

文章编号:1001-5078(2011)12-1302-04

· 激光应用技术 ·

白天激光照明探测跟踪空间目标可行性分析

康文运, 宋小全

(北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100094)

摘要:针对白天探测跟踪空间目标技术难题,从照明激光选取入手,设计了激光照明探测跟踪系统,估算了白天天空背景噪声、空间目标激光回波信号及目标与背景对比度,分析了白天激光照明探测跟踪空间目标的技术可行性,概括了实现白天激光照明探测跟踪空间目标的基本技术要求和需突破的关键技术。

关键词:激光照明;探测跟踪;空间目标

中图分类号:TN249 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2011.12.002

Feasibility analysis on detecting and tracking space target by laser illumination technology at the daytime

KANG Wen-yun, SONG Xiao-quan

(Beijing Institute of Tracking and Telecommunications Technology, Beijing 100094, China)

Abstract: In allusion to the difficult problem of detecting and tracking space target at the daytime, a type of laser illumination system for detecting and tracking space target is designed. Noise of sky background at the daytime, laser echo signal of space target and contrast of target and background are estimated, technology feasibility of detecting and tracking space target by laser illumination is analyzed. The basic technique request and key technology of detecting and tracking space target by laser illumination are generalized.

Key words: laser illumination; detection and tracking; space target

1 引言

白天对空间目标进行高精度跟踪测量是目前空间目标探测与识别领域的一项重要课题,在空间碰撞预警、空间目标精确定轨和天文观察等方面具有深远的应用前景。由于白天天空背景较亮,背景噪声较强,采用传统光电探测方法跟踪空间目标十分困难,因此,探索一种在白天能够对空间目标实现高精跟踪的技术手段十分必要。

激光技术特征明显,在对空间目标进行高精度跟踪测量时,便于采用光谱滤波、时间滤波等技术措施,是解决白天对空间目标高精度跟踪技术难题的一种有效方法。

本文针对白天天空背景光谱辐射亮度分布情况,选择了一种照明激光,分析了白天激光照明探测

跟踪空间目标的技术可行性,给出了具有参考意义的结论。

2 照明激光选取

天空背景在 $3\text{ }\mu\text{m}$ 以下主要为散射的太阳光, $3\text{ }\mu\text{m}$ 以上主要为大气热辐射,白天和夜晚天空背景辐射的差别不是很大。白天天空背景在中波($3\sim 5\text{ }\mu\text{m}$)和长波($8\sim 12\text{ }\mu\text{m}$)波段辐射亮度较低,在 $3\sim 4\text{ }\mu\text{m}$ 波段最低^[1]。

由于白天天空背景在中波($3\sim 5\text{ }\mu\text{m}$)和长波($8\sim 12\text{ }\mu\text{m}$)波段辐射亮度较低,因此,照明激光应选择波长在中波和长波波段内的激光信号。但在中

作者简介:康文运(1965-),男,硕士,高级工程师,主要从事光电对抗试验总体技术研究。E-mail: cts_kangwenyun@sina.com

收稿日期:2011-10-08

波波段内目前还没有成熟的高功率激光器,而长波波段内的 CO_2 激光技术成熟,能够研制出高功率 CO_2 激光器,另外,国外的一些经验也表明, CO_2 激光为一种实用的照明激光源。因此,照明激光可选用 CO_2 激光信号。

CO_2 激光共有 4 支谱线,分别对应中心波长 $10.6\ \mu\text{m}$, $10.3\ \mu\text{m}$, $9.6\ \mu\text{m}$, $9.3\ \mu\text{m}$,其谱线宽度约 $0.1\ \mu\text{m}$,恰好位于 $8\sim 12\ \mu\text{m}$ 的大气窗口内,大气透过率较高,适合在大气中进行远距离传输,是长波红外激光照明的理想光源。

在 CO_2 激光这 4 支谱线中,就目前的长波红外探测器而言, $9.3\ \mu\text{m}$ 波长激光的量子效率最高,因

此,选波长为 $9.3\ \mu\text{m}$ 谱线的 CO_2 激光作为照明光源较合适。

3 探测跟踪系统组成及工作原理

3.1 系统组成

探测跟踪系统主要包括:跟踪转台、 CO_2 激光器、分光镜、红外单元探测器、激光发射系统、激光回波接收系统、数据综合处理系统。其中,激光发射系统包括库德光路、激光发射望远镜;激光回波接收系统包括红外焦平面探测器、窄带滤光片和接收光学望远镜;数据综合处理系统包括空间目标轨道预报数据接收处理模块,时间间隔测量模块,距离选通门控设置模块。系统组成如图 1 所示。

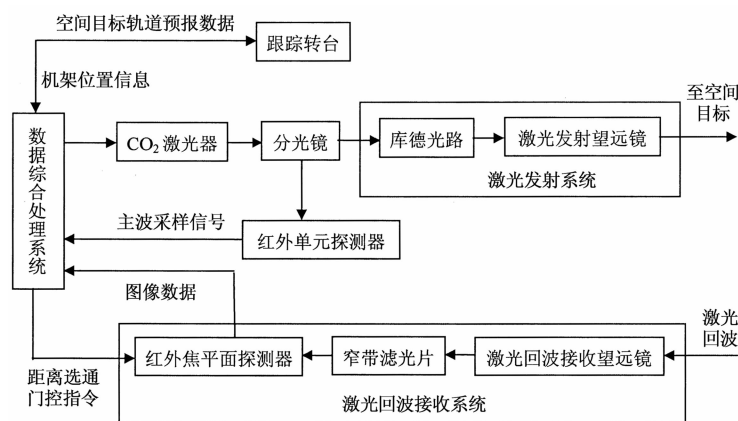


图 1 激光照明探测跟踪空间目标系统组成框图

Fig. 1 constitution diagram of laser illumination system for detecting and tracking space target

激光发射系统、激光回波接收系统加装在跟踪转台上, CO_2 激光器、分光镜、红外单元探测器放置在跟踪转台下, CO_2 激光经库德光路导入到放置在跟踪转台上的激光发射望远镜。

3.2 工作原理

首先依据空间目标轨道预报误差值估算距离选通门控宽度,形成距离选通门控指令,以便控制红外焦平面探测器仅在激光回波到达时间段采样积分。其次,根据空间目标轨道双行根数数据、激光探测跟踪系统站址坐标数据、目标轨道预报时间段数据转化为探测跟踪系统垂线测量坐标系下的数据,该数据包括:目标相对测站的俯仰角、方位角、距离和绝对时。

在白天利用激光照明探测跟踪空间目标时,跟踪转台依据垂线测量坐标系下的空间目标轨道预报数据随动跟踪空间目标,同时启动 CO_2 激光器和激光发射望远镜向空间目标过境区域发射 CO_2 激光,必要时可采用扫描的方式照射探测目标,捕获到回

波信号后对目标进行高精跟踪测量。

4 探测跟踪可行性分析

4.1 背景噪声估算

在白天探测空间目标,天空背景噪声是影响目标提取的主要因素,因此,首先需估算天空背景噪声大小。在 $9.3\ \mu\text{m}$ 处天空背景辐射以大气辐射为主,太阳的散射光所占比重较小。根据天空光谱辐射亮度分布特点^[2], $9.3\ \mu\text{m}$ 处天空背景光谱辐射亮度可取为 $1.0 \times 10^{-3}\ \text{W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m})$ 。

探测器每个像元接收到的天空背景辐射功率由下式估算^[3]:

$$P_{pb} = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{1}{F^2} \cdot (a \times b) \cdot \Delta\lambda \cdot \tau_r \cdot L_\lambda \quad (1)$$

式中, P_{pb} 为入射到探测器表面上的背景辐射功率,单位为 W ; τ_r 为光学接收系统的透过率,取 0.6 (含滤光片中心波长的透过率); $\Delta\lambda$ 为光谱滤光片带宽,取 $0.1\ \mu\text{m}$; $a \times b$ 为探测器单元的尺寸,取 $30\ \mu\text{m} \times 30\ \mu\text{m}$; F 为光学接收系统的 F /数,取 4; L_λ 为天空背景光谱辐射亮度,取 $1 \times 10^{-3}\ \text{W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m})$ 。

μm)。

利用公式(1)计算得到每个像元接收到的天空背景辐射功率为 $2.65 \times 10^{-11} \text{ W}$ 。

9.3 μm 波长 1 W 辐射功率的每秒光子数为 4.6821×10^{19} 光子/s。每个像元背景辐射的每秒光子数当量为 1.24×10^9 光子/s。

4.2 目标激光回波信号估算

对空间非合作目标(不带激光角反射器),目标激光回波光子数一般由下式估算^[4]:

$$N_s = \frac{4 \cdot E \cdot S \cdot A_s \cdot A_r \cdot T^2 \cdot K_r \cdot K_t \cdot \rho \cdot \alpha}{\pi^2 \cdot \theta_i^2 \cdot R^4} \quad (2)$$

式中, E 为发射的激光脉冲能量,取 15 J; S 为 9.3 μm 激光每焦耳能量的当量光子数为 4.6821×10^{19} 光子/J; A_s 为目标激光反射截面面积,取 6 m^2 ; A_r 为接收望远镜的口径取 $\phi 0.9 \text{ m}$,接收面积 0.63585 m^2 ; K_t 为发射系统光学效率,取 0.8; K_r 为接收光学系统的效率(含滤光片中心波长的透过率),取 0.5; T^2 为大气双程透过率(仰角 30° 以上),取 0.5; α 为衰减因子(由于大气湍流引起远场激光能量衰减等),取 0.3(5 dB); R 为目标的距离,取 600 km; θ_i 为发射激光束的发散角,取 0.1 mrad; ρ 为目标激光漫反射率,取 0.2。

利用公式(2)计算得到的单脉冲激光回波光子数为 1.01×10^4 。

本系统中艾利斑的直径约为:

$d = 2.44 \lambda \cdot (F \text{ 数}) = 2.44 \times 9.3 \times 4 = 90.77 \mu\text{m}$, 一个像元尺寸 $30 \mu\text{m} \times 30 \mu\text{m}$, 考虑到系统的几何像差以及大气湍流等因素的影响,激光回波光斑在探测器上的大小按占 4×4 个像元计算,则每个像元接收到的单脉冲激光回波光子数 N_{ps} 约为 6.3×10^2 。

4.3 目标与背景对比度估算

为了避开激光的大气后向散射信号,抑制白天天空背景噪声的影响,可采用距离选通技术^[5],使探测器仅在激光回波信号到达时段积分采样。为了确保能够对激光回波信号进行积分采样,距离门控宽度应不小于 $12 \sigma/c$, 其中, σ 为空间目标轨道预报误差, c 为光速。对于轨道高度 300 km 以上的空间目标,其轨道预报径向误差一般为 30 m (1σ),因此,距离门宽度可取 $1.5 \mu\text{s}$ 。

在红外探测器每帧的 $1.5 \mu\text{s}$ 积分时间内,每个像元接收到的背景噪声信号强度为:

$N_{pb} = 1.24 \times 10^9 \times 1.5 \times 10^{-6} = 1.86 \times 10^3$ (光子)

目标与背景的对比度约为:

$$C = \frac{N_{ps}}{N_{pb}} = \frac{6.3 \times 10^2}{1.86 \times 10^3} \approx 0.34$$

4.4 目标提取可行性分析

由于白天的天空背景较强,天空背景信号就成为干扰目标信号提取的主要因素,目标提取的条件通常要求目标与背景对比度 C 为 0.1,根据实际情况也可取 0.04^[6]。由上述计算知:目标与背景的对比度约为 0.34,满足目标提取基本要求。

红外探测器的满井电子数约为 10^6 ,探测系统的量化位数一般为 14 bit,因此,填满一个灰度需要的光电子数约为 61。目前,红外探测器的量子效率可达 0.8^[7],其峰值量子效率位于 8.6 μm 处,9.3 μm 处的量子效率约为峰值量子效率的 0.7,在 9.3 μm 波长处的量子效率可取为 0.5。因此,目标信号约为 5 灰度级,天空背景信号约 15 个灰度级,目标信号是叠加在背景信号之上的,从目前红外探测工程实践情况看能提取目标信号。

5 结 论

通过上述分析可知:在空间目标轨道预报数据的引导下,采用激光照明的方法在白天探测跟踪空间目标(有效激光反射面积 1 m^2 ,距离 600 km)具有技术可行性,探测跟踪系统的主要技术要求如下:

(1) 照明激光

采用中心波长 9.3 μm CO_2 激光为照明激光,单脉冲能量 15 J,重频 50 Hz,脉宽小于 $0.5 \mu\text{s}$ 。

(2) 激光回波接收

回波接收望远镜口径 $\phi 0.9 \text{ m}$,采用长波红外焦平面探测器。

(3) 抑制背景措施

为了抑制白天天空背景噪声的影响,在激光回波接收光路中加装 0.1 μm 窄带滤光片,采用距离选通技术控制长波红外焦平面探测器仅在激光回波到达时间段对光信号积分。

尽管采用激光照明的方法在白天探测跟踪空间目标具有技术可行性,但要在工程上实现还需攻克多项技术难题,主要有高能脉冲 CO_2 激光技术、窄波门距离选通技术、 CO_2 激光发射与回波接收共光学孔径技术等。

参考文献:

- [1] Richard D Hudson. Infrared system engineering[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1997: 62 - 64. (in

- Chinese)
- R. D. 小哈得逊. 红外系统原理[M]. 北京:国防工业出版社,1975:62-64.
- [2] Xu Nanrong, Bian Nanhua. Infrared radiation and homing [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1997: 66-75. (in Chinese)
- 徐南荣, 卞南华. 红外辐射与制导[M]. 北京:国防工业出版社,1997:66-75.
- [3] Xing Qianglin, Huang Huiming, et al. Detect-ability analyzing of IR FPA tracking system[J]. Photon Transaction, 2004,33(7):893-896. (in Chinese)
- 邢强林, 黄惠明, 等. 红外成像探测系统作用距离分析方法研究[J]. 光子学报, 2004,33(7):893-896.
- [4] Yang Fuming, Chen Wanzhen, et al. Design and test result of satellite laser ranging at the daytimg[J]. China Science: A Part, 1998,28(11):1048-1056. (in Chinese)
- 杨福民, 陈婉珍, 等. 白天卫星激光测距系统的设计和实测结果[J]. 中国科学: A 辑, 1998,28(11):1048-1056.
- [5] Xu Xiaowen, Guo Jin, et al. An improved laser range gated imaging system[J]. Laser & Infrared, 2004,34(1):3-5. (in Chinese)
- 徐效文, 郭劲, 等. 一种改进的激光距离选通成像系统[J]. 激光与红外, 2004,34(1):3-5.
- [6] He Zhaocai, Hu Baoan, et al. Photoelectricity measure [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002: 272-283. (in Chinese)
- 何照才, 胡保安, 等. 光电测量[M]. 北京:国防工业出版社, 2002:272-283.
- [7] Chen Boliang. Development state of IRFPA imaging device [J]. Infrared and laser Engineering, 2005,34(1):2-7. (in Chinese)
- 陈伯良. 红外焦平面成像器件发展现状[J]. 红外与激光工程, 2005,34(1):2-7.