文章编号:1001-5078(2019)12-1461-06

·光电对抗·

多激光制导目标时激光角度欺骗干扰问题研究

罗　威[1],杨华兵[1],戴定川[2],陶梦高[2]
(1. 空军预警学院六系,湖北 武汉 430019;2. 中国人民解放军 95438 部队,四川 眉山 620864)

摘　要:针对多机编队空对地激光制导精确打击时激光角度欺骗干扰问题,对多目标时指示激光信号的方位和编码特征进行了理论研究。结果表明:当指示激光信号时间差小于任一信号的重复周期且信号的重复周期为整数倍关系,或者指示激光信号时间差大于激光欺骗干扰设备解码时间时,激光欺骗干扰设备可以对组合信号进行解码,并分析了相应干扰方法。上述两种情况之外则会组合为伪随机序列码信号,激光欺骗干扰设备不能正确解码及实施干扰。

关键词:激光角度欺骗干扰;多目标;指示激光编码;组合信号解码
中图分类号:TN929. 12　　**文献标识码:**A　　**DOI:**10. 3969/j. issn. 1001-5078. 2019. 12. 012

Research of laser angle deception jamming to multi-targets of laser guidance

LUO Wei[1], YANG Hua-bing[1], DAI Ding-chuan[2], TAO Meng-gao[2]
(1. No. 6 Department, Air Force Early Warning Academy, Wuhan 430019, China; 2. Unit 95438 of PLA, Meishan 620864, China)

Abstract: Aiming at the laser angle deception jamming to multi-targets of the multi-fighter group air-to-ground laser guidance attacking, the azimuth features and coding features of guide lasers on multi-targets was theoretical researched. The results show that the combined signal of guide lasers could be decoded by laser angle deception jammer, when the time difference of guide lasers less than the repetition cycle of any one guide laser codes, and all the repetition cycles has the relation of integer multiplication; or when the time difference of guide lasers longer than the decoding time of laser angle deception jammer, the relevant jamming methods of those two situations were discussed as well. Outside of those two situations, the guide lasers could combine to signal of pseudo random sequences code, then the laser angle deception jammer was unable to decode the combined signal or jamming.

Keywords: laser angle deception jamming; multi-targets; coding of guide laser; decoding of combined signal

1　引　言

半主动激光制导武器具有制导精度高、抗干扰能力强、效费比高等优点,各军事强国均在大力发展且具备多个型号激光制导武器[1]。为对抗半主动激光制导武器、降低其作战效能,美国、英国、俄罗斯等国都在大力发展相应的对抗技术及设备[2],其中主要是激光角度欺骗干扰技术及设备。激光角度欺骗干扰,也称为激光引偏干扰,是对抗半主动激光制导武器的有效手段,其基本原理是: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[3-4]。

激光角度欺骗干扰设备涉及激光告警、激光干

作者简介:罗　威(1985 -),男,讲师,博士,主要从事光电对抗,高功率激光技术及应用等研究。E-mail:luowei8786@163. com
收稿日期:2019-05-09

扰机、假目标等要素，其关键技术之一是对来袭激光制导武器的指示激光波长、编码、方位等进行识别。在单一目标即单台激光目标指示器照射情况下，激光告警技术和设备均已经较为成熟，能够较好地实施告警及引偏干扰，相关研究工作也较为充分，在此不一一列举。但是，在现代高技术条件作战环境下，空对地打击行动一般由两架或两架以上的飞机组成飞行编队，协同对多个地面目标进行打击[5-6]，如攻击机场、桥梁、坦克集群时，就涉及多枚激光制导导弹同时攻击多个目标的情况。此时，战场中将会有多个激光目标指示器同时照射多个目标，这时激光角度欺骗干扰设备能否实施有效的侦察告警及引偏干扰是值得考虑的，但相关研究工作则较为少见。

本文以多机编队协同空对地激光制导精确打击为背景，研究激光角度欺骗干扰设备在多目标情况下的侦察告警及引偏干扰问题，其中重点讨论对多个指示激光信号进行编码识别及区分的问题。

2 多目标时指示激光信号特征

2.1 指示激光信号基本特征

激光编码技术，是激光半主动制导武器对抗激光有源干扰的核心技术。战场上激光制导武器编码的目的包括[7]：①解决在同一战场同时攻击多个目标时多个激光目标指示器互相干扰的问题；②提高激光制导武器的抗干扰能力。当前各国研制的常见激光脉冲编码主要有以下六种方式：脉宽编码、精确频率码、二间隔码、脉冲调制码、有限位随机周期码、伪随机编码[8]。

其中，目前激光制导武器上最常用的是精确频率码和有限位随机周期码。精确频率码是指激光目标指示器在指示目标的整个过程中发射的激光脉冲的重复频率固定不变，即激光脉冲串在时域上表现出任意相邻的脉冲间隔为一个固定值 T_0，实际激光制导武器中，激光脉冲宽度一般为数十纳秒量级，脉冲间隔一般为数十毫秒至百毫秒量级，故脉冲宽度相比脉冲间隔可忽略不计。

有限位随机周期码特点是在一个周期内，各脉冲间隔之间是随机的，没有任何关系，其唯一的规律是其具有重复性。例如设置一个 4 位有限位随机周期编码，对应有 4 个脉冲间隔 $\{\Delta T_n \mid n=1,2,3,4\}=\{t_1,t_2,t_3,t_4\}$，则其脉冲间隔序列如图 1 所示。有限位随机周期码的重复周期为同一周期内各脉冲间隔之和，即 $\Delta T = t_1 + t_2 + t_3 + t_4$。

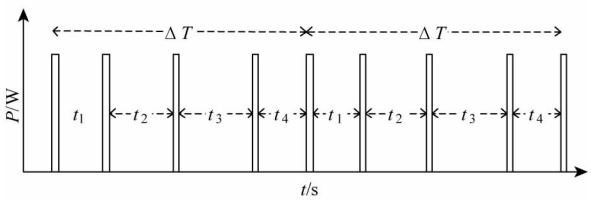

图 1 有限位随机周期码

Fig. 1 Bit-limited random periodic laser code

指示激光编码技术与激光导引头波门配合使用。以有限位随机周期码为例，导引头在 T_1 时刻接收指示激光照射到被打击目标上反射的第一个激光信号，由于激光编码已知，故可在 T_2 时刻附近时开启波门 1，接收后续指示激光信号，其他时刻则波门关闭不接收信号，依次类推完成整个制导过程直至命中目标，如图 2 所示。此时若采用转发式激光干扰，由于转发的干扰激光信号存在一定的时间延迟，则很难进入激光导引头波门，即指示激光编码和激光导引头波门技术配合使用，能有效对付转发式激光干扰。

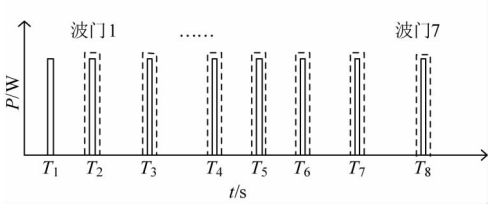

图 2 激光导引头波门

Fig. 2 Gate technology in the laser seeker

波门分为固定波门和实时性波门[7]，固定波门是将导引头收到的第一个激光编码脉冲信号作为同步点，依据全部激光脉冲信号到来的时间，设定开启波门的时间，波门宽度较大。实时性波门是以上一个制导信号到来的时间作为同步点，对后续波门开启时间进行实时修正，其特点是可消除波门设置的累积误差，波门宽度较小，实际激光导引头中多采用实时性波门，波门宽度一般设置为数十微秒量级[9]。

2.2 多目标指示激光信号特征

飞行编队一般为 2 架以上飞机，发射 2 枚以上激光制导导弹同时攻击 1 个以上目标，设激光目标

指示器离目标距离为 R,指示激光与水平方向的入射角度为 θ,每架飞机使用不同的激光编码样式。

2.2.1 方位特征

如下图 3 所示,假设采用双机编队对地攻击,两架飞机离目标的距离为 R_1 和 R_2,各自进行目标激光指示,指示激光入射角度为 θ_1 和 θ_2,两架飞机在水平面和垂直面投影位置距离分别为 R_{H} 和 R_{V}。激光告警器放置在目标附近,相比于 R_1 和 R_2,两者之间的距离可忽略不计,激光告警器水平面方向和垂直面方向的角度分辨率分别为 $\alpha_{\max}$ 和 $\beta_{\max}$。

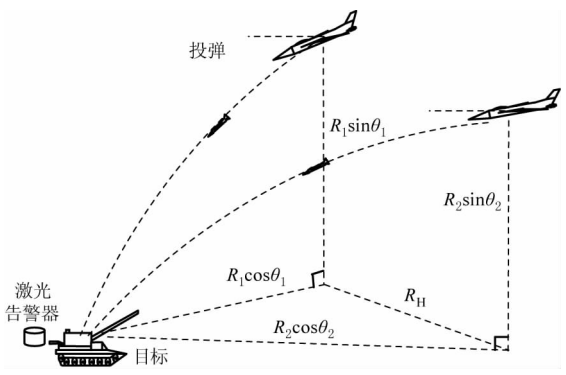

图 3 双机编队对地攻击示意图

Fig. 3 Diagram of air-to-ground strike for two-plane formation

两束指示激光相对于激光告警器,在水平方向和垂直方向的张角分别为:

$$\alpha = \arccos\left[\frac{(R_1\cos\theta_1)^2 + (R_2\cos\theta_2)^2 - R_{\mathrm{H}}^2}{2R_1R_2\cos\theta_1\cos\theta_2}\right]$$

$$\beta = \theta_1 - \theta_2$$

当 $\alpha > \alpha_{\max}$ 或者 $\beta > \beta_{\max}$ 时,激光告警器能够对两个指示激光信号进行区分。

当 $\alpha \leqslant \alpha_{\max}$ 且 $\beta \leqslant \beta_{\max}$ 时,激光告警器不能从方位上对两个指示激光信号进行区分。从实际情况来看,飞行编队中各飞机高度和水平距离相对较近,而激光告警器的角度分辨率较低,一般而言,激光告警器不能从方位上对多目标进行区分。

2.2.2 编码特征

仍然考虑双机编队对地攻击,激光制导武器典型作战距离为 5 ~10 km,激光制导炸弹典型飞行速度 200 ~300 m/s,则激光制导炸弹制导飞行时间为 17 ~50 s,假设飞机 A 发射指示激光达到目标时刻为 t_A,飞机 B 发射指示激光达到目标时刻为 t_B,则其时间之差为 $\Delta t = |t_A - t_B|$,鉴于两架飞机离目标距离不完全相同,$\Delta t > 0$。一般而言,两架飞机方位接近,使用相同类型激光目标指示器,指示激光的波长相同、脉冲宽度相同,即激光告警器不能通过方位、波长、脉宽等参数对指示激光信号进行区分。

如前所述,目前激光制导武器上最常用的是精确频率码和有限位随机周期码,一般而言,精确频率码的重复周期 ΔT 在数十毫秒至百毫秒量级,有限位随机周期码重复周期 ΔT 与编码位数相关,位数越高,ΔT 越大,一般在秒量级。在多目标指示激光编码特征方面,考虑如下两种情况:

(1) $0 < \Delta t < \Delta T$。即任意一束指示激光在完成照射一个重复周期之前,另一束指示激光也开始照射。先考虑一种简单情况,即两束指示激光均采用精确频率码,其脉冲间隔保持不变,分别为 T'_0 和 T_0,重复周期与脉冲间隔相等,分别为 T'_0 和 T_0,时间差 $\Delta t < T_0 < T'_0$,如图 4 所示。如前所述,激光告警器不能通过方位、波长、脉宽等参数对两束指示激光信号进行区分,即按照同一组信号来进行处理。则此时的脉冲间隔分布依次为:$\Delta t, T'_0 - \Delta t, \Delta t + T_0 - T'_0, T_0, 2T'_0 - \Delta t - 2T_0, \Delta t + 3T_0 - 2T'_0, 3T'_0 - \Delta t - 3T_0, \Delta t + 4T_0 - 3T'_0, T_0, 4T'_0 - \Delta t - 5T_0, \cdots\cdots$。需要说明的是,上述脉冲间隔分布表达式只适用于图 4,不具备通用性。从上述表达式来看,两束指示激光组合形成脉冲间隔伪随机序列码,即脉冲间隔几乎不重复。当然也存在特殊情况,如当 $T'_0 = xT_0$ (x 为正整数)时,两束指示激光组合形成 $x + 1$ 位周期码,总的重复周期为 $\Delta T_{\mathrm{total}} = T'_0$。

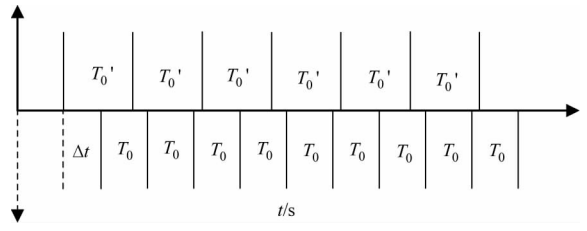

图 4 $\Delta t < \Delta T$ 时,2 种精确频率码组合信号示意图

Fig. 4 When $\Delta t < \Delta T$, the combination signals of two accurate frequency laser codes

再考虑一种相对简单的情况,即两束指示激光分别采用 4 位周期码和精确频率码,时间差 Δt 小于任意一位的脉冲间隔,如图 5 所示。则此时的脉冲间隔分布为:$\Delta t, t_1 - \Delta t, \Delta t + T_0 - t_1, t_1 + t_2 - \Delta t - T_0, \Delta t + 2T_0 - t_1 - t_2, t_1 + t_2 + t_3 - \Delta t - 2T_0, \Delta t + 3T_0$

$-t_1-t_2-t_3, T_0, \Delta T-\Delta t-4T_0, \Delta t+5T_0-\Delta T, \Delta T+t_1-\Delta t-5T_0, \Delta t+6T_0-\Delta T-t_1, \Delta T+t_1+t_2-\Delta t-6T_0$,……。从上述表达式来看,两束指示激光同样组合形成脉冲间隔伪随机序列码,即脉冲间隔几乎不重复。同样也存在特殊情况,如当 $\Delta T = xT_0$ (x 为正整数)时,两束指示激光组合形成 $x+4$ 位周期码,总的重复周期为 $\Delta T_{\text{total}} = \Delta T$。

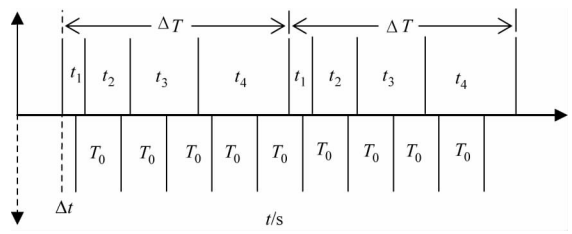

图 5 $\Delta t < \Delta T$ 时,4 位周期码和精确频率码组合信号示意图

Fig. 5 When $\Delta t < \Delta T$, the combination signals of a 4 bit periodic laser code and an accurate frequency laser code

以此类推,如果两束指示激光分别采用 m 位周期码和 n 位周期码,其重复周期分别为 ΔT_m 和 ΔT_n,仅当 $\Delta T_m = x\Delta T_n$ (x 为正整数)时,组合信号为 $m+xn$ 位周期码,其总的重复周期为 $\Delta T_{\text{total}} = \Delta T_m$;若不满足整数倍关系,则组合形成脉冲间隔伪随机序列码。

综上所述,可以得出如下结论:若有多个指示激光同时照射目标,其编码采用精确频率码或有限位随机周期码,仅当多个信号的重复周期为整数倍关系,组合信号仍然为有限位随机周期码,当重复周期不满足整数倍关系时,组合信号为脉冲间隔伪随机序列码。

(2) $\Delta t \geqslant \Delta T$。即任意一束指示激光至少完成照射一个编码周期之后,另一束指示激光才开始照射。如图 6 所示,$\Delta t > y \cdot \Delta T$, $y \geqslant 1$。在这种情况下,激光告警器先接收到 y 个周期的单束指示激光编码信号,然后接收到两束指示激光组合信号,当多个信号的重复周期为整数倍关系,组合信号仍然为有限位随机周期码,当重复周期不满足整数倍关系时,组合信号为脉冲间隔伪随机序列码。

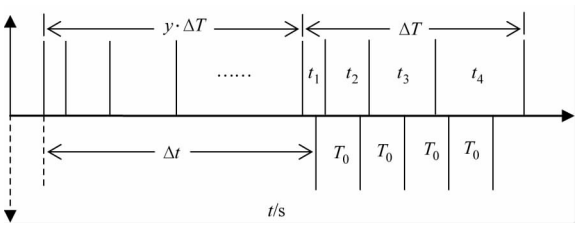

图 6 $\Delta t \geqslant \Delta T$ 时,4 位周期码和精确频率码组合信号示意图

Fig. 6 When $\Delta t \geqslant \Delta T$, the combination signals of a 4 bit periodic laser code and an accurate frequency laser code

3 多目标时激光角度欺骗干扰方法

激光欺骗干扰设备对单一目标诱偏成功有 4 个先决条件:(1)干扰激光进入激光制导武器导引头接收波门且超前制导信号;(2)干扰激光信号要与制导信号模式相关(波长、编码、脉宽等);(3)到达导引头的干扰信号能量强于制导信号;(4)准确判断来袭导弹方位,选择正确假目标。对于多目标情况,则需要考虑:(1)能否对多个指示激光编码信号进行准确区分及识别;(2)能否对多个目标同时实施干扰。

3.1 多目标的区分及识别

如前所述,假设激光告警器不能从方位上对多目标进行区分,此处仅考虑从时域即编码特征来对多目标进行区分及识别。由于缺少先验信息,理论上,激光编码识别要接收到 2 个以上完整重复周期的激光编码信号才有可能正确解码,故可设某激光欺骗干扰设备的解码时间为 $T_j = k\Delta T$ ($k \geqslant 2$, k 为整数)。

(1) $0 < \Delta t < \Delta T$。此时,激光欺骗干扰设备不能对多个指示激光进行区分。根据前文分析,仅当多个信号的重复周期为整数倍关系,即 $\Delta T_m = x\Delta T_n$ (x 为正整数)时,组合信号为 $m+xn$ 位周期码,此时激光欺骗干扰设备理论上可以解码,解码时间为 $T_j = k\Delta T_m$。当重复周期不满足整数倍关系时,组合信号为脉冲间隔伪随机序列码,此时激光欺骗干扰设备不能解码。

(2) $\Delta t \geqslant \Delta T$。此时,激光告警器先接收到 y 个周期的单束指示激光编码信号,然后接收到两束指示激光组合信号。若 $\Delta t \geqslant T_j$,则激光欺骗干扰设备能够在接收到第二束指示激光前完成对第一束指示激光的解码,即能够对多个指示激光进行区分;同时可以先后对多个指示激光进行正确解码。若 $\Delta t < T_j$,则激光欺骗干扰设备在第二束指示激光到达时没有完成对第一束指示激光的解码,理论上不能对多个指示激光进行区分。此时在时间轴上,前段为单一信号,后段为组合信号,组合信号的特征与 $\Delta t < \Delta T$ 时相同,不再重复描述,总体而言,此时信号

特征比组合信号还要复杂,激光欺骗干扰设备若无特别设计很难正确解码。

3.2 多目标的干扰

激光欺骗干扰设备实施干扰的前提是能正确解码,根据前文分析,多目标时仅有两种情况可以正确解码,下面分别就这两种情况分析干扰实施方法。

(1) $0 < \Delta t < \Delta T$,且多个信号的重复周期均为整数倍关系,即 $\Delta T_m = x\Delta T_n$ (x 为正整数),此时组合为 $m + xn$ 位周期码,若其位数小于激光欺骗干扰设备所能解码的最大编码位数,则理论上可以解码,但不能对多个信号进行区分。

此时,激光欺骗干扰设备可以采用"单机多扰"干扰方式,将多个信号视为一个组合信号,即产生一组 $m + xn$ 位周期码组合干扰激光,从单台激光干扰机发射照射到同一假目标上,对于每一个导引头而言,在其接收波门内均会接收到干扰激光信号且超前制导信号,即能够形成有效多目标干扰。考虑到引偏成功后假目标会被炸毁,将干扰激光分为多路,照射到不同假目标上面,干扰效果会更好,与之相对应,则需要提高干扰激光功率及增加激光定向发射装置。

(2) $\Delta t \geqslant T_j$,此时激光欺骗干扰设备能够对多个指示激光进行区分,并且能够先后对多个指示激光信号进行正确解码。在这种情况下,现有激光欺骗干扰设备一般采用"单机单扰"干扰方式,即使用单台激光干扰机仅干扰一个信号。例如根据激光编码复杂程度划分威胁等级,对其中威胁等级高即对编码最复杂的信号实施干扰,其他信号则不干扰,显然"单机单扰"干扰方式只适合应对单目标激光制导攻击,不能应对多目标攻击方式。

此时,激光欺骗干扰设备若只有单台激光干扰机,仍可以采用"单机多扰"干扰方式,针对解码后的多个指示激光分别复制出对应的干扰激光,再将各干扰激光组合,通过单台激光干扰机发射出来。与上述"单机多扰"干扰方式不同的是:无须要求多个指示激光重复周期存在整数倍关系,组合后的干扰激光可能为脉冲间隔伪随机序列码,也可能为有限位随机周期码;与上述"单机多扰"干扰方式相同的是:将干扰激光分为多路照射到不同假目标上面干扰效果会更好。

也可以采用"多机多扰"干扰方式,即采用多个激光干扰机,通过统一干扰资源调度,每台激光干扰机单独干扰一个信号,并将对应的激光制导武器引偏到单独的假目标上。这种干扰方式需要对原有激光欺骗干扰设备进行较大的改造。

4 结 论

多机编队协同空对地激光制导精确打击情况下,战场中将会有多个激光目标指示器同时照射多个目标,每种信号具有不同的方位和编码特征。多目标方位特征差别较小,很难从方位上对多目标进行区分。在多目标编码特征方面,讨论了精确频率码和有限位随机周期码的多种组合方式,认为仅有两种情况可以正确解码及实施干扰:一是多个信号时间差小于任一信号的重复周期,且多个信号的重复周期均为整数倍关系,此时可以对组合信号进行解码,但不能进行信号区分,可以采用"单机多扰"干扰方式实施干扰;二是多个信号时间差均大于激光欺骗干扰设备解码时间,能够对多个信号进行区分并正确解码,可以采用"单机多扰"和"多机多扰"干扰方式实施干扰。其余组合方式则会产生脉冲间隔伪随机序列码,激光欺骗干扰设备不能正确解码及实施干扰。

参考文献:

[1] ZHANG Tengfei, ZHANG Hexin, HUI Junjun, et al. A review on development and application of laser-guided weapons[J]. Electronics Optics & Control, 2015, 22(10): 62 – 67. (in Chinese)
张腾飞,张合新,惠俊军,等. 激光制导武器发展及应用概述[J]. 电光与控制,2015,22(10):62 – 67.

[2] WANG Hengkun, WANG Bing, CHEN Zhaobing. Analysis of the antagonizing laser guided weapon ppto-electronic equipments development[J]. Ship Electronic Engineering, 2011, 31(8): 14 – 17. (in Chinese)
王恒坤,王兵,陈兆兵. 对抗激光制导武器的光电装备的发展分析[J]. 舰船电子工程,2011,31(8):14 – 17.

[3] 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):252 – 255.

[4] SUN Chunsheng, ZHANG Xiaohui, ZHANG Shuang. Guarded angle of laser decoy in laser trick jamming[J]. Laser & Infrared,2017,47(3):347 – 351. (in Chinese)
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.

[5] QU Dapeng,ZHANG Bin, CHEN Zhongqi, et al. Weapon selection in dual-fighter cooperated air-to-ground attack under antagonism environment[J]. Electronics Optics & Control,2010,17(5):59 – 61. (in Chinese)
曲大鹏,张斌,陈中起,等. 对抗环境下双机协同空对地武器选用研究[J]. 电光与控制,2010,17(5):59 – 61.

[6] CHEN Zhi, JIANG Changsheng. Decision-making for air to surface multi-target attacking based on multi-expert weights[J]. Electronics Optics & Control,2011,18(7):18 – 21. (in Chinese)
陈挚,姜长生. 基于多专家权重的空对地多目标攻击决策[J]. 电光与控制,2011,18(7):18 – 21.

[7] WEI Wenjian. Key techniques and system study on HWIL simulation for laser guidance and electro-optical countermeasures[D]. Changsha: National University of Defense Technology,2010. (in Chinese)
魏文俭. 激光制导光电对抗半实物仿真关键技术与系统研究[D]. 长沙:国防科技大学,2010.

[8] QI Gang. Research on laser angle deception jamming technology[D]. Xi′an: University of Electronic Science and Technology of China,2015. (in Chinese)
亓刚. 对激光角度欺骗干扰技术的研究[D]. 西安:电子科技大学,2015.

[9] SHEN Tao, SONG Jianshe. Analysis of laser guidance weapons real-time gate signal choosing technology[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance. 2006,26(4):398 – 400. (in Chinese)
沈涛,宋建社. 激光制导武器实时波门选通信号技术分析[J]. 弹箭与制导学报,2006,26(4):398 – 400.