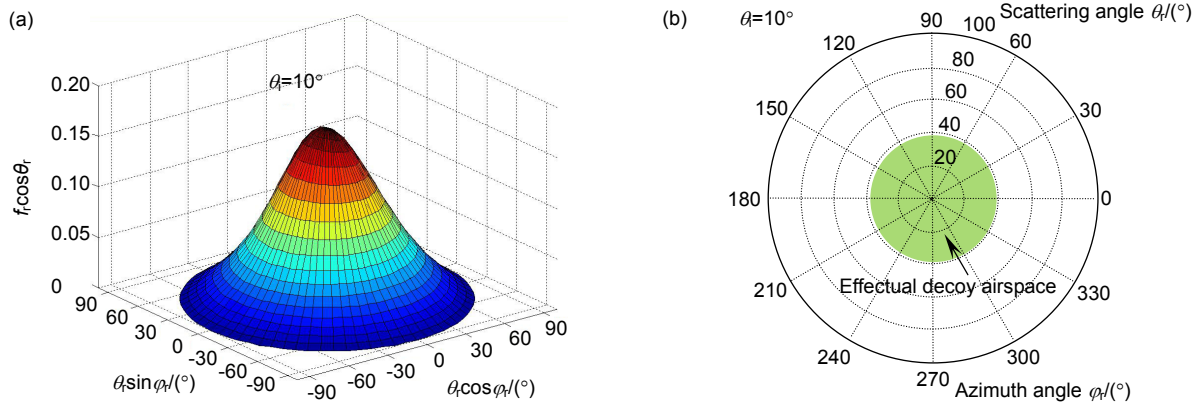


图 4 植被类目标在 $\theta_i=10^\circ$ 时的 BRDF 三维分布(a)和有效引偏空域的极坐标分布(b)

Fig. 4 Three-dimensional distribution of BRDF (a) and polar coordinates distribution of effectual decoy airspace (b) for vegetation object under incident angle $\theta_i=10^\circ$

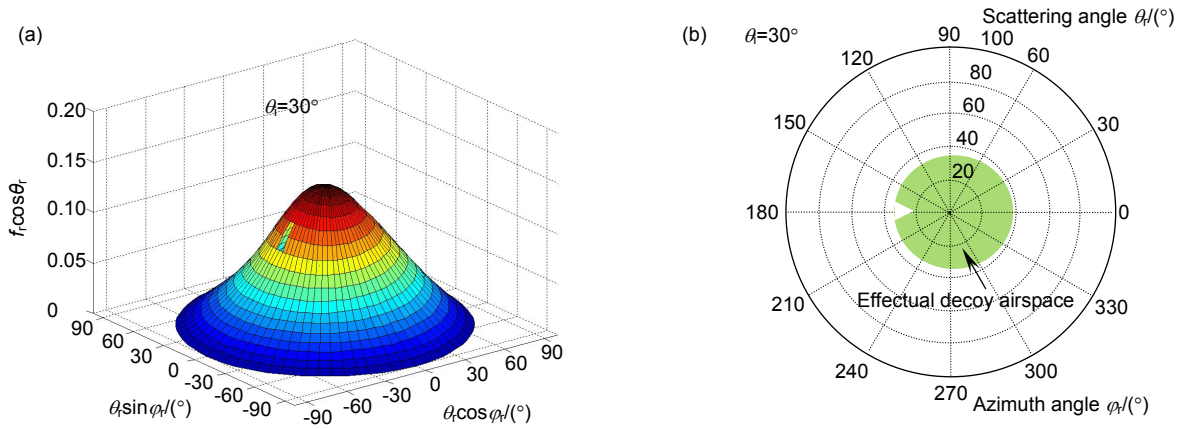


图 5 植被类目标在 $\theta_i=30^\circ$ 时的 BRDF 三维分布(a)和有效引偏空域的极坐标分布(b)

Fig. 5 Three-dimensional distribution of BRDF (a) and polar coordinates distribution of effectual decoy airspace (b) for vegetation object under incident angle $\theta_i=30^\circ$

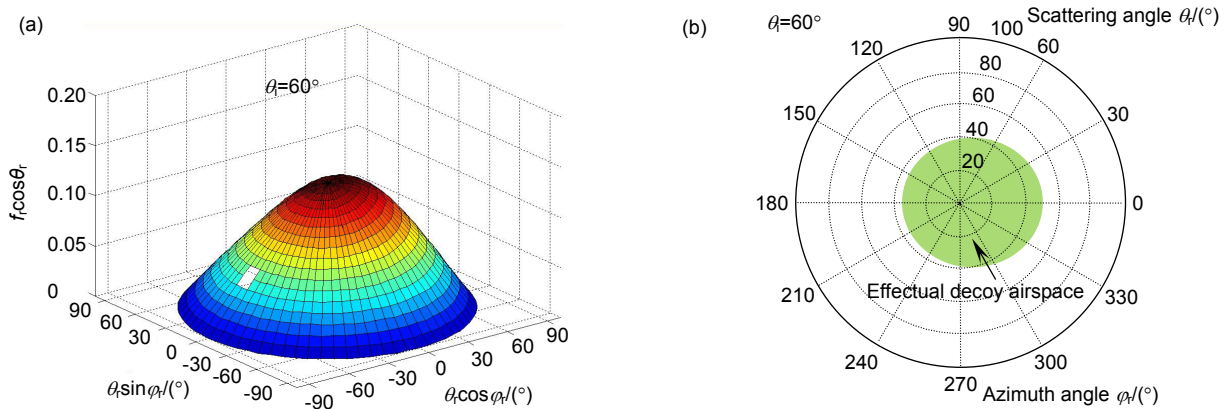


图 6 植被类目标在 $\theta_i=60^\circ$ 时的 BRDF 三维分布(a)和有效引偏空域的极坐标分布(b)

Fig. 6 Three-dimensional distribution of BRDF (a) and polar coordinates distribution of effectual decoy airspace (b) for vegetation object under incident angle $\theta_i=60^\circ$

明显的变化, BRDF 三维分布的峰值会减小, 但引偏空域却没有明显的趋势性变化规律。出现这种现象大可能是由于引偏空域的诸多影响因素综合作用的结果。从图中还可以看出, 在 θ_i 的镜像方向, 引偏空域有一定的镜像分量, 但远小于漫射分量。图中的缺口应该是文献[12]中用于拟合五参数半经验统计模型参数的实测数据缺少个别角度的实验数据所致, 因此模型参数的拟合精度也会影响引偏空域的分布结果。

5 结论

本文以自然地物假目标的有效引偏空域来表征自然地物假目标的引偏能力, 并建立了有效引偏空域计算模型, 还以植被类和砂石类地物为对象, 计算分析了这两类典型自然地物的有效引偏空域。研究结果表明, 激光引偏干扰中假目标有效引偏空域分布与目标类型紧密相关, 相同条件下植被类、砂石类和漫反射体目标的引偏空域依次增大; 植被类和砂石类自然地物的引偏空域存在远小于漫射分量的镜像反射分量; 对植被类目标, 干扰激光入射角 θ_i 的变化对有效引偏空域分布会产生较明显的影响, 但其引偏空域随入射角 θ_i 的变化却没有明显的趋势性变化规律。

自然地物作为假目标在实际干扰对抗过程中体现出的引偏能力还与对自然地物的战术使用环节紧密相关, 包括如何选择地物面的朝向、坡度等要素; 另外五参数半经验统计模型参数拟合的源数据及拟合精度也影响着引偏空域的计算分析结果, 这些问题有待进一步研究。

参考文献

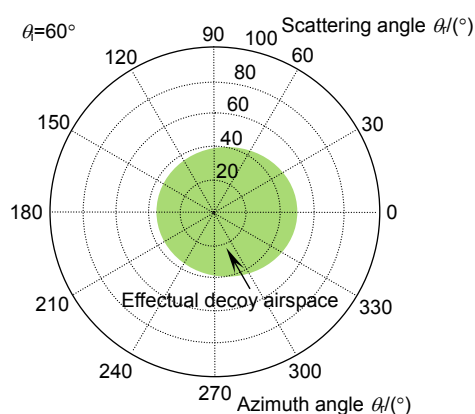
- [1] Lv Y G, Sun X Q. *Fundamentals and Applications of Laser Countermeasures*[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2015: 185–186.
吕跃广, 孙晓泉. 激光对抗原理与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2015: 185–186.
- [2] Chen W, Gong C K, Lu J, et al. Selection of laser angle deceptive interference to natural objects[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(2): 452–456.
陈蔚, 龚赤坤, 陆君, 等. 激光角度欺骗干扰设备对自然地物激光假目标的设置[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(2): 452–456.
- [3] Tong L P, Song D A. Research on selection of areas where

- natural objects serving as decoys in laser angle deception jamming[J]. *Journal of PLA Electronic Engineering Institute*, 2011, 30(2): 50–53.
全力鹏, 宋德安. 激光角度欺骗干扰中的自然地物假目标区域选择研究[J]. 中国人民解放军电子工程学院学报, 2011, 30(2): 50–53.
- [4] Sun C S, Zhang X H, Rao J H, et al. Layout of diffuse reflection board used for laser decoying[J]. *Laser & Infrared*, 2013, 43(3): 252–255.
孙春生, 张晓晖, 饶炯辉, 等. 激光引偏干扰中漫反射板假目标的布设方法[J]. 激光与红外, 2013, 43(3): 252–255.
 - [5] Sun C S, Zhang X H, Zhang S. Guarded angle of laser decoy in laser trick jamming[J]. *Laser & Infrared*, 2017, 47(3): 347–351.
孙春生, 张晓晖, 张爽. 激光引偏干扰中假目标的防护角与应用[J]. 激光与红外, 2017, 47(3): 347–351.
 - [6] Feidenhans'l N A, Hansen P E, Pilný L, et al. Comparison of optical methods for surface roughness characterization[J]. *Measurement Science and Technology*, 2015, 26: 085208.
 - [7] Wen J G, Liu Q, Xiao Q, et al. Characterizing land surface anisotropic reflectance over rugged terrain: a review of concepts and recent developments[J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(3): 370.
 - [8] Sun Z Q, Wu D, Zhao Y S. Improved kernel-driven semi-empirical bidirectional reflectance factor models for characterizing the reflection of vegetation covers: considering a specular kernel[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, 260–261: 95–108.
 - [9] Wu Z S, Xie D H, Xie P H, et al. Modeling reflectance function from rough surface and algorithms[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, 22(8): 897–901.
吴振森, 谢东辉, 谢品华, 等. 粗糙表面激光散射统计建模的遗传算法[J]. 光学学报, 2002, 22(8): 897–901.
 - [10] Torrance K E, Sparrow E M. Theory for off-specular reflection from roughened surfaces[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1967, 57(9): 1105–1114.
 - [11] Yang Y F, Wu Z S, Cao Y H. Practical six-parameter bidirectional reflectance distribution function model for rough surface[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(2): 0229001.
杨玉峰, 吴振森, 曹运华. 一种实用型粗糙面六参数双向反射分布函数模型[J]. 光学学报, 2012, 32(2): 0229001.
 - [12] Chen Y D, Zhang W A, Chen Y C, et al. Laser scattering characteristic of several object samples[J]. *Journal of Applied Optics*, 2011, 32(6): 1251–1256.
陈玉丹, 张维安, 陈玉成, 等. 多类目标样片激光散射特性研究[J]. 应用光学, 2011, 32(6): 1251–1256.
 - [13] Wang A X, Wu Z S. Parameter inversion of shadowing function in light scattering model[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(1): 332–337.
王安祥, 吴振森. 光散射模型中遮蔽函数的参数反演[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(1): 332–337.

Deceiving ability of typical natural objects used for false target in laser decoy jamming

Sun Chunsheng*, Zhang Shuang, Zhang Xiaohui

College of Weaponry Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan, Hubei 430033, China



Polar coordinates distribution of effectual decoy airspace for vegetation object under incident angle $\theta_i=60^\circ$

Overview: Laser decoy jamming is an effective way to combat semi-active laser guided weapons. Diffuse reflecting targets or natural objects are usually used as false targets in laser decoy jamming system. The deceiving ability of the false targets directly determines the layout method and application effect of the false targets. Due to the Lambert reflection characteristics of diffuse reflector target, its deflection ability is easy to be known, while the laser reflection characteristics of natural objects are much more complex. The deflection ability of natural objects is affected by many factors, such as the type of natural object, the parameters of incident laser and the seeker parameters of incoming missile. It is of great significance to study the deflection ability of natural object false target under typical conditions for improving the flexibility of laser decoy jamming system and giving full play to its combat effectiveness. The deceiving ability characterized by effectual decoy airspace of typical natural objects was calculated and analyzed in this paper. Firstly, on the premise of fully considering the target reflection characteristics, jamming-indicating laser intensity, atmospheric laser attenuation coefficient and other factors, the analysis model of false target deflection ability was established under the condition of signal suppression coefficient $K(\geq 1)$, which was a complex expression related to the bidirectional reflection distribution function of false target and the parameters of application conditions. Then, a five-parameter semi-empirical statistical model based on the Torrance-Sparrow model was selected to describe the bi-directional laser reflection characteristics of typical natural objects. The undetermined parameters in the statistical model were derived from the research results of existing literatures, and the parameters related to the application conditions in the deflection analysis model were based on the general engineering practice. Based on these preconditions, the effective decoy airspace of typical natural object false targets was calculated and the deceiving ability was analyzed. The results show that the effective cheating airspace of false target is closely related to the type of targets, and the deceiving ability of vegetation, gravel and diffuse reflection objects is enhanced in turn under the same conditions. There exists a mirror reflection component that is much smaller than the diffuse reflection component in the decoy airspace of vegetation and gravel natural objects, and for vegetation targets, the variation of the incident angle of jamming laser has obvious influence on the distribution of effectual decoy airspace. However, there is no obvious trend change rule of the decoy airspace with the incidence angle. The research results are instructive for the reasonable application of typical natural objects used as false target.

Citation: Sun C S, Zhang S, Zhang X H. Deceiving ability of typical natural objects used for false target in laser decoy jamming[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2019, 46(1): 180453

* E-mail: scs96581@163.com