

激光与光电子学进展

基于微纳结构的光学诱饵仿真设计研究

刘甜^{1*}, 王麟博¹, 蔡长龙^{2**}, 梁海锋¹, 李世杰¹, 方洋¹, 龚立榕¹¹西安工业大学光电工程学院, 陕西 西安 710021;²西安工业大学兵器科学与技术学院, 陕西 西安 710021

摘要 传统的光学诱饵构成复杂, 装载要求较高, 为此设计了具有较高反射性能的简单微结构的光学诱饵。首先, 通过 TracePro 光学仿真软件, 对玻璃微珠结构、截角角锥结构和立方角锥结构三种不同结构进行反射率的仿真, 筛选出最符合光学诱饵高反射率要求的结构。然后, 通过对不同尺寸单元微结构的反射仿真, 确定光学诱饵的单元微结构尺寸。最后, 通过对入射角度偏转对反射率影响的仿真, 验证反射结构是否满足光学诱饵的要求。结果表明, 立方角锥反射结构更符合光学诱饵的设计要求。

关键词 光学器件; 光学诱饵; 原向反射; 立方角锥; 仿真研究

中图分类号 E928.9

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP213058

Simulation Design of Optical Decoy Based on Micro-Nano Structure

Liu Tian^{1*}, Wang Linbo¹, Cai Changlong^{2**}, Liang Haifeng¹,Li Shijie¹, Fang Yang¹, Gong Lirong¹¹School of Optoelectronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, Shaanxi, China;²School of Defense Science and Technology, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, Shaanxi, China

Abstract Traditional optical decoys have complex compositions and high loading requirements. In this study, optical decoys with simple microstructures with higher reflection performance were designed. First, the TracePro optical simulation software was used to simulate the reflectivity of the glass bead structure, truncated angular cone structure, and cubic angular cone structure, and the structure that best meets the requirements of high reflectivity of optical bait was selected. Then, the microstructure size of the optical decoy were determined by the reflection simulation of the microstructure of the unit with different sizes. Finally, the effect of incident angle deflection in reflectivity was simulated to determine whether the reflector meets the requirements of the optical bait. Results show that the cubic cone reflection structure is more suitable for the design of optical decoys.

Key words optical devices; optical decoy; directivity reflection; cubic cone; simulation study

1 引言

在现代战争中, 激光制导武器所发挥的作用令人瞩目, 其命中率可高达 90% 以上, 命中精度优于 1 m, 显示出强大的作战威力^[1-2]。为了遏制激光制导武器强大的杀伤力, 对激光武器诱骗技术的研究也迫在眉睫^[3-4]。诱饵装置使敌方光电雷达探测出现偏差, 从而破坏其探测的连续性和准确性, 保护己方飞行目标的顺利脱离。因此, 研制光学诱饵干扰敌方信号是非常必要的。

陆军军官学院蒋启泽等^[5]分析了激光诱饵系统的作战任务和使用特点, 提出了激光诱饵系统的使用原则、使用机制和条件; 中国建筑材料科学研究总院贾菲等^[6]分析了面源红外诱饵的干扰机理, 介绍了国内外面源红外诱饵的研究进展和装备现状; 中国电子科技集团公司光电研究院张静元等^[7]对国外动力型诱饵的技术研究和装备现状进行了介绍; 赵铭军等^[8]对不同干扰方式下扫描成像设备的干扰概率进行了理论计算。

为了实现对敌方光电雷达激光测距仪的干扰, 可

收稿日期: 2021-11-25; 修回日期: 2021-12-28; 录用日期: 2022-01-17; 网络首发日期: 2022-01-27

基金项目: 国家自然科学基金(11975177)、陕西省重点研发计划(2020GY-045)

通信作者: *lt15829937073@163.com; **879867254@qq.com;

以在飞行目标周围的合适位置或区域,朝着激光测距仪的照射方向,布放对激光具有较高反射率的激光高反射材料,该激光反射材料部分或全部处在敌方激光测距仪的照射激光光束内时,可降低直接照射到已飞行目标上的激光能量,同时反射激光,并且此时敌方激光测距仪所接受到的激光信号是飞行目标和激光反射材料假目标共同的反射能量,造成目标锁定偏差。依照此理念,本文设计了具有原向反射微结构的光学诱饵。设计具有较高反射率的体系,可从两个方面入手,一是元件结构本身具有反射条件,二是元件表面光洁及材料性能来达到高反射率。本文主要从元件结构入手来研究具有高反射性能的光学诱饵。

2 光学诱饵微结构结构

现有可构成原向反射特性的结构主要包括球体结构和角锥结构两类,而角锥结构又包含了截角角锥结构和立方角锥结构^[9]。

2.1 球面结构

球面反射结构主要为单层反射率高的玻璃微珠,假设玻璃微珠相当于一个微型透镜^[10]。当一定角度范围内的入射光线传播到玻璃微珠表面时,将发生折射现象,光线的传播方向发生偏折,然后光线会聚到玻璃微珠后表面的反射层上,在反射层上发生镜面反射后,再次经过折射作用穿过玻璃微珠表面,即可得到两条平行的光线,发生原向返回^[11]。假设光线聚焦到玻璃微珠底部且发生镜面反射现象,如图 1(a)所示。则根据单球面折射公式^[12],可得

$$\frac{n_2}{l'} - \frac{n_1}{l} = \frac{n_2 - n_1}{r}, \quad (1)$$

式中: n_1 代表的是空间折射率; n_2 代表的是玻璃微珠的折射率; r 为球面半径; l 为物方截距,即顶点 o' 到光线与光轴交点的距离,此时光线是平行入射,则 l 为无限大; l' 是像方截距,即入射光线经过球面折射以后交于光轴 A 点的距离。而此时空间中的介质为空气,可近似等于 1,则可以得到

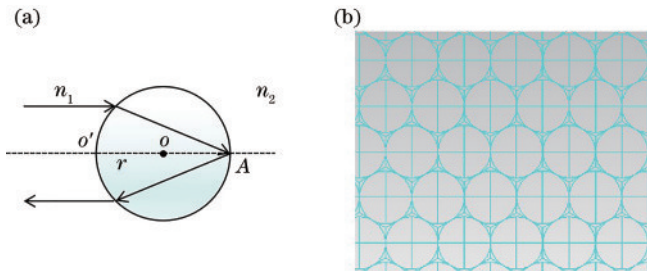


图 1 微珠结构示意图。(a)玻璃微珠原向反射原理;(b)微珠结构阵列模型

Fig. 1 Schematic diagram of microsphere structure. (a) Principle of orthotropic reflection of glass microspheres; (b) array model of microsphere structure

$$\frac{n_2}{l'} = \frac{n_2 - 1}{r}. \quad (2)$$

若想焦点聚集在玻璃微珠底部发生镜面反射,则需 $l'=2r$,代入式(2)可得, $n_2=2$,即当玻璃微珠的折射率为 2 时,入射光进入玻璃微珠聚焦到微珠底部并发生反射,光路可沿着入射光的方向原向返回,如图 1(b)所示。

2.2 截角角锥结构

截角角锥反射结构,其外表是由四个三角形构成,底面是一个正三角形,侧面是由三个两两相互垂直的等腰三角形组成,如图 2(a)所示。在理想情况下,入射光束经过三个相互垂直的反射面发生反射后,出射光束将以入射光束平行方向的反方向射出,即可达到光路原向返回的目的^[13]。

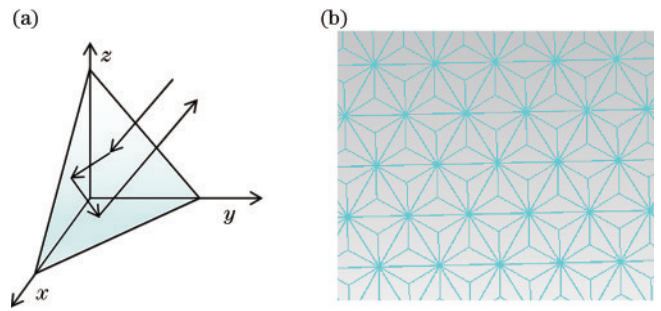


图 2 截角角锥结构示意图。(a)截角角锥原向反射原理;(b)截角角锥结构阵列模型

Fig. 2 Structure diagram of truncated corner cone. (a) Principle of orthotropic reflection of truncated corner cone; (b) array model of truncated corner cone

2.3 立方角锥结构

立方角锥反射结构,与截角角锥反射结构极为相似,与截角角锥结构不同的是,截角角锥结构反射面或是全部凹陷,或是全部凸起,而立方角锥反射结构同时具有凸起和凹陷结构,其三个反射面为两两相互垂直的正方形,光路实现原向返回原理与截角角锥原理相似,如图 3(a)所示。

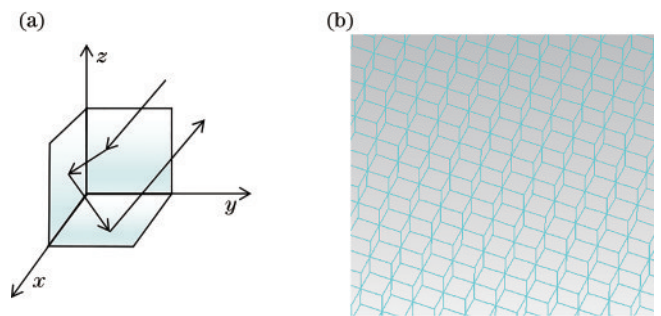


图 3 立方角锥结构示意图。(a)立方角锥原向反射原理;(b)立方角锥结构阵列模型

Fig. 3 Schematic diagram of cubic cone. (a) Principle of orthotropic reflection of cubic cone; (b) array model of cubic cone

3 模拟仿真分析

本文根据原向反射的理论进行模拟,利用 PROE 软件对不同结构进行模型建立,利用光学仿真软件 TracePro 软件对反射光谱进行仿真。首先通过固定参数对不同结构进行仿真,验证出反射率最优化结构,然后改变该结构参数,分析不同参数下该结构反射率的变化。

3.1 结构仿真

仿真前,先拟定每个结构的参数,采取了圆形格点光源,将外半径设置为很小的数值,如 0.0001,内半径设置为 0,即格点光源可视为点光源,波长为 546.4 nm。将探测器的接收面积与阵列模型设置成相同尺寸,单元结构尺寸为 50 μm ,首先采用正入射的方式进行模型筛选。将建好的模型导入到 TracePro 软件中,设置入射光线为 271 条均匀分布的点光源,使探测器与反射结构阵列中心线位于同一水平线,模拟光路图及结果如图 4 所示。

如图 4(b)所示,球阵列的总光通量为 117 W,探测器追击到的光线为 117 条,占比 43.173%;如图 4(d)所示,截角角锥阵列的总光通量为 183 W,探测器追击到的光线为 183 条,占比 67.528%;如图 4(f)所示,立方角锥阵列的总光通量为 271 W,探测器追击到的光线为 271 条,占比 100%。因此,在相同条件下,不同反射结构的反射率是不同的,最终得到的结果为在正入射的条件下,立方角锥反射结构的原向反射率最高。

3.2 单元尺寸对反射率的影响

根据图 4 得出结论,在上述反射结构中,正入射时,立方角锥反射结构的原向反射结果最好,由此对立方角锥结构展开不同单元结构尺寸反射特性影响的仿真。将建立好的不同尺寸的模型导入 TracePro 软件中,即单元结构尺寸分别为 200 μm 、50 μm 、30 μm 和 10 μm 。设置入射光线为 271 条均匀分布的格点光源,波长为 564.4 nm,使探测器与反射结构阵列中心线位于同一水平线,模拟光路图及结果如图 5 所示。

由图 5 可知,每个仿真结果中探测器得到的光斑形状几乎相同,仿真结果均为光通量为 271 W,探测器追踪到 271 条光线,反射率为 100%。由此可见,当光垂直入射到模型表面时,即使是该模型的单元尺寸发生改变,该模型结构依然可以将入射光全部返回。此时,立方角锥结构阵列模型的反射率为 100%,即立方角锥阵列模型在入射光垂直入射时具有很好的反射率。

依据现实条件,尺寸越小其加工难度越大,误差也会越大,阵列结构中的衍射效应也会增强;反之,单元结构的尺寸越大,其加工成光学元件后会变得僵硬没有韧性,因此,本文选取最适合光学诱饵结构的尺寸为

200 μm ^[9]。

3.3 入射角度偏转仿真

为了验证立方角锥结构是否在任何角度下都有较好的反射效果,本文拟对阵列模型进行角度偏转,以此来模拟出不同入射角度下微结构的反射效果。取单元结构尺寸为 200 μm 、50 μm 、30 μm 和 10 μm 的四种不同尺寸立方角锥结构进行不同入射角度的反射率仿真,入射角度每偏转 3° 仿真并进行数据采集,结果如图 6 所示。

从图 6 可以得出,不同尺寸的立方角锥结构模型在不同的入射角度下,其反射率曲线的走势基本相同:当角度进行偏转时,反射率先呈下降的趋势,随着角度的增大反射率逐渐下降;当偏转角度达到 30° 时,反射率的数值直线上升达到峰值,随后继续随着入射角度的增大而下降,直至 45° 时反射率降为 0。这种现象的原因是:模型的反射率与其自身的有效面积有关,随着模型的偏转,光入射的有效面积会逐渐减少。因此,当模型偏转 45° 之后,探测器已经无法接收到反射光束了,反射率降为 0。而随着入射角度的改变,会出现一次单面反射的情况,即角度偏转至 30° 左右,此时光束会垂直入射在该阵列模型的一个面上,构成了单面反射,又因为仿真条件完全理想,光束能够全部原向返回,所以在角度偏转 30° 左右时,反射率会出现二次峰值。

立方角锥结构之所以有较好的反射特性,与其结构具有高度对称性有关,因此为验证此观点,本文选取单元结构尺寸为 200 μm 的立方角锥结构进行绕 x 轴顺时针旋转和逆时针旋转模拟相对方向入射,得到的结果如图 7 所示。可以看出,当模型绕顺时针偏转和逆时针偏转时,其二次峰值分别出现在顺时针偏转约 30° 和逆时针偏转约 60° 时,其正反的二次峰值偏转角正好互余。由此可以得出,立方角锥结构具有高度对称性,减小了因入射角度不同而造成的反射率偏差。

此外,由图 7 可知,在角度偏转小于 10° 的情况下,可以得到 75% 以上的反射率,根据此结果展开详细的验证。现以单元尺寸为 200 μm 的立方角锥作为样本进行仿真,入射光源依旧设置为点光源,反射模型、光源及探测器的中心在同一水平线上。记录每偏转 1° 的数据,以垂直穿过模型中心为法线方向,分别对模型绕 x 轴 y 轴顺时针和逆时针旋转 10° 进行了测量,数据如表 1 所示。

从表 1 数据可以得到,以法线方向为基准偏转 8° 以内,立方角锥阵列模型的反射率能够达到 75% 以上,在以法线方向为基准偏转 5° 以内时,立方角锥阵列模型的原向反射率能够达到 85% 以上。因此,根据仿真结果可以得出,立方角锥结构的最佳入射范围是以法线方向为基准偏离 5° 以内。

由于在远距离作战时,导弹发射的偏转角都是以

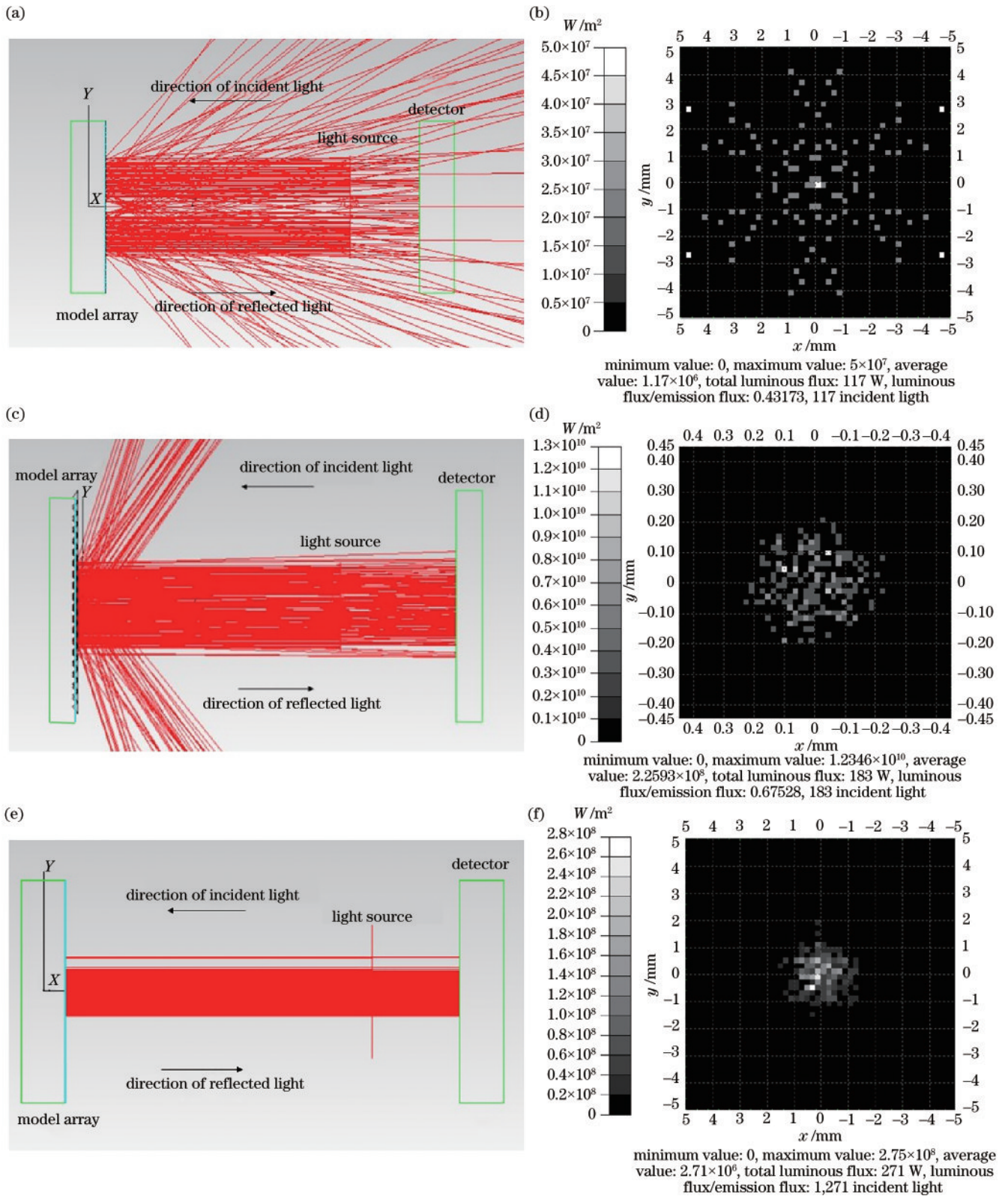


图 4 模拟仿真结果。(a)(c)(e)单元尺寸为 $50 \mu m$ 球阵列、截角圆锥阵列、立方圆锥阵列反射结构的模拟光路图；(b)(d)(f)对应的仿真结果

Fig. 4 Simulation results. (a)(c)(e) Simulated light paths of reflection structures of the spherical, truncated cone, and cubic cone array with unit size of $50 \mu m$, respectively; (b)(d)(f) corresponding simulation results

秒级衡量的,且在远距离入射可近乎相当于垂直入射,因此对结构的大入射范围要求并不是很高。综合

以上结论得出,立方圆锥结构阵列符合“光学诱饵”的标准。

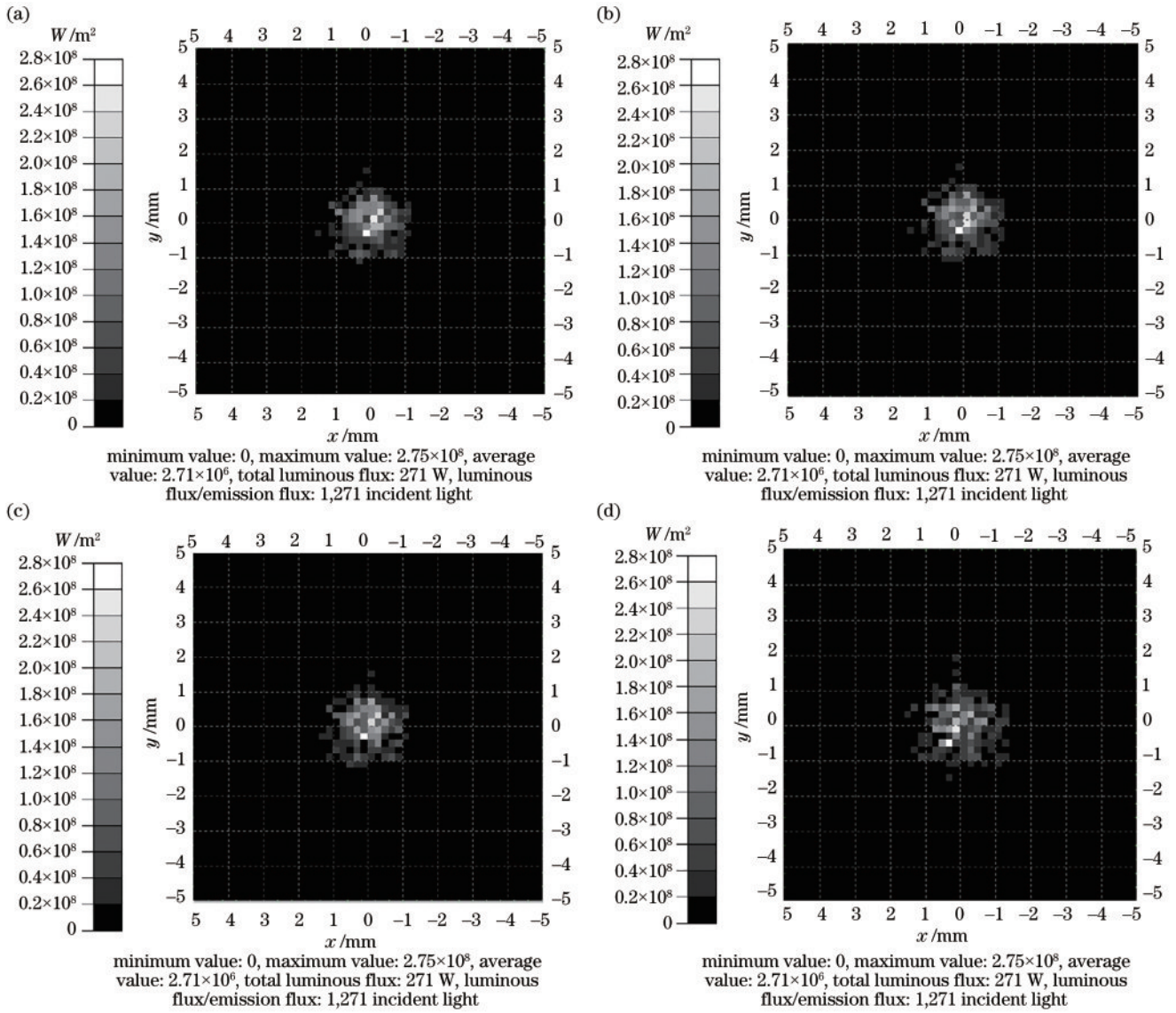


图 5 不同单元尺寸的立方角锥反射结构仿真结果。(a) 200 μm ; (b) 50 μm ; (c) 30 μm ; (d) 10 μm

Fig. 5 Simulation results of cubic cone reflection structures with different cell sizes. (a) 200 μm ; (b) 50 μm ; (c) 30 μm ; (d) 10 μm

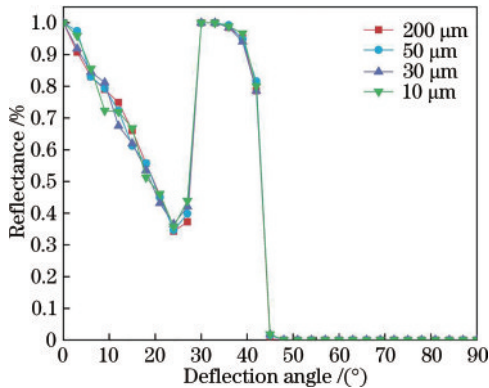


图 6 不同单元尺寸下的立方角锥结构阵列模型的反射率
Fig. 6 Reflectance of cubic cone structure array model with different cell sizes

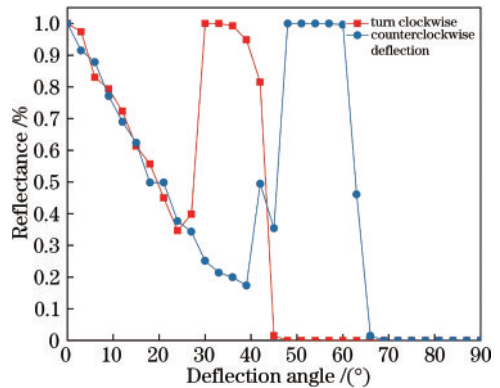


图 7 200 μm 立方角锥顺时针和逆时针偏转反射率对比
Fig. 7 Comparison of clockwise and counterclockwise deflection reflectance of 200 μm cubic cones

表 1 单元尺寸为 200 μm 的立方角锥角度偏转反射特性Table 1 Angular deflection reflection characteristics of cubic cones with cell size of 200 μm

Deflection angle / ($^{\circ}$)	Reflectivity rotated clockwise about the x axis / %	Reflectivity counterclockwise about the x axis / %	Reflectivity clockwise about the y axis / %	Reflectivity counterclockwise about the y axis / %
0	1	1	1	1
1	0.99262	0.97417	0.97417	0.97786
2	0.95941	0.92989	0.94465	0.94834
3	0.97417	0.91513	0.90775	0.90406
4	0.88561	0.90775	0.88561	0.90775
5	0.87823	0.87454	0.87823	0.87823
6	0.83026	0.87823	0.83395	0.81181
7	0.83026	0.81919	0.83764	0.81919
8	0.81181	0.78967	0.76753	0.77122
9	0.79336	0.77122	0.72694	0.78967
10	0.74539	0.73801	0.73801	0.71587

4 结 论

基于 TracePro 软件, 本文建立了仿真模型并探索了不同微结构、不同尺寸、不同入射角度对原向反射率的影响, 得到了如下结论: 1) 通过对不同微结构原向反射的仿真发现, 相对于截角角锥和玻璃微珠, 立方角锥的原向反射效果更佳, 符合光学诱饵的设计要求; 2) 通过对入射角度偏转对反射率影响的仿真发现, 入射立方角锥结构的最佳入射范围是以法线方向为基准偏离 5° 以内, 符合“光学诱饵”的标准; 3) 通过微结构单元尺寸的仿真以及现实条件可得, 光学诱饵的单元微结构尺寸最好为 200 μm 。

因此, 本文最终选取最适合光学诱饵的结构为单元尺寸为 200 μm 的立方角锥结构。

参 考 文 献

- [1] 李慧, 李岩, 刘冰峰, 等. 激光干扰技术现状与发展及关键技术分析[J]. 激光与光电子学进展, 2011, 48(8): 081407.
Li H, Li Y, Liu B F, et al. Status, development and key technique analysis of laser jamming technology[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2011, 48(8): 081407.
- [2] 张英远. 激光对抗中的告警和欺骗干扰技术[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2012: 4-10.
Zhang Y Y. Warning and deception jamming technology of laser countermeasure[D]. Xi'an: Xidian University, 2012: 4-10.
- [3] 徐代升, 王建宇. 激光欺骗式干扰与激光制导系统相互作用效应研究[J]. 红外与毫米波学报, 2006, 25(1): 77-80.
Xu D S, Wang J Y. Interactional effect between laser cheating jammer and laser guidance system[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2006, 25(1): 77-80.
- [4] 李慧, 吴军辉, 张文攀, 等. 激光制导武器角度欺骗干扰半实物仿真系统设计的探讨[J]. 光电子技术, 2011, 31(1): 37-41.
Li H, Wu J H, Zhang W P, et al. Exploratory development of the HWIL simulation system for laser angle deception jamming against laser guidance weapons [J]. Optoelectronic Technology, 2011, 31(1): 37-41.
- [5] 蒋启泽, 刘柱. 激光诱饵系统作战使用基本理论[J]. 四川兵工学报, 2013, 34(1): 13-15.
Jiang Q Z, Liu Z. Study on the basic theory of operational use of laser decoy system[J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2013, 34(1): 13-15.
- [6] 贾菲, 徐铭, 鲍红权, 等. 国内外面源红外诱饵技术发展分析[J]. 硅酸盐通报, 2017, 36(S1): 29-32.
Jia F, Xu M, Bao H Q, et al. Development of surface-type infrared decoy technology at home and abroad[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2017, 36(S1): 29-32.
- [7] 张静元, 赵非玉, 高旭恒, 等. 国外动力型诱饵的研究现状[J]. 光电技术应用, 2020, 35(2): 1-6, 78.
Zhang J Y, Zhao F Y, Gao X H, et al. Research on kinematic decoy at abroad[J]. Electro-Optic Technology Application, 2020, 35(2): 1-6, 78.
- [8] 赵铭军, 曹卫公, 胡永钊, 等. 激光干扰技术研究[C]// 全国光电技术学术交流会暨全国红外科学技术交流会. 北京: 中国宇航学会, 2003.
Zhao M J, Cao W G, Hu Y Z, et al. Research on laser interference technology[C]// National Optoelectronic Technology Academic Exchange Conference and National Infrared Science and Technology Exchange Conference. Beijing: Chinese Society of Astronautics, 2003.
- [9] 罗汉, 袁长迎. 立方角锥型膜结构的逆反射特性计算[J]. 光学学报, 2015, 35(3): 0323001.
Luo H, Yuan C Y. Retroreflective performance analysis of cube corner membrane structure[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(3): 0323001.
- [10] 李浩楠, 赵冬娥, 范小伊. 玻璃微珠原向反射屏发散特性研究[J]. 传感器与微系统, 2019, 38(3): 14-16.
Li H N, Zhao D E, Fan X Y. Study on divergence

- characteristics of glass microbeads from retroreflective screen[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2019, 38(3): 14-16.
- [11] 吕虎, 李大海, 薄健康, 等. 高折射率玻璃微珠色散特性及影响[J]. *光子学报*, 2012, 41(1): 61-66.
Lü H, Li D H, Bo J K, et al. Dispersion characteristic and its effect of high refractive index glass beads[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, 41(1): 61-66.
- [12] 薄健康, 李大海, 郭东华, 等. 高折射玻璃微珠粒径与折射率关系的研究[J]. *光学与光电技术*, 2011, 9(6): 45-49.
Bo J K, Li D H, Guo D H, et al. Relationship between size and refractive index of the high refractive glass beads [J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2011, 9(6): 45-49.
- [13] 李政阳, 付跃刚. 直角屋脊棱镜与立方角锥棱镜的光学特性[J]. *应用光学*, 2008, 29(5): 833-836.
Li Z Y, Fu Y G. Optical characteristics of right-angle roof prism and corner-cube prism[J]. *Journal of Applied Optics*, 2008, 29(5): 833-836.