

激光与光电子学进展

激光角度欺骗干扰自然地物假目标运用研究

黄建鲁*, 沈涛

火箭军工程大学核工程学院, 陕西 西安 710025

摘要 针对激光角度欺骗干扰中自然地物假目标应用需求,在分析了干扰能量传输和干扰过程中武器威胁角、地物倾角以及入射角、反射角等角度关系的基础上,建立了自然地物假目标干扰能量分布模型。依据所建立的模型,对砂石类和建筑类地物反射干扰能量分布进行了仿真研究。仿真结果表明,在相同条件下,砂石类地物比建筑类地物干扰效果好;同一种地物反射的干扰能量随地物倾角的增大而增大;对于漫反射特性较好的建筑类假目标,地物倾角一定时,威胁角在大致与地物倾角互余时反射能量达到最大;对于砂石类目标,存在随地物倾角变化的镜像反射分量,使得威胁角和地物倾角的余角存在偏差,偏差角度近似成高斯分布。研究结果对自然地物假目标的运用具有一定的指导意义。

关键词 激光角度欺骗干扰; 自然地物; 双向反射分布函数; 干扰能量; 威胁角

中图分类号 TN977

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202259.0126001

Application of Natural Object False Target in Laser Angle Deception Jamming

Huang Jianlu*, Shen Tao

School of Nuclear Engineering, Rocket Force University of Engineering, Xi'an, Shanxi 710025, China

Abstract Aiming at the application requirements of natural objects false targets in laser angle deception jamming, based on the analysis of the energy transmission of jamming and the relationship between the weapon threat angle, ground object inclination, incident angle and reflection angle in the jamming process, the energy distribution model of natural object false target established. According to the established model, the simulation study on the disturbance energy distribution of sand and gravel and building features is carried out. The simulation results show that under the same conditions, the sand and gravel features have better interference effect than the building features. The interference energy reflected from the same ground object increases with the increase of the angle of the ground object. For the building false target with better diffuse reflection characteristics, when the ground object inclination is constant, the reflection energy is the largest when the threat angle roughly coexists with the ground object inclination. For sand and gravel targets, there is a mirror reflection component with the change of the inclination angle of the object, which makes the threat angle and the residual angle of the inclination angle of the object deviate, and the deviation angle is approximately a Gaussian distribution. The research results have certain guiding significance for the application of false target of natural objects.

Key words laser angle deception jamming; natural object; bidirectional reflectance distribution function; interference energy; threat angle

收稿日期: 2021-04-01; 修回日期: 2021-04-07; 录用日期: 2021-04-12

基金项目: 国防科技创新特区项目(099018)

通信作者: *402972836@qq.com

1 引言

激光角度欺骗干扰是对抗半主动激光制导武器的一种有效手段。由于干扰激光器发射干扰激光对假目标进行照射,反射的干扰激光信号对激光半主动制导武器进行引偏干扰,从而有效保护重点目标^[1]。在实施激光角度欺骗干扰时,通常可以采用漫反射板或自然地物作为假目标。目前对漫反射板假目标干扰效果、布设策略^[2-4]的研究已经相对成熟。但战场环境日益复杂,有些应用场景不适合布置漫反射板假目标实施引偏干扰,因此有必要对自然地物假目标的运用进行分析和研究。

已有文献中对自然地物假目标引偏效果和运用进行了研究。这些文献研究^[5-6]和分析了自然地物散射特性,定性给出了假目标类型以及面型选择或干扰激光照射部位的建议,但定量研究还不够深入。主要表现在以下两个方面:一是模型建立还不够精细,缺乏对不同入射角和反射角下的激光能量分布研究;二是没有考虑实际应用中不同倾斜角的自然地物对激光制导武器的干扰特性。

论文针对以上不足,建立了自然地物干扰激光能量分布模型。在此基础上仿真研究了地物倾斜角和威胁角对干扰能量分布的影响。基于仿真分析,给出了不同地物倾角时最佳干扰效果时威胁角范围,为自然地物假目标的运用提供了理论支撑。

2 自然地物干扰激光能量分布模型

2.1 能量传输模型

设干扰激光器输出功率为 P_i , 干扰激光器到自然地物的距离为 R_i , 干扰激光器到假目标距离上的激光大气透射率为 T_i 。则自然地物光斑上的光功率密度:

$$E_i = \frac{P_i T_i}{A}, \quad (1)$$

式中 A 为干扰激光光束在自然地物上以 θ_i 为入射角形成的光斑面积:

$$A = \frac{\pi \theta_i^2 R_i^2}{4 \cos \theta_i}, \quad (2)$$

式中 θ_i 为光束的束散角。

自然地物表面的反射特性可以由双向反射分

布函数(BRDF) $f_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r)$ 表征,

$$f_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) = \frac{dL_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r)}{dE_i(\theta_i, \varphi_i)}, \quad (3)$$

式中 θ, φ 分别是球坐标下的天顶角和方位角;下标 i 和 r 分别代表入射量和反射量; $dL_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r)$ 为 (θ_r, φ_r) 方向上的反射亮度; $dE_i(\theta_i, \varphi_i)$ 为 (θ_i, φ_i) 方向上的入射照度。

导引头探测到的来自假目标反射的光功率密度:

$$E = \frac{L T_r A \cos \theta_r}{R_r^2}, \quad (4)$$

式中, T_r 为漫反射板到导引头距离 R_r 上的激光大气透射率, θ_r 为干扰激光光束在漫反射板上的反射角。

联合(1)、(2)、(3)、(4)式得导引头探测点处的光功率密度:

$$E = \frac{4 P_i T_i T_r}{\pi \theta_i^2 R_i^2 R_r^2} \iint_A \cos \theta_i \cos \theta_r f_r dA. \quad (5)$$

设导引头探测系统的接收面积为 A_r , 则导引头探测系统接收光功率:

$$P_r = \frac{4 P_i T_i T_r A_r}{\pi \theta_i^2 R_i^2 R_r^2} \iint_A \cos \theta_i \cos \theta_r f_r dA. \quad (6)$$

通常认为在传输过程中干扰激光脉冲宽度变化不大,则:

$$\frac{E_s}{E_t} = \frac{P_r}{P_t}. \quad (7)$$

式中 E_s 表示导引头接收到的能量, (6) 式中的激光传输过程中的大气透射率可以表示为:

$$\begin{cases} T_i = \exp(-cR_i) \\ T_r = \exp(-cR_r) \end{cases}. \quad (8)$$

联合(6)、(7)、(8)式得导引头探测点处的光能量密度:

$$E_r = \frac{E_s}{A_r} = \frac{4 E_t}{\pi \theta_i^2 R_i^2 R_r^2} \exp[-c(R_i + R_r)] \iint_A \cos \theta_i \cos \theta_r f_r dA. \quad (9)$$

2.2 BRDF 模型

基于 Torrance-Sparrow 模型的五参数半经验统计模型对自然地物的激光散射特性拟合度较高^[7]。其表达式为:

$$\begin{cases} f_r(\theta_i, \theta_r, \varphi) = k_b \frac{k_r^2 \cos \alpha}{1 + (k_r^2 - 1) \cos \alpha} \exp[b(1 - \cos \gamma)^a] \frac{G(\theta_i, \theta_r, \varphi)}{\cos \theta_i \cos \theta_r} + \frac{k_d}{\cos \theta_i} \\ \cos \alpha = \frac{\cos \theta_i + \cos \theta_r}{2 \cos \gamma} \\ \cos^2 \gamma = \frac{1}{2} (\cos \theta_i \cos \theta_r + \sin \theta_i \sin \theta_r \cos \varphi + 1) \end{cases}, \quad (10)$$

式中： k_b, k_r, k_d, a, b 为待定参数，与地物类型有关，具体取值如表 1 所示。

表 1 BRDF 模型参数取值

Table 1 Parameters of BRDF model

Types of objects	k_b	k_r	k_d	a	b
Sand and gravel	0.1565	0.2930	0.1054	1.453	-37.52
Construction	0.08822	0.3250	0.04862	1.760	-16.92

2.3 反射模型

实际防护中自然地物假目标的形状特性将影响到入射角和反射角的计算，这里讨论具有一定倾斜角的平面漫反射体自然地物假目标干扰能量分布情况，以导引头来袭方向为 x 轴正向，自然地物的底边中心点为坐标原点，建立坐标系如图 1(a) 所示。

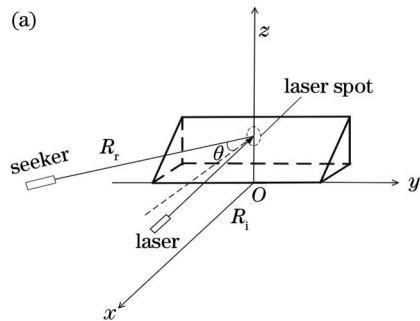


图 1 中自然地物倾斜角为 θ_d ，导引头与自然地物的距离为 R_r ，威胁角为 θ ，干扰激光器位于 x 轴正向，与自然地物假目标距离为 R_i 。为便于观察，图 1(b) 给出了从 y 轴正向观察各种角度关系。

假设干扰激光平行于地面照射自然地物，此时的人射角为

$$\theta_i = \frac{\pi}{2} - \theta_d. \quad (11)$$

反射角 θ_r 取值与入射角 θ_i 和威胁角 θ 有关，其表达式为：

$$\theta_r = \begin{cases} \theta - \theta_i, & \theta \geq \theta_i \\ \theta_i - \theta, & \theta < \theta_i \end{cases}. \quad (12)$$

由于导引头和干扰激光器都位于 x 轴正向，则方位角 $\varphi = 0^\circ$ 。

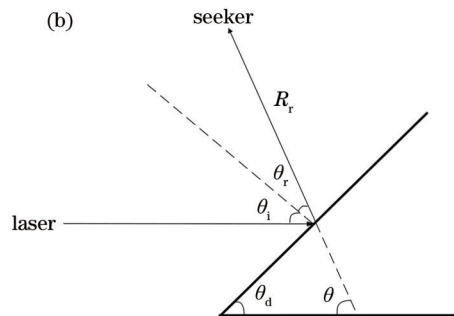


图 1 自然地物、导引头与激光器相对位置及角度关系。(a) 三维坐标图；(b) 侧视图

Fig. 1 Relative position of natural features, seeker and laser and relation of angle. (a) 3D coordinate; (b) side view

3 仿真实验及结果分析

仿真采用各项参数如下：导引头与自然地物距离 $R_r = 4$ km，干扰激光器与自然地物距离 $R_i = 0.2$ km，干扰激光脉冲能量 $E_i = 50$ mJ，大气衰减系数 c 取能见度为 10 km 时的值 0.166，对两种类型地物在不同威胁角和地物倾角时导引头接收能量密度进行分析。仿真结果如图 2 和图 3 所示。

图 2(a) 和图 3(a) 中 x 轴和 y 轴分别为为武器威胁角 θ 和地物倾角 θ_d ， z 轴为激光制导武器导引头接收到的能量密度 E_r 。能量密度越大，则地物的干扰效果越好。图 2(b) 和图 3(b) 分别是图 2(a) 和

图 3(a) 的俯视图。不同颜色表示导引头接收能量的大小差异。

分析图 2 图 3 可以得到以下结论：

(1) 相同条件下砂石类假目标干扰效果比建筑类假目标好；

(2) 导引头接收的能量大致是以 $\theta + \theta_d = 90^\circ$ 为脊背的“脊”形结构，脊背处的能量最高。

(3) 脊背为一递增曲线，随地物倾角 θ_d 的增大（对应的威胁角 θ 减小）而增大。

进一步分析干扰能量数据可知，导引头接收到的建筑类目标反射的干扰能量最大值出现在曲线“脊背”处，而接收到砂石类目标反射的干扰能量最

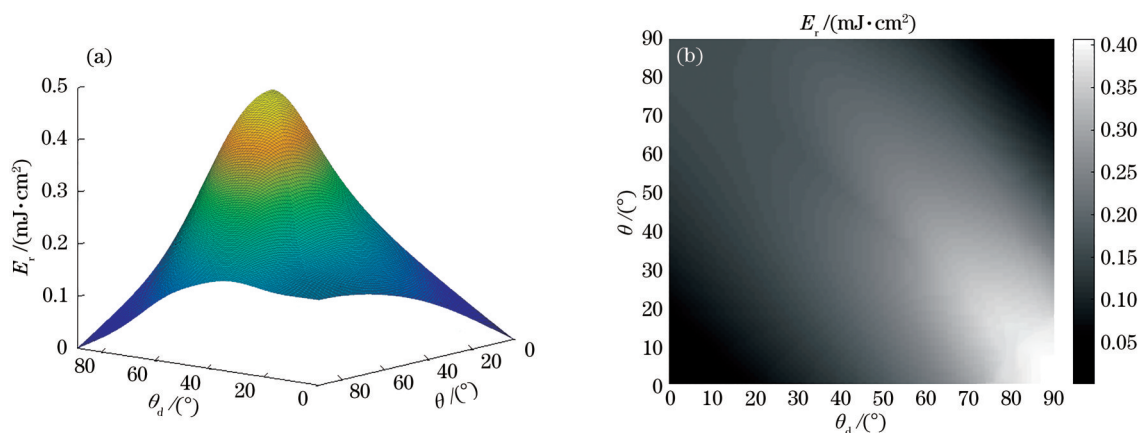


图 2 砂石类假目标干扰能量分布(a)三维图和(b)俯视图

Fig. 2 (a) 3D diagram and (b) top view of interference energy distribution of sand and gravel false targets

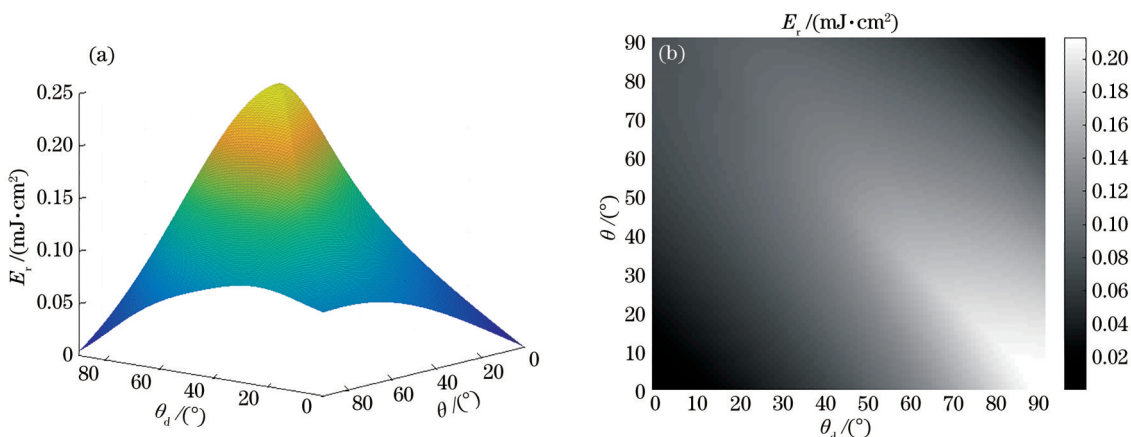


图 3 建筑类假目标干扰能量分布(a)三维图和(b)俯视图

Fig. 3 (a) 3D diagram and (b) top view of interference energy distribution of construction false targets

大值出现在“脊背”两侧。出现这种现象是因为建筑类假目标具有较好的漫反射特性,而砂石类假目标除了产生漫反射外,还存在一定程度的镜像反射。

有较好的漫反射特性,但其在相同条件下反射的能量远高于建筑类假目标,因此深入研究砂石类目标的干扰能量分布是十分必要的。

4 砂石类目标运用研究

根据仿真实验得到的数据,整理得到了不同地物倾角下干扰能量最大值时威胁角的大小与“脊背”处威胁角大小的差值,结果如表 2 所示。

4.1 相关数据

通过仿真实验可以看出砂石类假目标虽然没

表 2 不同地物倾斜角下的威胁角差

Table 2 Threat angle difference at different ground feature inclination angles

1	3	5	7	9	10	12	14	16	18	20	23	26	29	31	33	36	39
0	0	0	1	1	2	3	4	7	8	10	13	15	16	16	15	15	14
41	43	45	47	50	52	55	58	61	64	65	68	71	75	80	85	90	
13	12	12	11	9	8	5	4	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0

4.2 拟合函数模型

根据表 2 中的数值,绘制威胁角差与地物倾角的关系散点图如图 4 所示。

由(11)式可知,入射角与地物倾角互余,地物

倾角大于 65°,即入射角小于 25°时,反射能量最大时的威胁角取值位于“脊背”处,说明对砂石类目标在激光小角度入射时,漫反射和镜像反射分量都集中在法线附近,而随着入射角增大,镜像反射

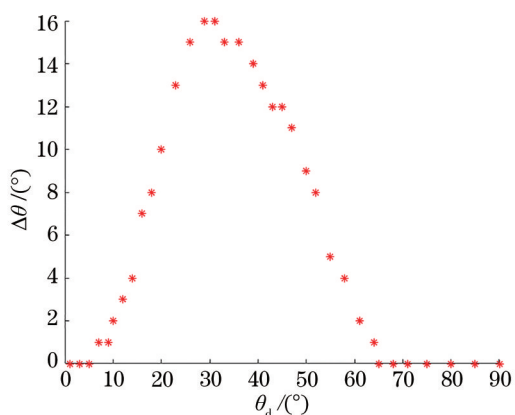


图4 威胁角差与地物倾角关系图

Fig. 4 Relationship between threat Angle different and ground feature inclination

分量开始偏离法线方向,但镜像分量中心偏离角度要小于入射角^[8]。当入射角增大到 60°左右时,即地物倾角约为 30°时,镜像反射分量偏离角度达到最大,此时反射能量最大值时威胁角取值与“脊背”处差值达到最大值 16°。当入射角大于 60°时,随着入射角的继续增大,漫反射分量开始逐渐占据主导地位,直到入射角等于 85°时,威胁角差归零。

分析图 4 威胁角差随地物倾角变化的特点,采用 4 种拟合函数模型^[8]进行数据拟合,分别是:正弦函数、傅里叶函数、有理函数、高斯函数。综合考虑参数数量、复杂度、拟合性能,最终确定 4 种拟合函数的具体形式如下:

(1) 正弦函数

$$f(x) = a_1 \sin(b_1 x + c_1) + a_2 \sin(b_2 x + c_2) + a_3 \sin(b_3 x + c_3) + a_4 \sin(b_4 x + c_4), \quad (13)$$

(2) 傅里叶函数

$$f(x) = a_0 + a_1 \cos(wx) + b_1 \sin(wx) + a_2 \cos(2wx) + b_2 \sin(2wx) + a_3 \cos(3wx) + b_3 \sin(3wx) + a_4 \cos(4wx) + b_4 \sin(4wx), \quad (14)$$

(3) 有理函数

$$f(x) = \frac{p_1 x^4 + p_2 x^3 + p_3 x^2 + p_4 x + p_5}{x^4 + q_1 x^3 + q_2 x^2 + q_3 x + q_4}, \quad (15)$$

(4) 高斯函数

$$f(x) = a_1 \exp\left[-\left(\frac{x - b_1}{c_1}\right)^2\right] + a_2 \exp\left[-\left(\frac{x - b_2}{c_2}\right)^2\right]. \quad (16)$$

4.3 拟合结果

用 4.2 节中 4 种拟合函数对表 2 中的数据进行拟合,并用最小二乘法对拟合函数进行求解,得到

的拟合结果如表 3 和图 5 所示。

由表 3 可知,在综合考虑函数复杂度和拟合性能的前提下,4 种拟合函数的确定系数 R-square 均

表 3 4 种拟合模型拟合结果分析

Table 3 Analysis of fitting results of four fitting models

Parameters	Sine function	Fourier function	Rational function	Gaussian function
Number of undetermined coefficients	12	10	9	6
Undetermined coefficient values	$a_1=11.28$ $c_1=0.3028$ $b_2=0.1128$ $a_3=0.8563$ $c_3=3.67$ $b_4=0.2648$ $b_1=0.03685$ $a_2=4.677$ $c_2=-2.295$ $b_3=0.1781$ $a_4=0.5958$ $c_4=1.036$	$a_0=0.659$ $b_1=4.977$ $b_2=-1.831$ $b_3=-0.7993$ $b_4=0.2792$ $a_1=-6.51$ $a_2=-0.04002$ $a_3=0.3667$ $a_4=0.07362$ $w=0.07213$	$p_1=-0.5511$ $p_2=-3620$ $p_3=-882600$ $q_2=8811$ $q_4=2213000$ $p_2=-40.5$ $p_4=2.741e+05$ $q_1=-154.5$ $q_3=-218800$	$a_1=14.49$ $c_1=12.3$ $b_2=45.32$ $b_1=27.5$ $a_2=9.945$ $c_2=12.24$
SSE	3.112	3.074	3.416	3.854
R-square	0.9974	0.9975	0.9972	0.9965
RMSE	0.3678	0.3507	0.3625	0.385

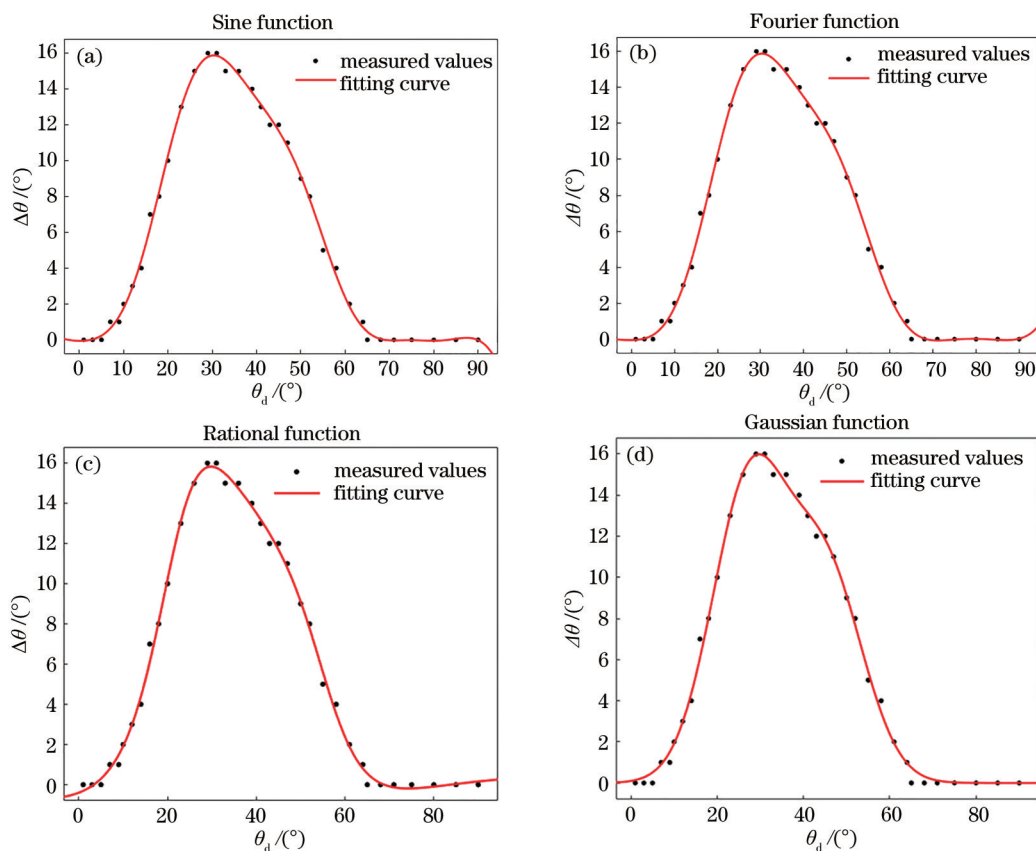


图 5 4 种拟合模型拟合曲线

Fig. 5 Fitting curves of the four fitting models

大于 0.996, 表明这 4 种拟合函数均能对数据进行较好的拟合, 均方根误差 (RMSE) 在 0.35~0.385 之间, 误差平方和 (SSE) 均在 3~3.9 之间。从图 5 中也可以看出 4 种拟合函数拟合效果都比较好。若考虑拟合性能, 4 种拟合函数中傅里叶函数拟合度最高, 均方根误差以及误差平方和最小。若考虑参数个数, 则高斯函数所需参数最少, 拟合性能与傅里叶函数相差不大, 而且从图 5 中也可以看出高斯函数在拟合曲线“尾部”没有明显波动, 比其他几个拟合函数更能反应数据的真实取值, 因此可以将高斯函数作为最佳拟合函数。

在实际防护过程中, 在倾角一定的条件下, 自然地物能够实现最佳干扰时导引头的威胁角 θ 满足以下条件:

$$\pi/2 - \theta_d - \Delta\theta \leq \theta \leq \pi/2 - \theta_d + \Delta\theta, \quad (17)$$

式中, $\Delta\theta$ 的取值可以由高斯函数进行拟合。

5 结 论

通过建立自然地物假目标干扰能量分布模型, 研究了地物倾角和威胁角对导引头接收自然地物

假目标反射的干扰能量的影响。仿真实验表明: 在相同条件下的两种自然地物, 砂石类要比建筑类假目标反射干扰能量高。因此在激光引偏干扰中选取自然地物假目标时, 砂石类假目标优先级要高于建筑类假目标。但相比之下, 砂石类假目标漫反射特性不如建筑类假目标, 在干扰过程中随地物倾角的变化会产生不同程度的镜像反射, 论文给出了不同倾角下砂石类假目标干扰效果最佳时的威胁角范围。

论文所建立的干扰能量分布模型主要针对具有一定倾角且形状规则的自然地物, 对于形态复杂的自然地物假目标干扰效果还有待进一步研究。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] 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(03):252-255.
- 孙春生, 张晓晖, 饶炯辉, 张爽. 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(03):252-255.
- [3] Qi G. Research on laser angle deception jamming technology[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2015.
- 元刚. 对激光角度欺骗干扰技术的研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2015.
- [4] Shen T, Liu Z G, Gou X T, et al. Research on collocation method of decoy for laser protection of rectangular military object[J]. Laser & Infrared, 2016, 46(8): 989-993.
- 沈涛, 刘志国, 苟小涛, 等. 长条形军事目标激光防护假目标配置方法研究[J]. 激光与红外, 2016, 46(8): 989-993.
- [5] 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.
- [6] Wang D F, Chu Z F, Tang Q Y, et al. Influence of false targets' scattering characteristic on the laser active decoying effectiveness[J]. Laser & Infrared, 2015, 45(2): 199-203.
- 王德飞, 楚振锋, 唐启永, 等. 假目标散射特性对激光有源诱偏效果的影响[J]. 激光与红外, 2015, 45(2): 199-203.
- [7] 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.
- [8] Deng J Z, Liu Z X. Calculation method[M]. 2nd ed. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2001: 90-97.
- 邓建中, 刘之行. 计算方法[M]. 2版. 西安: 西安交通大学出版社, 2001: 90-97.