

· 激光技术 ·

激光栅栏探测技术

李曼, 许宏

(光电信息控制和安全技术重点实验室, 河北 三河 065201)

摘要: 针对隐身飞机的隐身特性, 提出一种采用分布式激光主动扫描照射和回波接收方式进行警戒探测的激光栅栏技术, 作为目标探测的新型探测手段。给出了激光栅栏技术的原理和发射接收分机的组成, 针对国外典型隐身飞机的部分飞行参数, 进行了激光栅栏参数的初步设计, 拟采用 17.3 km 为间隔设置激光发射接收装置, 激光光束扫描角度为 60°; 采用重复频率 20 kHz, 脉冲宽度 10 ns, 单脉冲能量 3.2 mJ, 平均功率 64 W 的 YAG 激光器作为发射机; 采用雪崩光电探测器进行接收。通过计算, 可以实现对 15 km 飞行高度, 1.5 Ma 飞行速度的隐身飞机的探测需求。

关键词: 隐身飞机; 红外隐身; 激光栅栏

中图分类号: TN249

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2015)-03-0011-03

Laser Fence Detection Technology

LI Man, XU Hong

(Key Laboratory of Electro-optical Information Control and Security Technology, Sanhe 065201, China)

Abstract: According to the stealth characteristics of stealth aircraft, a laser fence technology, as a new target detection method, using distributed laser active scanning and laser echo receiving to perform warning detection is proposed. The principles of laser fence technology and the composition of transmitting and receiving sub-system are introduced. According to flight parameters of typical stealth aircraft in foreign countries, 17.3 km interval is used to design laser transmitting and receiving devices to design the parameters of the transmitting sub-system in the laser, such as laser optical beam scanning angle, repetition rate, pulse width, 3.2 mJ single pulse energy and average power. The calculation results show that the method can meet the detection demand of a stealth aircraft with 15 km flight altitude and 1.5 Ma flight speed.

Key words: stealth aircraft; Infrared (IR) stealth; laser fence

飞机的隐身技术是减小飞机的各种被探测特征, 使对方探测设备难以发现或使其探测能力降低的综合技术。隐身飞机在近几次局部战争中得到了成功的运用, 以其小雷达反射截面(RCS)和弱光电特征的优势, 成为 21 世纪空中突防和攻击的重要手段, 从而使得对隐身飞机进行有效探测成为各国研究的热点。

当代隐身飞机应用较广泛的隐身技术, 主要由雷达隐身和红外隐身两个方面组成^[1-2]。雷达隐身技

术, 以降低目标的雷达反射截面(RCS)为主要宗旨^[3-4], 对飞机外形进行优化设计, 在保持一定性能的前提下, 使其被探测的雷达截面积最小; 或者采用能吸收或透过雷达波的涂料或复合材料, 使雷达波有来无回、多来少回, 达不到探测的目的。红外隐身技术是通过抑制目标的红外辐射, 或改变目标的热形状, 从而达到目标与背景的红外辐射不可区分的一项技术。目前隐身飞机上主要采用的红外隐身技术有^[5-7]: 改进发动机喷管的设计, 采用兼顾低辐射与动力要求

的外形,抑制飞机尾焰红外辐射程度;采用散热量小的涡轮风扇发动机;采用隔热隔温材料对发动机进行隔热,防止发动机热量传给机身;利用气溶胶屏蔽发动机尾焰的红外辐射,可有效遮挡或屏蔽红外辐射,同时也可干扰雷达、激光和可见光探测器。

这些红外隐身技术,都是从飞机自身的角度出发,降低飞机机身或其尾焰的红外辐射能量,或改变其红外辐射的波长,使其不能通过大气窗口,被探测器接收。当前隐身飞机的机身材料,并未大规模采用红外吸收材料,当激光主动照射到目标飞机表面时,不像对雷达波一样对红外波产生明显的吸收效果,可以根据隐身飞机的这个特点,采取基于激光主动扫描的激光栅栏系统,实现隐身飞机的探测。

1 激光栅栏技术原理

激光栅栏由若干激光发射接收分机组成,使其成阵列排布,各发射接收分机独立工作,到达一定高度的高空后各发射接收分机的控制区域才彼此重叠,各分机发射的扫描激光光束,像栅栏一样在空域形成一个交叉的网格,故因此而得名。发射接收分机由发射机和接收机组成,采用激光主动扫描的方式,当激光照射到目标,对其反射回波进行接收探测。激光栅栏技术原理和组成示意图如图1所示。在地面沿垂直于目标飞机飞行方向(或飞机飞行方向有垂直于激光栅栏分布方向的分量),以一定距离间隔布设激光发射接收分机,分机内装载发射激光头、接收单元探测器等,激光头发射一定功率的脉冲信号,并在一定角度内进行一维重复扫描,每一个激光发射接收分机只负责一定空域,当有隐身飞机飞过,激光照射到目标飞机产生的回波信号由地面的单元探测器接收,进而分析目标飞机的位置信息。整个系统的发射、接收、探测采用综合处理电路经行时序控制。

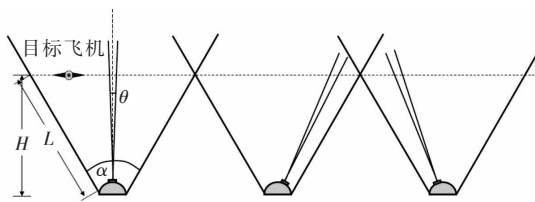


图1 激光栅栏技术原理和组成示意图

2 激光栅栏参数设计

国外典型隐身飞机的部分飞行参数如表1所示^[7-8]。参考典型隐身飞机的巡航高度,确定激光栅栏的关注高度 H 为 15 km。考虑到装备成本和当前激光器能够达到的水平,设计激光栅栏的扫描视场角度 $\alpha = 60^\circ$ (法线两侧各 30° , 如图1), 则可以每 17.3 km 为间隔放置一个激光发射接收分机。

表1 典型隐身飞机部分飞行参数

	机身长度 l/m	巡航速度 M/Ma	巡航高度 H/km
B-2“幽灵”	21.03	0.8	15
F-117“夜鹰”	20.3	0.9	10
F-22“猛禽”	18.92	1.5	>15
F-35“闪电 II”	15.47	>1(具体未知)	未知

2.1 激光器重复频率的确定

设激光发散角为 θ , 垂直高度 $H = 15 \text{ km}$ 时, 在激光栅栏的扫描角度中需要的光斑数量 N 的数值可以用下式来判别是否可以探测目标。

$$N = \frac{\alpha}{\theta} \quad (1)$$

当 θ 很小, 垂直高度 $H = 15 \text{ km}$ 高空光斑直径小于飞机长度 l , 即 $H \cdot \theta \leq l$ 时, 则有激光栅栏的分机扫描周期 $T \leq \frac{l}{340 M}$ 。假设飞机长度 l 为 20 m, 则此时 $\theta \leq 1.33 \text{ mrad}$, $N \geq 2565$, $T \leq 40 \text{ ms}$, 即在 40 ms 时间内, 分机需完成 2565×2 次激光脉冲序列的发射和接收, 导致激光器脉冲重复频率过大。遂考虑发射机采用较大发散角的激光光束, 则分机扫描周期 T 由 H 高度上光斑直径的最小值确定。

光斑在飞机飞行方向的直径的最小值 $d_{\min} = H \cdot \theta$ (当 $d_{\min} > l$ 时), 激光栅栏分机扫描周期 T 由下式确定。

$$T = \frac{d_{\min}}{340 M} [\text{s}] \quad (2)$$

则由式(1)、式(2)可以得出, 发射一组激光脉冲序列并对其回波进行探测所需要的时间间隔最大为

$$\tau = \frac{T}{2N} [\text{s}] \quad (3)$$

经换算得到 τ 与 θ (mrad)、 α (°) 的关系式为

$$\tau = 0.258 \cdot \frac{\theta^2}{\alpha} [\text{ms}] \quad (4)$$

取 $\theta = 10 \text{ mrad}$; $\tau = 0.43 \text{ ms}$ 。

激光束往返目标和探测器的时间为 0.12 ms 左右,另外考虑读出电路处理时间,剩余的脉冲发生时间大约为 0.25 ms ,若脉冲序列包含 5 个脉冲,则得到脉冲间隔 $\Delta\tau = 0.05 \text{ ms}$,激光器重复频率 $f = 1/\Delta\tau = 20 \text{ kHz}$ 。

2.2 接收探测器的最小可探测光功率

接收装置采用高灵敏度雪崩单元光探测器,以 silicon sensor 公司的雪崩管 AD500-10 为例,在 1064 nm 处,响应度为 36 A/W ,噪声等效功率为 50 pW 。若要实现 $\text{SNR}=8$,则接收系统的最小可探测峰值功率 $P_i = 400 \text{ pW}$ 。

2.3 激光器输出功率的确定

假设发射光束具有均匀的强度分布,在输出峰值功率为 P_i ,发散角为 θ ,距离为 L 时,其功率密度为

$$I = P_i / (\theta^2 L^2) \quad [\text{W/m}^2] \quad (5)$$

则照射到目标位置的功率密度 I_s 为式(5)乘以大气透过率 T_a ,如下式

$$I_s = I \times T_a = P_i T_a / (\theta^2 L^2) \quad [\text{W/m}^2] \quad (6)$$

目标的反射功率 P_r 为

$$P_r = I_s S \rho \quad [\text{W}] \quad (7)$$

式中, ρ 为目标平均反射率; S 为飞机投影面积。

设接收端镜头入瞳面积为 A ,透过率为 T_o ,则探测器的入射光功率 P_i 为

$$P_i = P_r \frac{A}{\pi L^2} T_o T_a \quad [\text{W}] \quad (8)$$

由式(5)~式(8)可得,激光器发射光功率和探测器接收光功率的关系^[9]如下

$$\frac{P_i}{P_r} = \frac{AS\rho T_a^2 T_o}{\pi\theta^2 L^4} \quad (9)$$

考虑到成熟度和装备成本,发射机采用高重复频率、高功率且价格低廉的 YAG 激光器。根据 LOWTRAN7 计算,在 $0\sim 30^\circ$ 视线 $H=15 \text{ km}$ 高空, 1064 nm 光束的大气透过率不低于 $T_a=0.8$ 。其他各变量典型值为: $L=17.3 \text{ km}$ ($H=15 \text{ km}$ 时目

标飞机与发射机的最远距离), $S=80 \text{ m}^2$ (参考 F22 机翼面积), $\rho=0.1$, $T_o=0.9$, $\theta=10 \text{ mrad}$,入瞳直径 $D=0.1 \text{ m}$, $P_i=400 \text{ pW}$,由式(9)计算得,激光器发射的峰值功率 $P_i \approx 320 \text{ kW}$,方可实现探测。

若脉冲宽度 $\Delta t=10 \text{ ns}$,可得单脉冲能量 $E=P_i \cdot \Delta t=3.2 \text{ mJ}$,又有 $f=20 \text{ kHz}$,可得激光器平均功率 $P=E \cdot f=64 \text{ W}$ 。

3 结 论

分析了现有隐身飞机主要隐身措施,提出了采用激光器阵列排布,进行激光主动照射和回波接收的激光栅栏技术,进行隐身飞机探测的新方案。方案以 17.3 km 为间隔设置激光发射接收装置,激光光束扫描角度为 60° ,构成激光栅栏。发射接收装置采用重复频率 20 kHz ,脉冲宽度 10 ns ,单脉冲能量 3.2 mJ ,平均功率 64 W 的 YAG 激光器作为发射机,采用雪崩光电探测器经行接收机。通过计算,可以实现对 15 km 飞行高度, 1.5 Ma 飞行速度的隐身飞机的探测需求。

参考文献

- [1] 钟华. 隐身技术[M]. 北京:国防工业出版社,1997.
- [2] 朱长征. 飞机的隐身技术现状及发展趋势[J]. 航天电子对抗,2001(6):42-45.
- [3] 李国强,武文军,辛欣. 当代隐身技术的现状和发展[J]. 国防科技,2005(4):22-25.
- [4] 朱爱先,严国顺. 现代空战兵器[M]. 北京:星球地图出版社,2009:34-37.
- [5] 李海燕,何友金,吕原,等. 红外隐身飞机技术研究[J]. 现代防御技术,2008,36(5):7-9.
- [6] 施德恒,熊水英. 现代作战飞机的红外隐身技术述评[J]. 航天电子对抗,2000(3):59-62.
- [7] 西风. 隐形战机:F22与F35[M]. 北京:中国市场出版社,2013.
- [8] 瀚鼎文化. 彩绘军事图鉴:百年战机经典[M]. 北京:人民邮电出版社,2012.
- [9] 安毓英,曾晓东. 光电探测原理[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2004.