Vol. 47, No. 3 March, 2017

文章编号:1001-5078(2017)03-0347-05

·光电对抗 ·

激光引偏干扰中假目标的防护角与应用

孙春生,张晓晖,张 爽 (海军工程大学兵器工程系,湖北 武汉 430033)

摘 要:合理地确定假目标的防护角是实现引偏来袭激光半主动制导武器的必要步骤。在充分考虑指示 - 干扰激光强度、真 - 假目标反射特性和大气激光衰减系数等因素的条件下,推导了来袭激光导引头处信号压制系数表达式;建立了利用压制系数确定假目标防护角大小的计算公式;并以漫反射板假目标为例,分析不同条件下防护角的取值;最后基于漫反射板防护角,从漫反射板的布设位置、布设姿态、布设数量及协同方法等方面明确了漫反射板假目标在激光引偏干扰中的应用方法。研究结果对于假目标防护角的确定和漫反射板假目标的应用具有指导意义。
 关键词:激光引偏干扰;假目标;漫反射板;防护角;压制系数
 中图分类号:TN977 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2017.03.018

Guarded angle of laser decoy in laser trick jamming

SUN Chun-sheng, ZHANG Xiao-hui, ZHANG Shuang

(Department of Weaponry Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: Determination of false target's guarded angle is a necessary step for tricking the semi-active laser guided weapon. Considering some influence factors, such as radiant intensity of laser indicator and jamming, reflected characteristics of true and false target, attenuation coefficient of atmosphere, and so on, the expression of signal suppression coefficient for coming laser-guided seeker was derived, and the computational formula of false target's guarded angle was established through suppression coefficient. Furthermore, taking diffuse reflection board as an example, guarded angles under different conditions were analyzed. Lastly, based on the guarded angle of diffuse reflection board, the application of diffuse reflection board used as false target during laser trick jamming was ensured from aspects of layout situation, layout stance, layout quantity and coordinating means. The research has a guidance significance for determining the false target's guarded angle and the application of diffuse reflection board used for false target.

 $Key \ words: {\rm laser \ decoy \ departure \ jamming; false \ target; diffuse \ reflection \ board; guarding \ angle; repressed \ coefficient \ angle; repressed \ angle; represse$

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,基于此干扰手段的激光对抗装备已得到广 泛应用^[1-3]。激光引偏干扰的基本原理是:依据激 光告警装置探测的来袭威胁方向,选择目标周围的 合适假目标,向假目标发射与来袭指示激光相关的 干扰激光,诱偏来袭的激光制导武器至假目标,达到 防护被保护目标的目的。引偏成功需满足三个相关 性:一是引偏激光的脉冲频谱、脉宽、编码等特征与 指示激光的具备相关性;二是引偏激光脉冲在时域 上与指示激光具备相关性;三是引偏激光在空域上 与指示激光具备相关性。前面两个相关性由引偏干 扰装备的自身性能决定,一般采用与指示激光脉冲 频谱、编码相同,脉宽相近,时域上超前同步的干扰

作者简介:孙春生(1977 -),男,副教授,博士,主要从事光电对抗技术,光电探测与信息处理方面的研究工作。E-mail: scs96581@163.com 收稿日期:2016-07-14

激光实施引偏。第三个相关性则由假目标的激光漫 反射特性与应用方法决定。在具体应用中,假目标 的激光漫反射特性通常用防护角和有效引偏空 域^[4]来表征。假目标防护角影响着有效引偏空域 的分布和假目标的应用策略。合理地确定假目标的 防护角是实现引偏来袭激光半主动制导武器的必要 步骤。因此,研究假目标防护角的确定方法与应用 对确保激光引偏干扰系统的作战效能具有重要 意义。

假目标的防护角是与来袭指示激光强度、干扰 激光强度、被保护目标与假目标激光反射特性、大气 激光衰减系数和干扰效果评价准则等因素有关的复 杂量。现有文献关于假目标防护区域和布设方法的 研究可分为对漫反射假目标和对一般地物假目标。 其中对漫反射平面假目标,确定防护角大小的依据 是某一方向反射激光的辐射强度下降到法线方向的 1/3 左右时对应的角度大小,一般取 60°~70°^[5-7]; 对一般自然地物假目标,则没有考虑防护角的大小, 仅侧重于定性方法分析^[8]。因此,现有确定假目标 防护角大小的方法不够科学和准确。本文在充分考 虑指示 - 干扰激光强度、真 - 假目标反射特性和大 气激光衰减系数等因素的条件下,推导了来袭激光 导引头处指示激光和干扰激光的信号压制系数表达 式,提出了利用压制系数确定假目标防护角大小的 方法,并以漫反射板假目标为例,分析不同条件下防 护角的取值,进而验证目前取值的合理性;最后基于 得到的漫反射板防护角,分析其在激光引偏干扰系 统中的应用。文中所有方位角的基准为正北向,俯 仰角的基准为水平面。

2 信号压制系数

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。下面推导压制系 数 K 的计算表达式。

目标面元 dA 上的入射光功率密度可表示为 E_i,在探测点处来自面元 dA 的反射光功率密度为:

$$dE_r = \frac{L_r T_r dA \cos\theta_r}{R_r^2} \tag{1}$$

其中, θ, 为探测方向相对于面元 dA 法线的反射角; L, 为入射光在该方向的反射光亮度; T, 为目标到导 引头距离间的激光大气透过率; R, 为目标到探测系 统的距离。结合双向反射分布函数的定义^[9]可知:

$$\frac{dE_r}{E_i} = \frac{L_r T_r dA \cos\theta_r / R_r^2}{E_i}$$

$$=\frac{T_r dA \cos\theta_r}{R_*^2} f_r(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r)$$
(2)

其中,双向反射分布函数 $f_r(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r)$ 是描述物 体表面反射特性的物理量,在式(2)中表示面元 dA的反射特性,下标i, r分别表示入射量和反射量。

设激光器输出功率为 P_i ,发射光束发散角 θ_i (一般很小),发射系统到目标的距离为 R_i ,发射系 统到目标距离上激光大气透过率为 T_i ,则激光束在 目标表面处形成的光斑面积 A_i 为 $\pi \theta_i^2 R_i^2 / (4\cos\theta_i)$, 假设入射光在 A_i 上分布均匀,则目标表面的入射光 功率密度为:

$$E_i = \frac{4P_i T_i \cos\theta_i}{\pi \theta_i^2 R_i^2} \tag{3}$$

式中, θ_i 为入射光相对于目标面元 dA 法线的入射 角。将式(3)代入式(2)可得探测点处来自面元 dA 的反射光功率密度:

$$dE_r = \frac{4P_i T_i T_r dA \cos\theta_r \cos\theta_i}{\pi \theta_i^2 R_i^2 R_r^2} f_r(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r) \quad (4)$$

一般指示器和干扰激光的照射距离都远大于目标处的光斑直径,故可认为 θ_i 、 ϕ_i 、 θ ,和 ϕ ,是不变的,同时假设激光光斑处目标材质均匀,即目标表面的 $f_r(\theta_i,\phi_i,\theta_r,\phi_r)$ 相同,则导引头接收到的反射光功率密度可写为:

$$E_r = dE_r \cdot A_i \cdot \eta = \frac{P_i T_i T_r \eta \cos\theta_r}{R_r^2} f_r(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r)$$
(5)

式中,η表示目标表面激光光斑的利用率。

对导引头接收到干扰激光和指示激光,式(5)的表达式相同,只是式中符号的含义不同,不妨用下标g和z来分别表示干扰激光和指示激光,则压制系数K的计算表达式为:

$$K = \frac{E_{rg}}{E_{rz}} = \frac{P_{lg}T_{ig}T_{rg}R_{rz}^2\eta_g\cos\theta_{rg}f_{rg}}{P_{lz}T_{iz}T_{rz}R_{rg}^2\eta_z\cos\theta_{rz}f_{rz}}$$
(6)

从式(6)可以看出:压制系数 K 是与指示 – 干 扰激光功率、真 – 假目标激光反射特性、真 – 假目标 上的激光反射角、大气透过率、激光干扰 – 导引距 离、光斑利用率等参数有关的复杂函数。

在实际应用中,实施引偏干扰时,干扰设备在保 护目标附近,假目标离被保护目标只有数百米远,来 袭弹体在数公里之外,因此可取如下近似: $R_{rg} = R_{rz}$, $T_{ig} = 1, T_{rg} = T_{rz}$,此时式(6) 简化为:

$$K = \frac{P_{ig}\eta_g \cos\theta_{rg}f_{rg}}{P_{iz}T_{iz}\eta_z \cos\theta_{rz}f_{rz}}$$
(7)

从式(7)可以看出,经过简化后的压制系数 K

仍然与多个因素相关,其中 θ_{rg} 体现了假目标防护角的变化。

3 假目标的防护角

当在装备自身性能满足引偏所需的特征相关和 时域相关时,为保证引偏干扰效果,压制系数 K 应 大于阈值 K_0 。通过 $K \ge K_0$ 和式(7)可以得到假目标 防护角 θ_{is} 的计算公式:

$$\theta_{ts} = \theta_{rg_min} = \arccos(\frac{K_0 P_{tz} T_{iz} \eta_z \cos\theta_{rz} f_{rz}}{P_{tg} \eta_g f_{rg}}) \quad (8)$$

理论上由式(8)可以计算出任意假目标的防护 角,但由于其中变量太多,具体应用时需根据实际情 况进行近似。下面以具有朗伯反射特性的漫反射目 标为例,分析此类假目标防护角的特性。

当干扰激光信号和半主动激光制导武器的指示 激光信号满足空间、时间和特征相关时,只要到达来 袭导引头处的干扰信号功率密度不小于制导信号功 率密度,就能够实现有效干扰,即此时只需满足压制 系数 K≥1 就能有效干扰。因而压制系数阈值 K₀ 可取常数1。对具有朗伯反射特性的漫反射目标, 其双向反射分布函数 $f_{\mu} = \rho/\pi$,其中 ρ 为目标的激 光反射系数。此处假定真假目标均为此类目标,就 有 $f_{rz} = \rho_z / \pi \, \langle f_{rg} = \rho_g / \pi \, \langle \pm \rho_z \, \langle \rho_g \, \rangle$ 別为真、假 目标的激光反射系数。来袭激光指示器到目标距离 上激光大气透过率 T_i 为 e^{-cL} ,其中 c 为大气激光衰 减系数,L为指示器到目标距离。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_π有一定的随机性,在此近似取半球空间内 的平均值,即 $\cos\theta_{rz} = 1/2$ 。同时假定 $P_{tx} = \alpha P_{tz}$, 其中 α 为比例系数,在这些工程近似条件下,式(8) 简化为:

$$\theta_{is} = \arccos(\frac{e^{-cL}\eta_{s}\rho_{z}}{2\alpha\eta_{g}\rho_{g}})$$
(9)

下面分析典型取值条件下假目标防护角 θ_{is} 的 变化情况。c取大气能见度为10km时的激光衰减 系数,对常用的1.06 µm激光约为0.166/km;对常 用的标准漫反射板假目标,激光反射系数 ρ_g 很容易 达到0.6以上,在此取0.6;考虑到假目标离干扰激 光距离在几百米之内且干扰激光发散角较小而靶板 反射面在1m²左右,干扰激光光斑的利用率很容易 达到100%,故在此 η_g 取1;指示光斑的利用率 η_z 受跟踪精度、目标面形和光斑大小的影响较大,在此 近似取0.8;典型军用涂层的1.06µm激光反射系 数在0.074~0.257之间^[8,10],在此 ρ_z 取值范围为 0.06~0.3;激光指示器有地照和空照两种方式,兼 顾多种可能性,指示器到目标距离 L 取值范围为 2~20 km;基于相同的考虑,干扰激光与指示激光的 功率比例系数 α 取值范围为 0.2~5。则在 L =10 km的条件下,防护角 θ_{\iotas} 随 ρ_{ι} 和 α 的变化关系如 图 1 所示;在 $\alpha = 1$ 的条件下,防护角 θ_{\iotas} 随 ρ_{ι} 和 L 的 变化关系如图 2 所示。



图 1 防护角 θ_{ts} 随 ρ_z 和 α 的变化 Fig. 1 Change of guarding angle θ_{ts} along with reflecting coefficient ρ_z and ratio α



图 2 防护角 θ_{ts} 随 ρ_z 和 L 的变化 Fig. 2 change of guarding angle θ_{ts} along with reflecting coefficient ρ_z and indicator range L

从图 1 和图 2 可以看出,在典型工作环境下,漫 反射板假目标的防护角 θ_{is} 随目标的激光反射系数 ρ_{z} 、干扰激光与指示激光的功率比 α 和激光指示器 的工作距离 L 的变化而变化,其中目标的激光反射 系数 ρ_{z} 对防护角的影响最显著, ρ_{z} 越大, θ_{is} 越小;干 扰激光与指示激光的功率比 α 越大, θ_{is} 越大,但两 激光功率相当时, θ_{is} 值较大、受 α 的影响较小;激光 指示器的工作距离 L 越大, θ_{is} 越大。结合式(9)可 以看出,大气衰减系数 c 对防护角 θ_{is} 的影响与 L 相同。

从图 1 和图 2 还可以看出,在典型工作环境下, 常用漫反射板假目标的防护角 θ_ι,大于 79°。因此现 有文献及工程应用中将漫反射板假目标的防护角取 为 60°~70°是相当保守的。

4 漫反射板假目标板的应用

漫反射板假目标因其良好的反射特性往往是激 光引偏干扰装备配备的标准子设备之一。在讨论漫 反射板假目标应用方法时,以对待过顶区^[5]的思路 不同,分为两类有代表性的观点。一类以文献[5] 为代表,认为激光半主动制导武器在途经过顶区被 引偏至假目标过程中仍可能击中被保护目标,所以 假目标的有效防护/引偏区域中应避免过顶区的存 在。另一类以文献[4]为代表,认为假目标的有效 引偏空域为以漫反射板上的照射光斑为顶点、反射 面法线为旋转对称轴、防护角 θ。为边界的圆锥空 间,无需刻意规避过顶区。实际上,如果从弹炮武器 系统对抗的角度来考虑过顶区的规避是非常必要 的,因为当来袭武器经过被保护目标上方时,由于探 测设备最大仰角和弹炮武器最大射角的限制,弹炮 武器系统难以探测到也难以拦截讨顶的来袭威胁, 从而使被保护目标仍面临着被击中的危险。但对激 光引偏系统而言,其探测的是来袭激光半主动制导 武器系统的指示激光,用于引偏来袭武器的是被保 护目标之外的假目标,当激光半主动制导武器讨顶 时,指示激光与制导/引偏的其他阶段一样能够被探 测到,由假目标反射的引偏激光对过顶区的激光半 主动制导武器也同样有效,因此不存在与弹炮武器 系统相似的难探测难对抗问题。并且激光引偏干扰 中的假目标一般布设在离被保护目标数十米到数百 米之间,无论是否存在过顶区,引偏干扰过程中真假 目标绝大部分时间都同时存在于来袭激光半主动制 导武器的导引头视场中,只是在导引头逼近到离真 假目标能量质心较近且干扰有效时,随着导引头可 感知的视场空域减小,真目标才从导引头视场中消 失。因此讨论漫反射板假目标应用方法时,本文也 认为无需考虑过顶区对有效引偏空域的影响。

在确定了漫反射板防护角的合理值之后,本文 在前期研究^[4]的基础上进一步明确漫反射板假目 标在激光引偏干扰中的应用方法,其具体应用可利 用靶板的布设位置 $\rho_i(\rho_i, \theta_{ia})$ 、布设姿态 $\theta_i(\theta_{iw}, \theta_{ip})$ 、布设数量 N 及协同方法来描述。

4.1 布设位置

漫反射板假目标的布设位置 $\rho_t(\rho_t, \theta_{ia})$ 由其相 对于被保护目标的距离参数 ρ_t 和方位角参数 θ_{ia} 决定。

确定合理布设位置的基本原则是:假目标既能 有效地引偏来袭弹体,又能保证被保护目标和引偏 干扰系统自身的安全;同时还需结合引偏干扰系统 搜寻合适假目标的规则,即根据威胁方位搜寻威胁 方位镜像 ± θ_{ts} 方位范围内的漫反射板作为引偏假目 标。根据这项基本原则和搜寻规则,假目标布设位 置 $\rho_{t}(\rho_{t},\theta_{ts})$ 需满足条件:

 $\begin{cases} (R_m < \rho_t < L_m \theta_{mv}) \cap (\mid \rho_t r_n \mid > R_m) \\ \operatorname{mod}(\theta_{ta} + 180^\circ - \theta_{ma}, 360^\circ) < \theta_{ts} \end{cases}$ (10)

式中, R_m 、 θ_{mv} 和 L_m 分别为来袭弹体的毁伤半径、接收视场角和开始激光导引时离被保护目标距离, \tilde{r}_n 为引偏干扰系统中其他子设备的布设位置, θ_{ma} 为来袭指示激光威胁方位, $|\rho_i r_n|$ 表示假目标与系统内其他子设备的距离,mod()为取模运算符。

具体应用过程中,参数 θ_{mv} 、 L_m 和 R_m 由情报数据 给出或直接取经验值, θ_{ma} 由引偏系统内激光告警器 探测到, r_n 则直接由具有测距测向功能的激光测距 机测量出。这些参数都确定后,由式(10)就可确定 假目标的布设位置 $\rho_i(\rho_i, \theta_{ia})$,符合布设要求的位 置通常为一个局部区域。

4.2 布设姿态

漫反射板假目标的布设姿态 θ_i(θ_{iw},θ_{ip}),即靶 面朝向,由反射面法线的方位角 θ_{iw} 和俯仰角 θ_{ip} 决 定,它直接决定着假目标的有效引偏空域的空间分 布。

确定合理布设姿态的基本原则是:在布设位置 合理的前提下使假目标的有效引偏空域涵盖威胁弹 体可能来袭的角度空间;同时还需考虑漫反射假目 标在不同地形上际架设问题。根据这两方面的要

求,假目标布设姿态 $\theta_{t}(\theta_{tw},\theta_{tw})$ 需满足条件:

 $\begin{cases} \theta_{ma} - \theta_{ts} < \theta_{tw} < \theta_{ma} + \theta_{ts} \\ \max(\theta_{mp} - \theta_{ts}, 0^{\circ}) < \theta_{tp} < \min(\theta_{mp} + \theta_{ts}, 90^{\circ}) \end{cases} \end{cases}$ (11) 式中, θ_{mp} 为来袭指示激光的俯仰角。从上式可以看出,漫反射板假目标的靶面法线布设范围是一个以 弹体来袭方向为对称轴的角空域。

实际应用过程中,为方便使用,通常取漫反射靶 板与水平地面的夹角 θ'_{μ} 为调整控制对象, θ'_{μ} 与 θ_{μ} 互为余角关系。若 θ_{mp} 取(0°,90°)区间内的任意值, θ_{ι} 取70°,则俯仰角 θ'_{μ} 布设范围为20°< θ'_{μ} <70°。 这说明漫反射假目标布设的俯仰角条件是比较容易 满足的。

4.3 布设数量与协同

漫反射板假目标的布设数量由来袭威胁的方位

252 - 255.

角范围 $\Delta \theta_{ma}$ 和假目标的防护角 θ_{ls} 决定。

从节约对抗资源和提高展开速度的角度考虑, 合理布设的要求是使用尽可能少的靶板来完成引偏 任务。在不考虑规避过顶区的前提下,确定最佳靶 板使用数量 N 的原则是:在单个靶板布设位置和布 设姿态满足要求的前提下,N 个靶板合成的有效引 偏方位角范围略大于威胁可能来袭空间的方位角范 围为 Δθ_{ma},即满足表达式:

$$(N-1)\theta_{ls} < \Delta\theta_{ma} < N\theta_{ls} \tag{12}$$

实际应用过程中,一旦选定保护目标后,根据威胁方位范围和靶板防护角大小,需要使用的最佳靶板数量就决定了。如 θ_{ts} 取70°,对随机方位来袭的威胁,最优布设靶板数量N为4。

确定假目标的布设数量之后,各靶板在布设位 置和姿态合理的情况下,相对于被保护目标等角度 间隔布设即可实现有效协同了。

5 结 论

本文提出了一种利用压制系数确定假目标防护 角大小的方法,并以典型的漫反射板假目标为例,分 析了防护角随不同影响因素的情况,验证了现有文 献及工程应用中将漫反射板假目标的防护角取为 60°~70°是相当保守的。论文还基于漫反射板防护 角,从漫反射板的布设位置、布设姿态、布设数量及 协同方法等方面进一步明确漫反射板假目标在激光 引偏干扰中的应用方法。

提出的确定假目标防护角大小的方法也适用于 其他激光假目标。但对漫反射板以外的激光假目 标,因双向反射分布函数不同导致防护角不同,其应 用方法有待进一步研究。

参考文献:

- [1] FU Xiaoning, WANG Bingjian, WANG Di. Electro-optic ranging & countermeasure[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2012. (in Chinese) 付小宁, 王炳健, 王荻. 光电定位与光电对抗[M]. 北 京:电子工业出版社, 2012.
- [2] SUN Chunsheng, ZHANG Shuang, RAO Jionghui. Hardware-in-the-loop simulation training system for laser decoy departure jamming[J]. Laser & Optoelectronics Propress, 2013,50 (8):080027. (in Chinese)
 孙春生,张爽,饶炯辉.激光引偏干扰半实物仿真训练系统[J].激光与光电子学进展,2013,50 (8):080027.
- [3] LI Shuanggang, NIE Jinsong, LI Hua, et al. Assessment of effectiveness on angle deceptive jamming to semi-active laser-guided weapon[J]. Infrared and Laser Engineering,

2011,40 (1):41-45. (in Chinese)

李双刚,聂劲松,李化,等.对激光半主动制导武器的 角度欺骗干扰的效能评估[J]. 红外与激光工程, 2011,40(1):41-45.

- [4] SUN Chunsheng, ZHANG Xiaohui, RAO Jionghui, et al. Layout of diffuse reflection board used for laser decoy
 [J]. Laser & Infrared, 2013, 43 (3):252-255. (in Chinese)
 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):
- [5] TONG Zhongcheng, JIAO Yang, SUN Xiaoquan. Research on artificial object in angle cheating interference [J]. Journal of Electronic Engineering Institute, 2002, 21(1): 33-35. (in Chinese)
 童忠诚, 焦洋, 孙晓泉. 角度欺骗中假目标布设问题研 究[J]. 电子工程学院学报, 2002, 21(1): 33-35.
- [6] NIE Jinsong, LI Zengbo. Research on protection zone of spherical false targets in laser angle deception jamming
 [J]. Electro-Optic Technology Application, 2004, 19(5):
 11 16. (in Chinese)
 聂劲松,李增波.激光角度欺骗干扰中球形假目标的 防护区域研究[J].光电技术应用, 2004, 19(5):
 11 16.
- [7] SHAO Xiaodong, YAO Longhai, LIANG Kuo. Research on optimal decoy disposition in angular laser deception jamming [J]. Journal of Electronic Engineering Institute, 2011,30(3):65-67. (in Chinese)
 邵晓东,姚龙海,梁阔. 激光角度欺骗干扰中假目标布 设的最优化选择方法研究[J]. 电子工程学院学报, 2011,30(3):65-67.
- [8] CHEN Wei, GONG Chikun, LU Jun, et al. Selection of laser angle deceptive interference to natural objects[J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41 (2):452 - 456. (in Chinese)

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.

- [9] LI Junlin, ZHANG Liming, CHEN Hongyao, et al. Development of BRDF absolute measuring Device[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(5):0528002. (in Chinese)
 李俊麟,张黎明,陈洪耀,等.双向反射分布函数绝对测量装置研制[J].光学学报, 2014, 34(5):0528002.
- [10] ZHANG Chengquan. Foreign military laser instruments manual [M]. Beijing: Publishing company for weaponry industry, 1989. (in Chinese)
 张承铨. 国外军用激光仪器手册[M]. 北京:兵器工业 出版社, 1989.