

激光测距干扰与反干扰技术研究

周治伟,孙晓泉,樊祥

(电子工程学院光电系,安徽合肥 230037)

摘要: 论述对激光测距机的欺骗式干扰途径及其实现的技术要求,包括无源和有源型正偏差干扰、负偏差欺骗干扰等,建立了无源光纤激光测距干扰系统的干扰效果评估模型,着重分析和计算了其实现的技术可行性参数,得出了可行性结论。还探讨了激光测距机的反干扰措施。

关键词: 激光; 测距; 欺骗式干扰; 反干扰; 有源干扰; 无源干扰

中图分类号: TN24 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2276(2005)06-0646-05

Jamming methods on laser rangefinder and relational countermeasures

ZHOU Zhi-wei, SUN Xiao-quan, FAN Xiang

(Department of Optical-electric Technology, Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China)

Abstract: Deception jamming methods such as passive positive deviation jamming, active positive deviation jamming and active negative deviation jamming etc on laser rangefinders and corresponding technical requirements are systematically discussed. Meanwhile the jamming effect evaluation model of passive delay fiber jamming system is established with its technical feasibility parameters calculated, and a conclusion is drawn that the passive delay fiber jamming system is practical. Available and potential countermeasures of laser rangefinder are also presented.

Key words: Laser; Range; Deception jamming; Countermeasure; Active jamming; Passive jamming

0 引言

激光测距机是迄今为止装备数量最多的军用激光设备。许多国家在武器平台上,装备了大量的激光测距机(包括激光指示器),如坦克、装甲车、步兵炮阵地、水面舰艇以及武装直升机、各种战斗机等。由于这些测距机是火控系统的必要组成部分^[1-3],因此对激光测距机的干扰研究极为重要,一些国家已研制出

相应的干扰设备,其主要工作方式是欺骗式干扰。激光测距欺骗干扰技术可分为产生测距正偏差和负偏差两类。

1 无源型测距正偏差干扰

1.1 工作原理

德国研制成功一种无源光纤激光测距干扰系统,

收稿日期:2005-05-10; 修订日期:2005-06-18

作者简介:周治伟(1979-),男,安徽临泉人,硕士生,主要从事光电技术、脉冲功率技术研究。

采用光纤二次延迟技术。当平台受到敌方激光测距信号照射后,由光纤经极短的二次延迟后,按原路反射回去,使敌方测距机在设定的距离选通范围内探测到的是产生测距正偏差的干扰信号^[3,4],其干扰设备原理如图1所示^[4]。在平台四周均匀分布许多会聚透镜,每个会聚透镜的焦平面与一根光纤相耦合,光纤的另一端使用了光学耦合元件,与延迟光纤相连。在延迟光纤的尾端设有反射镜,将所有光纤与一根延迟光纤相连接。这样,在任一方向入射的激光信号都会被一个透镜所接收,并由延迟光纤两次延迟,按原路反射回去,产生一个正偏差(远距离)的错误测距脉冲。延迟时间由延迟光纤的长度决定,其长度选择应使反射回去的激光干扰脉冲能落入测距机所设定的距离选通范围之内。

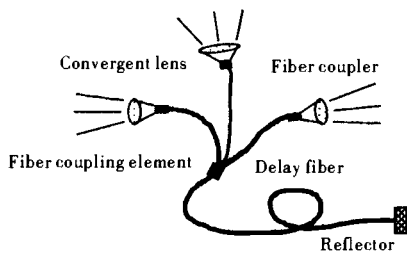


图1 光纤激光测距干扰系统原理图

Fig.1 Schematic diagram of delay fiber jamming system on laser rangefinder

1.2 干扰效果估算

设光纤耦合器耦合效率为 η , 光纤衰减系数为 β , 延迟光纤长度为 L , 反射镜反射率为 ρ_m 。测距机发射峰值功率为 P_1 , 测距机与干扰平台距离为 R 。干扰反射功率示意图如图2所示。目标处测距光斑面积为(设激光为基模高斯光束)^[5]:

$$A_b = \pi \frac{(\theta_1 R)^2 + D^2}{4} \quad (1)$$

式中 D 为测距机发射口径; θ_1 为发射波束角。由测距方程可得,接收机接收到目标反射回波的功率为^[1]:

$$P_r = \frac{P_1 K_t K_r T_a^2 \rho \cos^2 \theta}{\pi R^2} A_r \left(\frac{A}{A_b} \right) \quad (2)$$

式中 K_t 、 K_r 分别为测距机发射与接收光学系统的透过率; $T_a = e^{-\mu R}$, 是大气单程透过率, μ 为大气衰减系

数, m^{-1} ; ρ 为目标反射系数; θ 为目标平面法线与测距机-目标连线的夹角; A_r 为接收口径的面积; A 为有效目标面积。

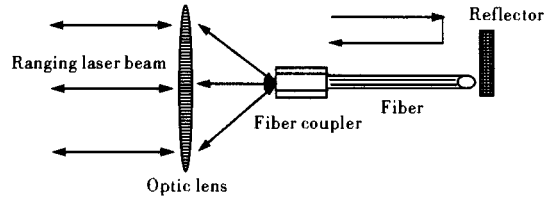


图2 干扰反射功率示意图

Fig.2 Power of interference wave

当目标面积大于光斑面积,则 $A=A_b$, 上式化为:

$$P_r = \frac{P_1 K_t K_r T_a^2 \rho \cos^2 \theta}{\pi R^2} A_r \quad (3)$$

为了避免重复,仅讨论目标面积大于光斑面积的情况。由于 θ 是一个时间和空间都相对随机的量,设 θ 在 $0 \sim \pi$ 内关于时间服从均匀分布,可得 P_r 的均值为:

$$\bar{P}_r = \frac{P_1 K_t K_r T_a^2 \rho}{2\pi R^2} A_r \quad (4)$$

实际计算时常采用公式(4)代替公式(3)。

对于进入透镜并反射回去的光束,若忽略由于透镜系统的不理想因素造成的发散,只考虑衍射极限情况,则回波束散角 θ_d 为^[6]:

$$\theta_d = 2.44 \frac{\lambda}{D_1} \quad (5)$$

式中 D_1 为干扰系统的透镜直径。

实际上回波束散角采用衍射极限角是不合理的。因为会聚的光束在光纤内经过较长距离的传播再反射回来,传播的几何路径并不能交到入射时会聚的焦点上。大部分返回光束在光纤耦合器出口偏离原焦点投射到透镜上,造成光束的发散。假设返回的光束在耦合器端面上强度分布均匀,可得光束发散角为:

$$\theta_s = \frac{d}{F} \quad (6)$$

单个透镜接收并反射回测距机接收口径的功率为(暂考虑入射光束方向与透镜光轴平行,且光斑大于接收口径):

$$P_r' = \frac{P_t K_t K_r K_l T_a^2 T_o^2 \eta \rho_m A_r}{A_b} \left(\frac{D_1^2}{\theta_s^2 R^2 + D_1^2} \right) \quad (7)$$

式中 K_l 为透镜透过率; $T_o = e^{-\alpha}$, 为光纤的单程衰减; η 为耦合效率; ρ_m 为反射镜反射率。为了实现有效干扰, 要求 $P_r' \geq P_r$, 于是由公式(4)和公式(7)得:

$$\frac{P_r'}{P_r} = \frac{k_t^2 T_o^2 \eta^2 \rho_m}{\rho} \left(\frac{2\pi R^2}{A_b} \frac{D_1^2}{\theta_s^2 R^2 + D_1^2} \right) \quad (8)$$

考虑上式中第二项

$$\frac{2\pi R^2}{A_b} \frac{D_1^2}{\theta_s^2 R^2 + D_1^2} = \frac{8}{\left(\theta_t^2 + \frac{D^2}{R^2} \right)} \frac{D_1^2}{(d/F)^2 R^2 + D_1^2} \quad (9)$$

英国马可尼公司生产的 121 型激光指示器/测距机^[7], 取 $R=1000$ m, $D=100$ mm, $F=50$ mm, $d=1$ mm, $\eta=0.4$, $\rho_m=0.99$, $\rho=0.15$, $K_l=0.99$, $T_o=0.8$, $\theta_t=1.5$ mrad。绘出公式(8)关于 D_1 的变化曲线, 如图 3 所示。其中横坐标为透镜直径, 假设焦距为 5 cm, 纵坐标为由公式(8)确定的比值。由图 3 可以看出, 对于以上给定的参数, 当 $D_1 \approx 4$ cm 时, $P_r'/P_r \approx 1$; 随着透镜口径增大, P_r'/P_r 也增大, 当 $D_1 \approx 10$ cm 时, $P_r'/P_r \approx 5.8$ 。

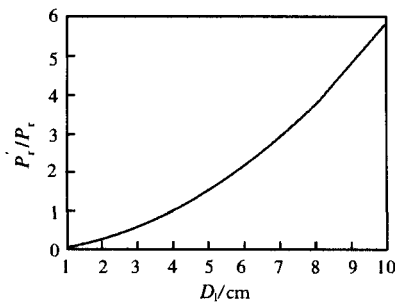


图 3 P_r'/P_r 与透镜直径的关系曲线

Fig.3 Relational curve between P_r'/P_r and lens diameter

由上可知, 适当选取一定焦距和口径的透镜以及合适大小的光纤, 回波的强度完全可以达到干扰要求。

1.3 其他

实际上, 往往对待保护目标采用涂覆隐身材料等激光隐身技术, 以尽可能减小目标的回波, 从而增大 P_r'/P_r 的比值, 使测距机探测的目标回波淹没在背景噪声中, 而只能探测到干扰信号, 从而大大提高干扰

成功的概率。

如果测距机采用距离波门限制, 即当测距机录取首脉冲后, 开始设定下一个波门开启时间, 其时间设定完全由上一个录取脉冲到达时间确定。如果波门很窄, 光纤延迟的干扰信号将被“拒之门外”。对于激光测距机, 由于其发射光束发散角及接收视场都很小, 录取波门完全可以设得很窄^[1]。这就决定了无源欺骗干扰方式对于反干扰加固的测距机干扰将很有限。

设测距机波门宽度为 $\tau=0.2$ μ s, 录取脉冲处于下一个波门中心, 则其相应的距离范围为 $R=R_0 \pm \frac{c\tau}{4n}$ 。 R_0 为首脉冲对应的距离, n 为大气折射率。设 $n=1$, 于是 $R=R_0 \pm 15$ m, 对于这样小的距离波门, 无源欺骗干扰将无能为力。因此, 有源型干扰是非常必要的。

2 有源型正距离欺骗干扰

有源型正距离激光测距干扰机可称为应答式干扰机, 也可称为同步转发式激光干扰机, 结构如图 4 所示^[8]。激光探测器置于会聚透镜 1 的焦平面上, 以便有效地接收激光能量。激光探测器的输出端接电子延迟线路的输入端, 电子延迟线路的输出端接激光探测器的触发器。干扰激光脉冲由会聚透镜 2 发射出去。激光器的光轴应平行于会聚透镜的光轴, 且会聚透镜 1 和 2 的光轴也互相平行, 这样使干扰脉冲能按原方向发射回去。由于这种激光干扰机发出的干扰脉冲信号总是滞后于实际目标的回波脉冲信号, 因此它只能进行正距离测距欺骗。

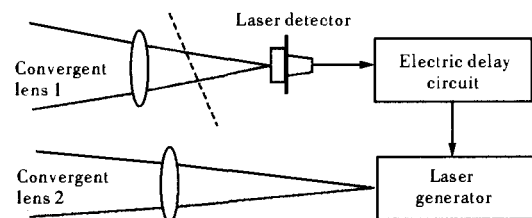


图 4 有源干扰装置部分电路示意图

Fig.4 Schematic diagram of active jamming system

有源型正距离激光测距干扰机相对于无源型, 其优点是: 体积较小, 机动性较强, 不需要庞大的无源型干扰平台; 干扰激光功率控制灵活, 延迟时间精确可调; 激光束发散角较大, 能有效覆盖被干扰目标, 有利

于提高干扰成功率。其缺点是:对侦察系统要求较高,而无源型基本不需要侦察系统,由于敌方测距机的接收视场很窄,对我方告警系统的角度分辨率和引导系统的跟踪精度比较高^[9];结构较为复杂,成本较高。

在敌方测距机的一个测程内,有源型干扰系统可使干扰脉冲尽可能提前于目标回波到达或者同时到达敌方测距机接收口径,以提高干扰效果^[1]。例如,在美国的 LARC 激光测距机对抗系统中,采用先进的脉冲分析并提前发射激光干扰脉冲体制^[9]。这对激光器要求不高,但对告警系统要求较高。告警系统为了实现对方测距机的快速发现和精确定位,较好的办法是利用光学系统的“猫眼效应”来完成对测距机电探测器的定位^[10]。

3 测距负偏差欺骗干扰

采用发射高重复频率的激光干扰机。干扰机发射高重复频率、高峰值功率且有一定发散角的激光束,使敌方激光测距机不管何时开机都能接收到随机的干扰脉冲。有效的干扰脉冲一般先于真实的目标回波信号,所以使敌方测距机误判干扰脉冲为较短距离的目标回波信号,从而达到干扰的目的。

3.1 干扰脉冲重复频率

采用自适应波门技术的高重频测距机,一般有两种工作状态:先工作于宽波门的搜索状态,在经过几次测距给出可靠目标距离后,再进行距离判别、选择,并根据目标距离设置很窄的波门,进入跟踪状态。为了取得较高的干扰概率,应该保证在敌方测距机宽波门工作状态下,一个波门内进入两个或两个以上的干扰脉冲,要求

$$f \geq c/R \quad (10)$$

若以最小干扰距离为 1 km 计算,则干扰激光脉冲重复频率应满足:

$$f \geq 300 \text{ kHz} \quad (11)$$

当测距机进入跟踪状态后,干扰脉冲的重复频率由测距机的波门所限定。同上,设测距机波门为 τ_s ,要求在测距波门内至少进入两个干扰脉冲,则有:

$$f \geq 2/\tau_s \quad (12)$$

如果 τ_s 为 0.2 μs ,则要求 f 不小于 10^7 Hz,即要求重复频率提高两个数量级。普通的固体激光器和半导体激光器难以做到这样高的重复频率,只有连续泵浦的调 Q 或锁模激光器才能胜任^[1]。

3.2 干扰功率

干扰机所需的脉冲峰值功率可由干扰方程估算^[11]:

$$P_j \geq \pi P_{\min} R^2 \theta_j^2 e^{-\mu R} / 4K_j K_r A_r \quad (13)$$

式中 P_{\min} 为激光测距机最小可探测功率; R 为干扰距离; θ_j 为干扰机发射束散角; K_j 为干扰机发射光学系统透过率; K_r 为激光测距机接收光学系统透过率。

干扰机输出的平均功率由下式计算:

$$P_a = f P_r \quad (14)$$

测距机接收到目标反射回波的峰值功率可由公式(2)~(4)确定。

干扰激光进入测距机接收口径的峰值功率为:

$$P_r' = \frac{4K_j K_r e^{-\mu R} P_j}{\pi \theta_j R^2} A_r \quad (15)$$

若忽略光学系统及大气衰减,有:

$$P_r' = \frac{4P_j}{\pi \theta_j R^2} A_r \quad (16)$$

$$P_r = \frac{P_j \rho}{2\pi R^2} A_r \quad (17)$$

(注:这里 P_r 是公式(3)对 θ 的平均值)

要求 $P_r' \geq P_r$,由公式(16)和(17)得:

$$P_j/P_r \geq \frac{\rho \theta_j^2}{8} \quad (18)$$

英国 121 型激光指示器/测距机的峰值功率为 $P_i = 60 \text{ mJ}/15 \text{ ns} = 4 \text{ MW}$,绘出的激光干扰机干扰功率随发散角变化的关系曲线,如图 5 所示,图中两条曲线的目标半球反射率分别为 0.1 和 0.25(一般的军事目标的目标半球反射率为 0.1~0.25^[12])。

由图 5 可以看出,干扰激光发散角约为 30 mrad 时,干扰功率应达到 45~120 W。所以干扰激光源是比较容易做到的。实际上,对接收视场很小的激光测距机,干扰激光发散角可以做得更小(10~20 mrad),所需的功率也更小。

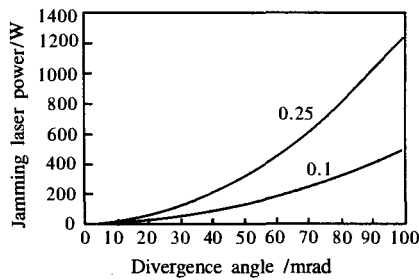


图 5 干扰激光功率与光束发散角的关系曲线

Fig.5 Relational curve between jamming laser power and divergence angle of laser beam

4 激光测距机的反干扰

针对激光测距机的几种欺骗干扰手段,其具体实现的形式不一而足。有“矛”必有“盾”,激光测距机/指示器系统的发展也在积极应对这些干扰措施,针对具体的干扰形式,采取多种反干扰技术措施,包括多波长、距离波门、快门、滤光片、偏振接收、抗饱和接收技术等^[4]。

(1) 多波长测距往往配合滤光片接收技术,可有效对抗敌方的有源干扰,但是对上述的光纤延迟无源干扰作用不大;

(2) 距离波门针对正距离干扰效果较好,但是不能完全阻止高重频干扰脉冲;

(3) 偏振接收技术可大幅度降低进入接收机的有源干扰强度。但是,若对方的告警系统很快探测到测距机的发射脉冲的偏振态,从而引导干扰机发射与之相垂直偏振的干扰脉冲,测距机也会受到干扰^[7];

(4) 快门和抗饱和接收技术用来对付敌方的压制性软杀伤干扰,已不属于欺骗干扰范畴。

5 结束语

综上所述,针对测距机的欺骗干扰和测距机的反干扰手段各有千秋。干扰不可能是绝对的干扰。实际上,需要根据战术要求,选择适当的干扰措施,取得较大的效费比;干扰手段也不能单纯地追求“全能”。测距机的反干扰措施也不可能对所有的干扰都奏效。这是一个矛盾的权衡。但是在一定的战术环境中,达到一定的对抗目的是可能的。

参考文献:

- [1] SUN Xiao-quan, LV Yue-guang. Principles and Techniques on Laser Jamming[M]. Beijing: Publishing House of PLA(孙晓泉,吕跃广. 激光对抗原理与技术.北京:解放军出版社),2000.
- [2] XUE Hai-zhong. Overview of World's Latest Military Photoelectric Techniques[M]. Zhengzhou: No.27 Research Institute of Information Industry Department(薛海中.世界最新军用光电技术综述.郑州:信息产业部第二十七研究所),2001.789.
- [3] JIANG Yao-ting, PAN Li-na. Active laser interference and its present development [J]. Photoelectric Countermeasure and Passive Jamming(蒋耀庭,潘丽娜.激光有源干扰及其发展现状.光电对抗与无源干扰),2004,28(4):438.
- [4] ZHOU Li -wei. Target Detection and Identification [M]. Beijing: Publisher of Beijing Science and Technology University (周立伟.目标探测与识别.北京:北京理工大学出版社),2002.353.
- [5] ZHOU Bing-kun, GAO Yi-zhi, CHEN Chou-rong, et al. Principles of Laser. 4th ed. [M]. Beijing: Publishing House of National Defense Industry (周炳琨,高以智,陈倜嵘,等.激光原理.第4版.北京:国防工业出版社),2000.
- [6] ZHAO Kai-hua, ZHONG Xi-hua. Optics[M]. Beijing: Publisher of Beijing University(赵凯华,钟锡华.光学.北京:北京大学出版社),1984.227.
- [7] ZHANG Cheng-quan. Handbook of Foreign Military Laser Devices[M]. Beijing: Weapon Industry Publisher(张承铨.国外军用激光仪器手册.北京:兵器工业出版社),1989.45.
- [8] HOU Zhen-ning. Research on laser deception jamming technology [J]. Applied Optics(侯振宁.激光欺骗干扰技术研究.应用光学),2002,23(1):34-35.
- [9] LIU Jing-jiao. Techniques and Systems of Photoelectric Countermeasure[M]. Beijing: China Science and Technology Publisher(刘京郊.光电对抗技术与系统.北京:中国科学技术出版社),2004.150.
- [10] XIANG Jian-yong, XIONG Xiao-wei, LIU Shang-qian, et al. Quantitatively evaluating of laser blinding countermeasure and its simulation technology[J]. Transaction of Xi'an Electronic Technology University(向健勇,熊晓伟,刘上乾,等.激光致盲干扰效果定量评价及其仿真技术.西安电子科技大学学报),1997,24(2):267-272.
- [11] HAN Kai. Research on Active Laser Deception Jamming Methods [A]. The 9th Professional Committee Conference Symposium on Photoelectric Countermeasure and Passive Jamming[C](韩凯.激光主动欺骗式干扰.第九届光电对抗与无源干扰专业委员会学术交流论文集).1998.153.
- [12] JIAN Li. Handbook of Foreign Photoelectric Countermeasure Equipments[M]. Beijing: Weapon Science Research Institute and No. 201 Institute of Weapon Industry(简莉.国外光电对抗器材手册.北京:兵器科学研究院兵器工业201所),1998.