

激光导引头探测性能对高重复频率干扰激光器的影响

刘志国¹, 邱雄^{1*}, 王仕成¹, 王志敏²

¹火箭军工程大学导弹工程学院, 陕西 西安 710025;

²火箭军研究院系统工程研究所, 北京 100091

摘要 高重复频率干扰激光器被激光导引头精确探测是高重复频率有效干扰的必要条件,因此基于激光导引头探测性能研究高重复频率干扰激光器至关重要。采用计算分析的方法研究导引头虚警概率和探测概率,得出:当阈噪比 T_{NR} 为 3.5 时,虚警概率 P_f 约为 0.02%;当阈噪比 T_{NR} 为 3.5 且被检测信号在导引头入瞳处的功率密度为导引头探测器门限值的 1.9 倍时,探测概率 P_p 约为 99.92%。基于探测概率研究高重复频率干扰激光器的激光导引头探测概率 P_p 与高重复频率干扰激光器参数(平均功率 P_1 、脉冲发射频率 f 、脉冲宽度 τ)、激光导引头参数(探测器门限值 P_{th} 、阈噪比 T_{NR})以及作用距离 R 之间的关系,并结合应用背景通过 MATLAB 软件进行仿真分析。

关键词 激光器;虚警概率;探测概率;导引头探测器门限值;阈噪比;高重复频率干扰激光器

中图分类号 TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.1101001

Influence of Laser-Seeker Detection Performance on High Repetition Rate Interference Laser

Liu Zhiguo¹, Qiu Xiong^{1*}, Wang Shicheng¹, Wang Zhimin²

¹Rocket Force Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710025, China;

²Rocket Army Research Institute of Systems Engineering, Beijing 100091, China

Abstract The effective detection of high repetition rate interference lasers depends on the accurate performance of laser seekers. Therefore, we use computational analysis to investigate the laser-seeker detection performance and false-alarm probability. By applying this method, we reach the conclusions that when the threshold-to-noise ratio $T_{NR}=3.5$, the approximate false-alarm probability $P_f=0.02\%$; when $T_{NR}=3.5$ and the power density of the detected signal at the seeker entrance is 1.9 times the seeker-detector threshold, the approximate detection probability $P_p=99.92\%$. Considering such detection probability, we study the high repetition rate interference laser to obtain the relationship among the laser-seeker detection probability P_p , parameters of the high-frequency interference laser (average power P_1 , pulse-transmission frequency f , and pulse width τ), laser-seeker parameters (detector threshold P_{th} and threshold-to-noise ratio T_{NR}), and action distance R . During this process, we use MATLAB for simulation analysis in combination with the application background.

Key words lasers; false alarm probability; detection probability; seeker detector threshold; threshold-to-noise ratio; high repetition rate interference laser

OCIS codes

1 引言

目前,各强国均在研制作用距离远、制导精度高、杀伤强度大的新型激光精确制导武器,作为防御方,激光干扰技术的研究则尤为重要。高重复频率干扰是一种十分有效的干扰方式,其不仅要求高重

复频率干扰激光以较高的频率进入导引头波门内,还要求高重复频率干扰激光可被空中的激光导引头探测到,所以激光导引头的探测性能对高重复频率干扰技术十分重要。文献[1]主要结合实验对激光雷达探测概率和虚警概率的影响因素进行分析;文献[2-3]研究了激光在大气传输中能量衰减的计算

收稿日期: 2019-05-15; 修回日期: 2019-06-17; 录用日期: 2019-06-25

基金项目: 国家自然科学基金(61673017,61673386)

* E-mail: 757327440@qq.com

方法;文献[4-5]研究了激光在大气斜程传输中大气透射率的计算方法;文献[6]分析了高重复频率干扰激光对激光导引头的干扰机理;文献[7]分析了高重复频率干扰激光器的工作机理;文献[8-12]分析了干扰和噪声对激光制导的影响以及激光技术在工程上的应用。目前对激光导引头探测性能的定量分析以及基于导引头探测性能研究高重复频率激光器对激光导引头干扰效果的相关文献较少。为深入研究激光导引头的探测性能,进而根据导引头探测性能研究高重复频率干扰激光器对激光导引头的干扰效果,本文采用计算分析方法研究了激光导引头虚警概率 P_f 与阈噪比 T_{NR} 的关系;基于虚警概率 $P_f = 0.02\%$,研究了探测概率 P_p 与参数 m (导引头入瞳处被检测信号功率密度 P_s 与导引头探测器门限值 P_{th} 的比值)的关系;分析了高重复频率干扰激光在大气传输中能量的衰减规律,得到经大气衰减传递至导引头入瞳处的激光功率密度 P_s 与高重复频率干扰激光器参数及作用距离 R 之间的关系;基于探测概率研究高重复频率干扰激光器的激光导引头探测概率 P_p 与高重复频率干扰激光器参数、激光导引头参数以及作用距离 R 之间的关系。而后在激光导引头参数确定的情况下,结合应用背景从三方面进行了分析:1)若已知作用距离 R 与脉冲发射频率 f ,讨论高重复频率干扰激光器平均功率 P_1 与探测概率 P_p 之间的关系,即可根据探测概率得到高重复频率干扰激光器的平均功率;2)若已知作用距离 R 与高重复频率干扰激光器平均功率 P_1 ,讨论脉冲发射频率 f 与探测概率 P_p 之间的关系,可结合高重复频率干扰超前概率分析高重复频率有效干扰条件下的脉冲发射频率 f 的调节范围;3)若已知高重复频率干扰激光器平均功率 P_1 与脉冲发射频率 f ,讨论探测概率 P_p 与作用距离 R 之间的关系,可根据不同作用距离处的探测概率分析高重复频率干扰的有效性以及根据合适的探测概率确定高重复频率干扰激光器的最佳开机时机。

2 激光导引头探测性能分析

导引头工作过程中,受工作环境与放大电路影响,其内部会产生噪声干扰电流。设噪声干扰电流为 I_1 ,将其等效转换为导引头探测器入瞳处的噪声干扰功率密度 P_n ,转换公式为

$$P_n = \frac{I_1}{R_p \cdot S_A \cdot T_A}, \quad (1)$$

式中: R_p 表示探测器的脉冲响应率,单位为 A/W;

S_A 表示导引头入瞳处面积; T_A 表示导引头光学系统的透过率。

当导引头检测到激光脉冲信号时,可通过设置探测器门限值方法来区分其是噪声干扰信号还是被检测信号,即当被检测到的激光脉冲功率密度大于探测器门限值时,则认为是被检测信号,否则认为是噪声干扰信号。在导引头波门内某一时刻,若没有被检测信号时,由于噪声干扰的影响,导引头可能会误将噪声干扰信号视为被检测信号,这种情况称为导引头虚警,该情况发生的概率称为虚警概率;而在导引头波门内某一时刻,若有被检测信号时,由于噪声干扰信号的影响,被检测信号不一定能被导引头检测到,此时被检测信号被导引头检测到的概率称为探测概率。可以看出,在导引头制导过程中,若不存在噪声干扰信号,则虚警概率为 0;若探测器门限值为 0,则探测概率为 100%。但在导引头的实际工作中,必然存在噪声干扰信号,此时希望通过设置合理的导引头探测器门限值及被检测信号强度,降低虚警概率,提高探测概率,从而提升导引头探测性能以及制导精度。

2.1 虚警概率

2.1.1 理论分析

虚警概率是指噪声干扰功率密度 P_n 超过导引头探测器门限值 P_{th} 时,导引头将噪声干扰信号误认为被检测信号的概率,记为 P_f 。由于噪声干扰信号是由诸多因素引起的,综合考虑所有因素来分析噪声干扰信号十分复杂,现假设噪声干扰信号服从高斯分布,功率密度 P_n 的均值 $\bar{P}_n = 0$, P_n 标准差记为 σ_{P_n} ,则 $\frac{P_n}{\sigma_{P_n}} \sim \mathcal{N}(0, 1)$,其中,“ \sim ”表示服从于, $\mathcal{N}(0, 1)$ 表示标准正态分布。导引头探测器门限值 P_{th} 为激光导引头在其入瞳处预先设计的可敏感的最小脉冲功率密度,则虚警概率 P_f 可表示为

$$P_f = \int_{P_{th}}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{P_n}} \exp\left(-\frac{P_n^2}{2\sigma_{P_n}^2}\right) dP_n. \quad (2)$$

令 $x = \frac{P_n}{\sqrt{2}\sigma_{P_n}}$, 并将其代入(2)式得

$$P_f = \int_{\frac{P_{th}}{\sqrt{2}\sigma_{P_n}}}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp(-x^2) dx = \int_0^{\infty} \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp(-x^2) dx - \int_0^{\frac{P_{th}}{\sqrt{2}\sigma_{P_n}}} \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp(-x^2) dx = 0.5 - \int_0^{\frac{T_{NR}}{\sqrt{2}}} \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp(-x^2) dx, \quad (3)$$

式中: T_{NR} 为阈噪比, $T_{NR} = \frac{P_{th}}{\sigma_{P_n}}$ 。

2.1.2 仿真分析

通过上述分析可知,导引头虚警概率的表达式为 $P_f = 0.5 - \int_0^{\frac{T_{NR}}{\sqrt{2}}} \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp(-x^2) dx$, 现通过 MATLAB 软件进行仿真,得到 P_f 与 T_{NR} 的关系如图 1 所示。

为更好地分析图 1 中 P_f 与 T_{NR} 的量化关系,根据 MATLAB 软件的仿真结果得到如表 1 所示的数据。

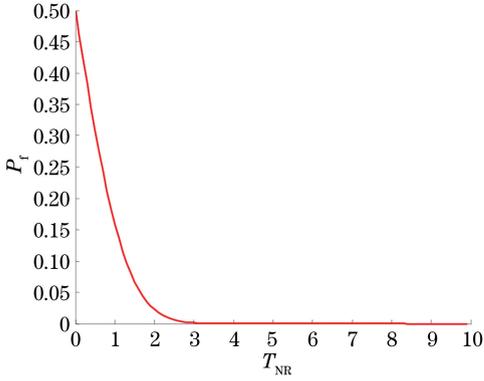


图 1 P_f 与 T_{NR} 的关系

Fig. 1 Relationship between P_f and T_{NR}

表 1 P_f 与 T_{NR} 的关系

Table 1 Relationship between P_f and T_{NR}

T_{NR}	1	1.5	2	2.5	3	3.5
P_f	0.1587	0.0668	0.0228	0.0062	0.0013	0.0002

图 1 给出了虚警概率 P_f 和阈噪比 T_{NR} 的关系,随着阈噪比 T_{NR} 增大,虚警概率 P_f 减小。当阈噪比 $T_{NR} \leq 2$ 时,虚警概率 P_f 减小较快;当阈噪比 $2 < T_{NR} \leq 3$ 时,虚警概率 P_f 减小较为缓慢;当阈噪比 $T_{NR} > 3$ 时,虚警概率 P_f 基本等于 0 且减小幅度很小。从表 1 可以看出:当阈噪比 $T_{NR} = 3$ 时,虚警概率 $P_f = 0.13\%$;当阈噪比 $T_{NR} = 3.5$ 时,虚警概率 $P_f = 0.02\%$,此时认为阈噪比 $T_{NR} = 3.5$ 的导引头探测器可应用于激光导引头精确制导。通常导引头探测器门限值 P_{th} 小于 $1 \mu W/cm^2$, 现取 $P_{th} = 0.35 \mu W/cm^2$, 则当噪声干扰功率密度标准差 $\sigma_{P_n} \leq 0.1 \mu W$ 时,认为该导引头的虚警概率低,可用于激光制导武器的精确制导,所以本研究的被高重复频率干扰的导引头即是阈噪比 $T_{NR} = 3.5$ 的激光导引头。

2.2 探测概率

2.2.1 理论分析

在导引头工作过程中,当导引头入瞳处的被检测信号功率密度超过导引头探测器门限值 P_{th} 时,

被检测信号由于受噪声干扰信号影响而不一定被导引头探测到,此时被导引头探测到的概率称为探测概率,记为 P_p 。假设导引头入瞳处的被检测信号为稳态信号 P_s ,该稳态信号 P_s 和噪声干扰信号 P_n 叠加后产生的新信号记为 P_m 。由于本研究认为被检测信号 P_s 为稳态值,而导引头入瞳处的噪声干扰信号 P_n 服从高斯分布且均值 $\bar{P}_n = 0$,标准差为 σ_{P_n} ,所以叠加后的新信号 P_m 服从正态分布 ($P_s, \sigma_{P_n}^2$),即 $\frac{P_m - P_s}{\sigma_{P_n}} \sim \mathcal{N}(0, 1)$,此时被检测信号的探测概率 P_p 可表示为

$$P_p = \int_{P_{th}}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{P_n}} \exp\left[-\frac{(P_m - P_s)^2}{2\sigma_{P_n}^2}\right] dP_m. \quad (4)$$

令 $y = \frac{P_m - P_s}{\sqrt{2}\sigma_{P_n}}$, 并将其代入(4)式得

$$P_p = \int_{\frac{P_{th}-P_s}{\sqrt{2}\sigma_{P_n}}}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp(-y^2) dy = \int_0^{\infty} \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp(-y^2) dy + \int_{\frac{P_{th}-P_s}{\sqrt{2}\sigma_{P_n}}}^0 \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp(-y^2) dy = 0.5 + \int_0^{\frac{P_s-P_{th}}{\sqrt{2}\sigma_{P_n}}} \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp(-y^2) dy. \quad (5)$$

从(5)式可以看出,探测概率 P_p 由积分上限 $\frac{P_s - P_{th}}{\sqrt{2}\sigma_{P_n}}$ 决定,而从虚警概率分析可知,工程上认为 $T_{NR} = 3.5$ 时的虚警概率符合精确制导需求。为在探测概率中引入 T_{NR} , 现今被检测信号 $P_s = m \cdot P_{th}$ (m 为被检测信号在导引头入瞳处的功率密度 P_s 和导引头探测器门限值 P_{th} 的比值) 并将其代入(5)式,则探测概率 P_p 可表示为

$$P_p = 0.5 + \int_0^{\frac{P_s-P_{th}}{\sqrt{2}\sigma_{P_n}}} \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp(-y^2) dy = 0.5 + \int_0^{\frac{(m-1)P_{th}}{\sqrt{2}\sigma_{P_n}}} \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp(-y^2) dy = 0.5 + \int_0^{\frac{(m-1)T_{NR}}{\sqrt{2}}} \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp(-y^2) dy. \quad (6)$$

由(6)式可知,当阈噪比 T_{NR} 一定时,若参数 m 增大,探测概率 P_p 也增大。

2.2.2 仿真分析

通过上述分析可知,导引头探测概率 P_p 的表达式为(6)式,基于虚警概率满足精确制导要求,即当 $T_{NR} = 3.5$ 时,采用 MATLAB 软件仿真得到 P_p 与 m 的关系如图 2 所示。

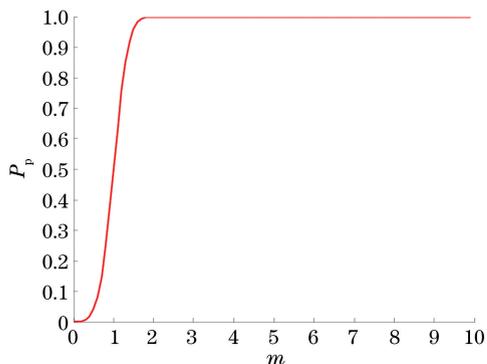


图2 $T_{NR}=3.5$, P_p 与 m 的关系

Fig. 2 Relationship between P_p and m when $T_{NR}=3.5$

为更好地分析图2中 P_p 与 m 的量化关系,根据 MATLAB 软件的仿真结果得到表2所示的数据。

表2 $T_{NR}=3.5$, P_p 与 m 的关系

Table 2 Relationship between P_p and m when $T_{NR}=3.5$

m	0.5	1	1.5	1.7	1.8	1.9
P_p	0.0401	0.5000	0.9599	0.9929	0.9974	0.9992

图2给出了当阈噪比 $T_{NR}=3.5$ 时,探测概率 P_p 和参数 m 的量化关系。从图2可以看出:探测概率 P_p 随着参数 m 增加而增大;当 $m \leq 1$ 时,探测概率 $P_p \leq 50\%$,认为激光被导引头探测到的概率小,不具备工程使用效果;当 $m > 1.5$ 时,探测概率 $P_p \geq 90\%$ 。由表2可看出,当 $m=1.7$ 时,探测概率 $P_p=99.29\%$;而当 $m=1.9$ 时,探测概率 $P_p=99.92\%$,因此,认为满足 $m \geq 1.9$ 的被检测信号可被该激光导引头精准探测到。

通过上述分析发现:当导引头阈噪比 $T_{NR}=3.5$ 时,虚警概率 $P_f=0.02\%$,此时可认为虚警概率 $P_f \leq 0.02\%$ 的导引头达到了激光制导武器的精确制导要求;在阈噪比 $T_{NR}=3.5$ 的情况下,当 $m \geq 1.9$ 时,被检测信号可被该激光导引头以较高的探测概率精准探测到,但由于参数 m 表示导引头入瞳处的被检测信号功率密度 P_s 与导引头探测器门限值 P_{th} 的比值,而结合高重复频率干扰的应用背景,高重复频率干扰研究往往更关注位于地面的高重复频率干扰激光器的平均功率为多少时,其发射的激光脉冲信号可被距离多远的激光导引头以多大的探测概率探测到。为研究这一问题,须分析高重复频率干扰激光在大气传输中的能量衰减。

3 高重复频率干扰激光在大气传输中能量衰减

3.1 P_1 与 P_s 关系

激光在大气中传播是有损耗的,它与大气透过

率、目标漫反射率、激光传输距离等有关。假设高重复频率干扰激光器的平均功率为 P_1 ,脉冲宽度为 τ ,脉冲发射频率为 f ,高重复频率干扰激光器发射的单个脉冲峰值功率为 P_t ,单个脉冲能量为 E_t ,则有

$$\begin{cases} E_t = P_t \cdot \tau \\ P_t = \frac{P_1}{\tau \cdot f} \end{cases} \quad (7)$$

高重复频率干扰激光器工作过程中,脉冲宽度 τ 为固定值,由于高重复频率干扰激光器的单个脉冲能量 E_t 有上限值,当脉冲发射频率 f 在较低范围内,单个脉冲能量 E_t 可被视为上限值,此时平均功率 P_1 随着脉冲发射频率 f 的增大而增大,从而确保单个脉冲能量保持不变且为上限值;当脉冲发射频率 f 增大到平均功率 P_1 等于额定值时,若继续增大脉冲发射频率 f ,平均功率 P_1 将保持不变,此时单个脉冲能量 E_t 将随着脉冲发射频率 f 的增大而减小。由于高重复频率有效干扰时,要求高重复频率干扰激光以较高的概率超前制导激光进入导引头波门内,这需要高重复频率干扰激光器以较高的脉冲发射频率发射干扰激光,所以高重复频率有效干扰时,高重复频率干扰激光器通常工作在平均功率保持在额定值的情况下。当高重复频率干扰激光器工作在平均功率 P_1 保持在额定值的情况下,单个脉冲峰值功率 P_t 与脉冲发射频率 f 的关系如图3所示。

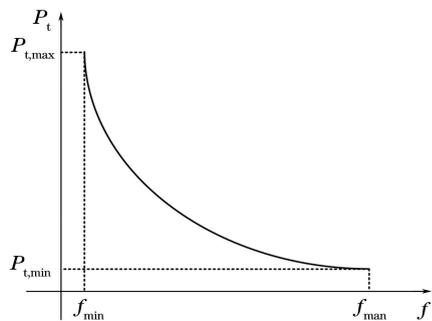


图3 P_t 与 f 的关系

Fig. 3 Relationship between P_t and f

图3给出了高重复频率干扰激光器工作在平均功率 P_1 不变的情况下,单个脉冲峰值功率 P_t 与脉冲发射频率 f 的关系。当高重复频率干扰激光器平均功率 P_1 保持在额定值时, f_{max} 表示脉冲发射频率的最大值; f_{min} 表示脉冲发射频率的最小值; $P_{t,max}$ 表示单个脉冲峰值功率 P_t 的最大值; $P_{t,min}$ 表示单个脉冲峰值功率 P_t 的最小值。即当 $f=f_{min}$ 时, $P_t=P_{t,max}$;当 $f=f_{max}$ 时, $P_t=P_{t,min}$ 。由图3

可知,当高重复频率干扰激光的单个脉冲能量 E_i 未达到上限值时,调节脉冲发射频率 f 会使单个脉冲峰值功率 P_i 发生变化,而高重复频率干扰激光器的平均功率 P_1 一直保持不变,因此,在研究不同高重复频率干扰激光器与导引头探测性能的关系时,应考虑的是不同高重复频率干扰激光器的平均功率 P_1 对导引头探测概率的影响;而在研究某个特定高重复频率干扰激光器与导引头探测性能的关系时,应考虑的是高重复频率干扰激光器脉冲发射频率对导引头探测性能的影响。

高重复频率干扰过程中,若高重复频率干扰激光器与导引头之间的作用距离为 R ,高重复频率干扰激光器发射的单个脉冲峰值功率 P_i 经大气传输至导引头入瞳处的脉冲峰值功率密度为 P_s ,则有

$$P_s = \frac{P_i T \cos \sigma_s}{2\pi R^2 \left[1 - \cos\left(\frac{\theta_d}{2}\right) \right]}, \quad (8)$$

式中: P_i 表示高重复频率干扰激光器发射的激光脉冲峰值功率,单位为 W ; P_s 表示导引头入瞳处的激光脉冲峰值功率密度,单位为 $\mu W/cm^2$; T 表示高重复频率干扰激光器至导引头之间的大气透射率; σ_s 表示高重复频率干扰激光器和导引头之间的连线与导引头光轴之间的夹角,单位为 rad ,当导引头处于跟踪阶段, σ_s 很小,可认为 $\cos \sigma_s \approx 1$; θ_d 表示高重复频率干扰激光器的束散角,单位为 rad 。为得到高重复频率干扰激光器的平均功率 P_1 与导引头入瞳处激光功率密度 P_s 及作用距离 R 之间的关系,现将(7)式代入(8)式,得

$$P_s = \frac{P_1 T \cos \sigma_s}{2\pi R^2 \left[1 - \cos\left(\frac{\theta_d}{2}\right) \right] \tau f}. \quad (9)$$

(9)式中, τ 、 f 取决于目标指示器的性能, σ_s 取决于导引头制导精度, θ_d 取决于高重复频率干扰激光器的性能。而高重复频率激光器与导引头之间的大气透射率 T 的计算方式将在 3.2 节中介绍。

3.2 大气透射率 T 分析

目标至激光导引头之间激光能量传播属于斜程传输,其计算公式为^[4]

$$T = \exp\left\{ \frac{K}{V_1 \sin \theta} [\exp(-0.835h_1) - 1] \right\}, \quad (10)$$

式中: K 表示区域常数,乡村取 2.828,城市取 3.132,海洋取 4.543,沙漠取 2.496; V_1 表示大气能见度,单位为 km ,取值与气象条件有关; θ 表示光路与水平面之间的夹角,单位为 rad ; h_1 表示激光能量的传输高度,单位为 km , $h_1 = R \cdot \sin \theta$ 。

4 基于探测概率研究高重复频率干扰激光器

4.1 理论分析

通过上述分析,可得到激光导引头探测概率 P_p 以及高重复频率干扰激光在大气传输中能量损耗的计算方法,为研究高重复频率干扰激光在不同作用距离处被激光导引头探测到的概率,需要建立高重复频率干扰激光参数、激光导引头参数、激光导引头作用距离与探测概率之间的关系。将(9)式代入(6)式,可得

$$\begin{cases} P_p = 0.5 + \int_0^{\left(\frac{P_s}{P_{th}} - 1\right)^{T_{NR}}} \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp(-y^2) dy \\ P_s = \frac{P_1 T \cos \sigma_s}{2\pi R^2 \left[1 - \cos\left(\frac{\theta_d}{2}\right) \right] \tau f} \end{cases}. \quad (11)$$

至此,建立了高重复频率干扰激光参数、激光导引头参数、激光导引头作用距离与探测概率之间的关系。但通常情况下,干扰方不能改变激光导引头的参数,因此在研究过程中,假定激光导引头的阈噪比 T_{NR} 和导引头探测器门限值 P_{th} 为定值,同时结合高重复频率激光干扰研究的应用背景,主要从以下三方面进行研究。

1) 在已知作用距离 R 与脉冲发射频率 f 的条件下,讨论高重复频率干扰激光器平均功率 P_1 与探测概率 P_p 之间的关系,该研究可用于当高重复频率干扰激光的频率达到有效干扰条件时,可根据探测概率计算出高重复频率干扰激光器的平均功率。

2) 在已知作用距离 R 与高重复频率干扰激光器平均功率 P_1 的条件下,讨论脉冲发射频率 f 与探测概率 P_p 之间的关系,该研究结合高重复频率干扰超前概率,可用于分析高重复频率有效干扰条件下的脉冲发射频率 f 的工作范围,即根据探测概率 P_p 确定脉冲发射频率 f 的最大值,而根据高重复频率干扰超前概率确定脉冲发射频率 f 的最小值,可计算出同时满足高探测概率和高超前概率的高重复频率干扰激光的脉冲发射频率 f 的工作范围。

3) 在已知高重复频率干扰激光器平均功率 P_1 与脉冲发射频率 f 的条件下,讨论探测概率 P_p 与作用距离 R 之间的关系,可用于确定高重复频率干扰激光器的开机时机,即根据合适探测概率 P_p 所

对应的作用距离确定高重复频率干扰激光器的开机时机。

4.2 仿真分析

4.2.1 已知 R 和 f 时, P_p 与 P_1 关系

通过上述分析,建立了高重复频率干扰激光参数、激光导引头参数、激光导引头作用距离与探测概率之间的关系[(11)式]。(11)式中激光斜程传输大气透射率 T 可通过(10)式进行求解,通常作用距离 R 为数千米,而高重复频率干扰激光器的脉冲发射频率 f 的工作范围通常为数百 kHz 至数 MHz,现假设(10)式、(11)式中参数如下: $K = 3.132$, $V_t = 10$ km, $\sigma_s = 0$ rad, $\tau = 15$ ns, $\theta = 50^\circ$, $\theta_d = 0.01$ rad, $T_{NR} = 3.5$, $P_{th} = 0.35 \mu\text{W}/\text{cm}^2$, $R = 15$ km, 脉冲发射频率 f 分别取 400, 800, 1200 kHz 时,通过 MATLAB 软件仿真 P_p 与 P_1 关系,结果如图 4 所示。

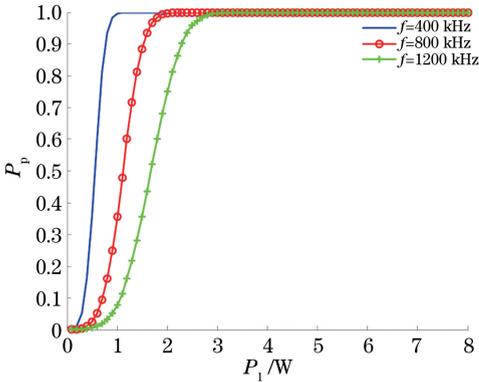


图 4 P_p 与 P_1 的关系

Fig. 4 Relationship between P_p and P_1

图 4 给出了当对(10)式、(11)式中的参数作如上假定时,导引头探测概率 P_p 与高重复频率干扰激光器平均功率 P_1 之间的关系。从图 4 可以看出,当作用距离 R_2 、脉冲发射频率 f 固定时,导引头探测概率 P_p 随着高重复频率干扰激光器平均功率 P_1 的增大而增大。根据仿真结果可知,在作用距离 $R = 15$ km、探测概率 $P_p = 99.92\%$ 的情况下,若 $f = 400$ kHz,则 $P_1 = 1.06$ W;若 $f = 800$ kHz,则 $P_1 = 2.12$ W;若 $f = 1200$ kHz,则 $P_1 = 3.18$ W,该分析可用于高重复频率干扰激光器平均功率 P_1 的设计。在实际高重复频率干扰激光器平均功率 P_1 的设计中,平均功率 P_1 由脉冲发射频率 f 的最大值确定,若要求脉冲发射频率 f 可调范围为 $400 \text{ kHz} \leq f \leq 800 \text{ kHz}$,则高重复频率干扰激光器的平均功率 $P_1 \approx 2.12$ W;若要求脉冲发射频率 f 可调范围为 $400 \text{ kHz} \leq f \leq 1200 \text{ kHz}$,则高重复频率

干扰激光器的平均功率 $P_1 \approx 3.18$ W,而考虑设计中的其他功率损耗,所设计的高重复频率干扰激光器平均功率应稍大于理论计算值。因此,根据高重复频率干扰超前概率的要求设计高重复频率干扰激光器脉冲发射频率的工作范围,进而根据脉冲发射频率的最大值以及最大作用距离设计高重复频率干扰激光器的平均功率。

4.2.2 已知 R 和 P_1 时, P_p 与 f 关系

(11)式中的激光斜程传输大气透射率 T 可通过(10)式进行求解,现假设(10)式、(11)式的参数取值如下: $K = 3.132$, $V_t = 10$ km, $\sigma_s = 0$ rad, $\tau = 15$ ns, $\theta = 50^\circ$, $\theta_d = 0.01$ rad, $T_{NR} = 3.5$, $P_{th} = 0.35 \mu\text{W}/\text{cm}^2$, $R = 15$ km, $P_1 = 3$ W,通过 MATLAB 软件仿真 P_p 与 f 关系,结果如图 5 所示。

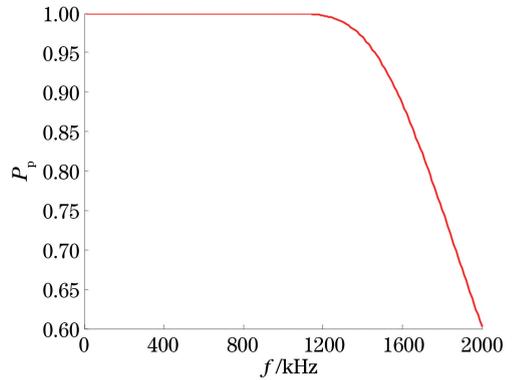


图 5 P_p 与 f 的关系

Fig. 5 Relationship between P_p and f

图 5 给出了当对(10)式、(11)式中的参数作如上假定,探测概率 P_p 与脉冲发射频率 f 之间的关系。由图 5 可知:随着脉冲发射频率 f 的增大,探测概率 P_p 逐渐减小,且开始时减小十分缓慢;根据 MATLAB 软件的仿真结果可知,当探测概率 $P_p = 99.92\%$ 时,脉冲发射频率 $f = 1130$ kHz,即高重复频率干扰激光若要在 15 km 处被导引头精准探测到,则脉冲发射频率 f 应满足 $f \leq 1130$ kHz,此时若已知激光导引头波门宽度 τ_w ,为确保高重复频率干扰超前概率取较大值,则脉冲发射频率 f 应满足 $f \geq \frac{4}{\tau_w}$,至此得出平均功率为 3 W 的高重复频率干扰激光器发射的干扰激光若要在 15 km 处同时满足超前概率和探测概率的要求,则脉冲发射频率 f 应满足 $\frac{4}{\tau_w} \leq f \leq 1130$ kHz;通常情况下,高重复频率干扰激光器的脉冲发射频率 f 的可调范围很大,但在实际干扰过程中,可根据上述分析确定不同高重

复频率干扰情况下的脉冲发射频率 f 的工作范围。

4.2.3 已知 f 、 P_1 时, P_p 与 R 关系

(11)式中的激光斜程传输大气透射率 T 可通过(10)式进行求解。现假设(10)式、(11)式中参数取值如下: $K = 3.132$, $V_l = 10$ km, $\sigma_s = 0$ rad, $\tau = 15$ ns, $\theta = 50^\circ$, $\theta_d = 0.01$ rad, $T_{NR} = 3.5$, $P_{th} = 0.35$ $\mu\text{W}/\text{cm}^2$, $P_1 = 1$ W, 脉冲发射频率 f 分别取 400, 800, 1200 kHz, 通过 MATLAB 软件仿真 P_p 与 R 关系, 结果如图 6 所示。

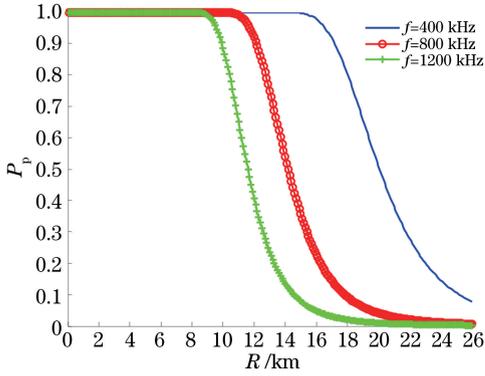


图 6 已知 f 、 P_1 时, P_p 与 R 的关系

Fig. 6 Relationship between P_p and R when f and P_1 are known

图 6 给出了当对(10)式、(11)式中的参数作如上假定, 导引头探测概率 P_p 与作用距离 R 的关系。由图 6 可知, 当高重复频率干扰激光器的平均功率 P_1 、脉冲发射频率 f 一定时, 导引头探测概率 P_p 随作用距离 R 的增大而逐渐减小。开始时, 随着 R 的增大, P_p 减小较慢, 当探测概率 $P_p \geq 99.92\%$ 时, 认为高重复频率干扰激光可被导引头探测到。根据仿真结果可知: 当高重复频率干扰激光器平均功率 $P_1 = 1$ W、探测概率 $P_p = 99.92\%$ 时, 若脉冲发射频率 $f = 400$ kHz, 则作用距离 $R = 14.5$ km; 而脉冲发射频率 $f = 1200$ kHz, 则作用距离 $R = 8.4$ km。根据这一理论分析可知, 当高重复频率干扰激光器的平均功率和脉冲发射频率确定时, 根据合适的探测概率 P_p 取值, 可确定高重复频率干扰激光器的开机时机。随后导引头探测概率 P_p 随着作用距离 R 增大而减小较快, 该段可用于当武器系统要求高重复频率干扰激光器在较远作用距离处进行干扰时, 分析高重复频率干扰激光被激光导引头探测到的概率。而当探测概率 P_p 减小至 $P_p \leq 50\%$ 时, 研究高重复频率激光对导引头有效干扰的工程意义很小, 此处不再讨论。

5 结 论

研究了激光导引头的虚警概率、探测概率, 高重复频率干扰激光在大气传输中能量衰减以及基于探测概率研究高重复频率干扰激光器的激光导引头探测概率 P_p 与高重复频率干扰激光器参数、激光导引头参数以及作用距离 R 之间的关系。当阈噪比 $T_{NR} = 3.5$ 时, 虚警概率 $P_f = 0.02\%$, 因此, 可根据等效的噪声干扰功率密度标准差 σ_{p_n} 设计导引头探测器门限值 P_{th} , 从而使导引头的虚警概率较低; 基于虚警概率 $P_f = 0.02\%$, 研究探测概率得出当 $m = \frac{P_s}{P_{th}} = 1.9$ 时, 探测概率 $P_p = 99.92\%$, 此时认为被检测信号可被导引头以较高的探测概率探测到。但工程应用中往往需要研究的是位于地面的高重复频率干扰激光器发射的激光脉冲对激光导引头的干扰效果。因此, 基于探测概率进一步研究了高重复频率干扰激光器, 得出了探测概率与高重复频率干扰激光器参数、激光导引头参数以及作用距离之间的关系, 并结合高重复频率干扰的应用背景进行了仿真分析。对虚警概率和探测概率的研究有助于设计出虚警概率低、探测概率大的激光导引头; 基于探测概率研究高重复频率干扰激光器有助于根据高重复频率有效干扰所需的脉冲发射频率和最大有效作用距离设计高重复频率干扰激光器的平均功率, 也有助于在指定高重复频率干扰激光器的条件下, 根据不同作用距离的探测概率确定高重复频率干扰激光器的最佳开机时机。这些研究对于激光导引头、高重复频率干扰激光器的设计与应用均有较大的参考价值。

参 考 文 献

- [1] Dai Y J. The principle of lidar[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002.
戴永江. 激光雷达原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.
- [2] Zhang Y, Yang H Q, Zhang M G. The practicality calculation method of laser transmitting loss in atmosphere[J]. Optical Communication Technology, 2007, 31(3): 62-64.
张瑜, 杨豪强, 张明高. 激光在大气中的传输损耗实用计算方法[J]. 光通信技术, 2007, 31(3): 62-64.
- [3] Yang R K, Ma C L, Han X E, et al. Study of the attenuation characteristics of laser propagation in the atmosphere [J]. Infrared and Laser Engineering, 2007, 36(s2): 415-418.

- 杨瑞科, 马春林, 韩香娥, 等. 激光在大气中传输衰减特性研究[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(s2): 415-418.
- [4] Jia J Z, Song D A, Jia R Y, *et al.* Attenuation estimation of laser atmospheric transmission [J]. *Electronic Warfare Technology*, 2010, 25(4): 73-76, 81.
贾建周, 宋德安, 贾仁耀, 等. 激光大气传输衰减的估算方法[J]. 电子信息对抗技术, 2010, 25(4): 73-76, 81.
- [5] Smith F G. Atmospheric propagation of radiation [M]. USA: The Infrared & Electro-Optical Systems Handbook, 1993, 2: 26-96.
- [6] Wang Y P, Zhang H Y, Zheng X Y, *et al.* Analysis of interference mechanism of high-frequency laser to laser guided weapons [J]. *Laser Technology*, 2014, 38(1): 21-25.
王云萍, 张海洋, 郑星元, 等. 高重频激光对激光制导武器的干扰机理分析[J]. 激光技术, 2014, 38(1): 21-25.
- [7] Wang X F, Zhao H, Zhu C, *et al.* Output characteristics of high-repetition-rate narrow-pulse-width pulsed fiber laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, 36(7): 1870-1875.
王雄飞, 赵鸿, 朱辰, 等. 高重频窄脉宽光纤激光器的输出特性实验研究[J]. 中国激光, 2009, 36(7): 1870-1875.
- [8] Zhang Y L, Wang Y M, Huang A P. Influence of suspended particles based on Mie theory on underwater laser transmission [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(5): 0505002.
- 张莹璐, 王英民, 黄爱萍. 米氏理论下悬浮粒子对水下激光传输的影响 [J]. 中国激光, 2018, 45(5): 0505002.
- [9] Li H, Liang W W, Yin R G, *et al.* Effect of disturbance and noise on laser guidance performance and precision [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(2): 73-80.
李慧, 梁巍巍, 殷瑞光, 等. 干扰和噪声对激光制导性能及精度的影响[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(2): 73-80.
- [10] Huang K, Li S, Ma Y, *et al.* Detection probability model of single-photon laser altimetry and its range accuracy [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(11): 1110001.
黄科, 李松, 马跃, 等. 单光子模式激光测高探测概率模型与精度分析[J]. 中国激光, 2016, 43(11): 1110001.
- [11] Yan F J, Yang C, Chen M, *et al.* High repetition, high peak power and narrow line-width laser amplifier [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(2): 91-95.
颜凡江, 杨策, 陈檬, 等. 高重频高峰值功率窄线宽激光放大器[J]. 红外与激光工程, 2019, 48(2): 91-95.
- [12] Xu F, Wan M, Yan H, *et al.* High efficient narrow-band grating spectral filtering technology applied to laser echo detection [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(10): 1005002.
许放, 万敏, 颜宏, 等. 应用于激光回光探测的高效窄带光栅光谱滤波技术[J]. 中国激光, 2018, 45(10): 1005002.