

文章编号: 0258-7025(2006)Supplement-0103-05

会聚光束扫描降低相干激光成像雷达滞后角的方法

王春晖, 顾宗山, 王 骥

(哈尔滨工业大学光电子技术研究所可调谐激光技术国家级重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要 根据振镜转角与光束转角的二倍角关系,推导出扫描指令函数为简谐波时振镜的滞后角瞬态运动方程。在平行光束扫描中,振镜转角与扫描视场角成间接线性关系,望远镜放大倍数越大,则扫描效率越低,振镜滞后角等于视场滞后角。数值计算表明,当平行光束作 340 Hz 简谐波扫描,且作用距离大于 1000 m 时,扫描空域内滞后角效应显著,像点外差效率小于阈值 20% 越来越多。在会聚光束扫描中,振镜摆角直接与扫描系统覆盖视场角近似成线性关系,其比例常数与振镜的相对位置有关,通过合理地设计振镜的相对位置,可以大大提高系统的扫描效率,数值计算表明:当会聚光束做 340 Hz 简谐波扫描以及作用距离为 3000 m 时,它的最大滞后角约为平行光束扫描的 1/19,大大降低了滞后角效应。

关键词 相干激光雷达; 检流计式振镜; 滞后角; 平行光束扫描; 会聚光束扫描

中图分类号 TN258.98 **文献标识码** A

Reducing Lag Angle of Coherent Laser Imagine Radar Using Converging Beam Scanning

WANG Chun-hui, GU Zong-shan, WANG Qi

(National Key Laboratory of Tunable Laser Technology, Harbin Institute of Technology,
Harbin, Heilongjiang 150001, China)

Abstract: In terms of the diploid relationship between scanners sway angle and light beam sway angle, the transient equation of lag angle is derived on the condition that scanning control function is simple harmonic wave. For parallel beam scanners, scanners sway angle is indirectly linear with the angle of scan field of view (FOV). The larger the telescope enlargement factor, the lower the scan efficiency. And the scanner lag angle is equal to the FOV lag angle. Numerical calculation indicates that when the parallel beam scans at 340 Hz of simple harmonic wave and the range of action is above 1000 m, the lag effect in spatial field is obvious and the heterodyne efficiency of image element is much below the threshold 20%. For convergent beam scanners, scanners sway angle is approximately linear with the FOV of scan system, and the proportional constant is related to the relative positions of the scanners. Scan efficiency of the system can be greatly increased by properly designing the relative positions of the scanners. Numerical calculation indicates that when the convergent beam scans at 340 Hz of simple harmonic wave and the range of act is above 3000 m, its maximum lag angle is 1/19 of that of the parallel beam scanner, so the lag effect is largely reduced.

Key words coherent laser radar; galvanometer-type scanners; lag angle; parallel beam scanning; converging beam scanning

1 引 言

相干激光成像雷达是一种高灵敏度激光雷达,它在民用和军用上具有非常广泛的应用价值。典型的相干激光成像雷达,大多采用高重复频率脉冲外差探测和单元探测器二维扫描成像体制^[1~4]。小型激光器输出能量还不能满足远距离大视场照射目标的非扫描成像技术要求,只能靠单脉冲能量窄视场照射目标,快速扫描成像,而且目前的焦平面光电探

测器还不能读取目标的距离信息^[5,6]。

在扫描成像中,当扫描器高速摆动或增大作用距离时,由于信号回波往返的时间延迟,接收信号光方位与发射时指向位置不同,导致探测器瞄准角滞后于光学天线视场角,即视场滞后角效应^[4]。滞后角效应将恶化信号光和本振光的空间相干性,降低系统外差效率,甚至于丢失部分像点列阵,这就限制了成像速率和作用距离的进一步提高。

基金项目: 国家自然科学基金(60577032)资助课题。

作者简介: 王春晖(1965—),男,哈尔滨工业大学博士,教授,主要从事激光成像雷达、激光测风雷达及激光雷达半实物仿真等方面的研究。E-mail: wangchunhui02@sohu.com

美国 MIT 林肯实验室发展一种多元线阵外差探测技术,解决了视场滞后角问题^[3]。但这项技术难度非常大:一是必须能研制出高质量量子效率均匀分布的 HgCdTe 线阵探测器,每单元的位置是滞后角的函数;二是必须能产生与线阵探测器维数相一致、相匹配的本振光波形。本文提出一种会聚光束扫描方法,通过提高扫描系统的扫描效率,降低视场滞后角。

2 扫描体制相干激光成像雷达的滞后角效应

如图 1 所示,在扫描相干激光成像雷达中,当扫描器振镜按照扫描指令函数高速周期性运动时,振镜本身将产生滞后角,它服从以下运动规律

$$\phi_n = \tau \omega = \frac{2R}{c} \frac{d\phi}{dt}, \quad (1)$$

式中 ϕ_n 为振镜滞后角; $\tau = 2R/c$ 为信号光从激光雷达到目标的往返时间; R 为激光雷达到目标的距离; c 为光在大气中的传播速度; ϕ 为振镜转角; $\omega = d\phi/dt$ 为振镜的角速率; t 为振镜运动时间。

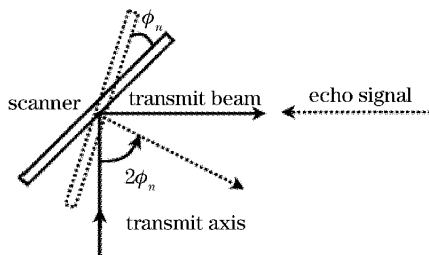


图 1 视场滞后角效应示意图

Fig. 1 Sketch map of FOV lag effect

如果振镜按照简谐波方式快速摆动,则光束转角为

$$\varphi = 2\phi_0 \sin(\omega t) = 2\phi_0 \sin(\omega n T_s), \quad (2)$$

式中光束转角 $\varphi = 2\phi$, ϕ_0 为振镜最大转角; $T_s = 1/f_s$, f_s 为激光器发射脉冲的重复频率; n 为脉冲序列数。

将(2)式代入(1)式,在振镜做简谐波扫描运动时,光束滞后角 φ_n 为:

$$\varphi_n(R, \omega, n) = \frac{4\phi_0 \omega R}{c} \cos(\omega n T_s), \quad (3)$$

式中 $\varphi_n = 2\phi_n$ 。

3 平行光束扫描的滞后角

在相干激光成像雷达中,假设本振光为均匀光束,信号光为艾里斑,则本振光 U_{LO} 和信号光 U_{SA} 复

振幅数学模型分别为:

$$U_{LO}(\mathbf{r}) = C_{LO} \exp[-j\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}], \quad (4)$$

$$U_{SA}(\mathbf{r}) = C_{SA} \frac{2J_1(\chi)}{\chi} \exp[-j\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}], \quad (5)$$

式中 C_{LO} 为本振光振幅常数因子; \mathbf{k} 为光波的传播矢量; \mathbf{r} 为光斑落在探测器光敏面上的位置矢量(圆对称极坐标); χ 为光学群延迟线系统参量, $\chi = \pi r/F\lambda$, λ 为激光波长; r 为光斑落在探测器光敏面的径向位置坐标, $F = f/d$ 为光学系统的“F”数, d 和 f 分别为光学系统有效孔径和有效焦距; C_{SA} 为信号光振幅常数因子; J_1 为一阶贝塞耳函数。

根据外差效率的物理定义^[1],把光学系统准直误差角 γ_0 和视场滞后角 θ_n 考虑进去,在均匀光束-艾里斑模型下,经过数学推导,扫描视场内各个像点的外差效率 η_H 由下式给出

$$\eta_H = \frac{4}{\chi_0^2} \left\{ \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi x_0} \frac{J_1(\chi_2) \cos[2F\gamma\chi_2 \cos \varphi]}{\chi_2} \chi d\chi d\varphi \right\}^2, \quad (6)$$

式中 γ 为本振光与信号光波矢总空间倾斜角(也叫空间失配角), $\gamma = \gamma_0 + \theta_n$, θ_n 为视场滞后角; χ_0 为探测器光学参量, $\chi_0 = \pi r_0/\lambda f$; χ_2 为信号光偏离量光学参量, $\chi_2 = (\pi/\lambda F) \sqrt{r^2 + x_0^2 - 2rx_0 \cos \varphi}$, x_0 为本振光与信号光平行偏离量, $x_0 = f \times \theta_n$ 。

如图 2 所示,在平行光束扫描中,扫描振镜位于望远镜物方,它既是光学天线的出瞳,又是成像物镜的入瞳,探测器置于物镜的焦平面上。这时,在望远镜的像方形成一个扫描视场,则平行光束扫描中扫描视场角为

$$\theta = \frac{\varphi}{\alpha} = \frac{2\phi}{\alpha}, \quad (7)$$

式中 θ 为扫描视场角; α 为望远镜的放大倍数。

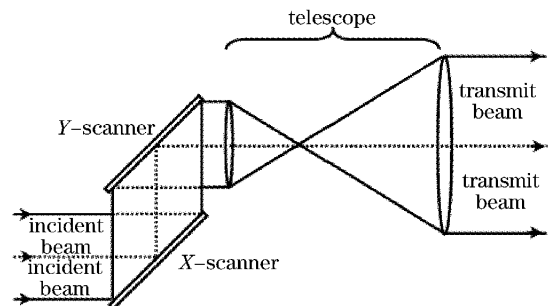


图 2 平行光束扫描方框图

Fig. 2 Block diagram of the parallel beam scanner

由(7)式可见,在平行光束扫描中, ϕ 与 θ 成间接线性关系,望远镜放大倍数越大,扫描效率越低。这时,如果考虑滞后角效应,在物方光束滞后角等于扫

描滞后角,所以在探测器光敏面(x 方向上)光斑漂移量为

$$x_{0n} = f \times \theta_n = \frac{4\phi_0 \omega R f}{c} \cos(\omega n T_s) \quad (8)$$

因此,通过计算(6)式和(8)式,可以从理论上知道扫描视场内各个像点的外差效率。数值计算参量: $\lambda=10.6 \mu\text{m}$; $f=1486 \text{ mm}$, $d=100 \text{ mm}$ (即 $F=14.86$), $r_0=0.15 \text{ mm}$, $2\phi_0=5^\circ=0.08722 \text{ rad}$, $\omega=2\pi \times 170 = 1.068 \times 10^3 \text{ rad/s}$, $T_s=1/32 \text{ kHz}=3.125 \times 10^{-5} \text{ s}$, $f_s=32 \text{ kHz}$ 。激光雷达作用距离参量分别选取: $R=500 \text{ m}$, 1000 m , 2400 m , 3000 m 。

如果光学天线系统完全准直时,即 $\theta_0=0$ 。则根据(3)式可以计算 $R=500 \text{ m}$, 1000 m , 2400 m , 3000 m 的平行光束简谐波扫描滞后角。

在扫描空域 $2^\circ \times 1^\circ$, 空间角分辨率 0.26 mrad 和像元素 64×32 条件下,采用蒙特-卡罗数值计算方法,使用 2 万个随机数,以像元数 n 为横坐标,每个像元对应的外差效率为纵坐标。由于每行有 64 个像点,而且行与行之间的像点具有重复性,因此计算 100 个像元所对应的外差效率,足以反映其他像素点的情况。数值计算结果如图 3 所示。

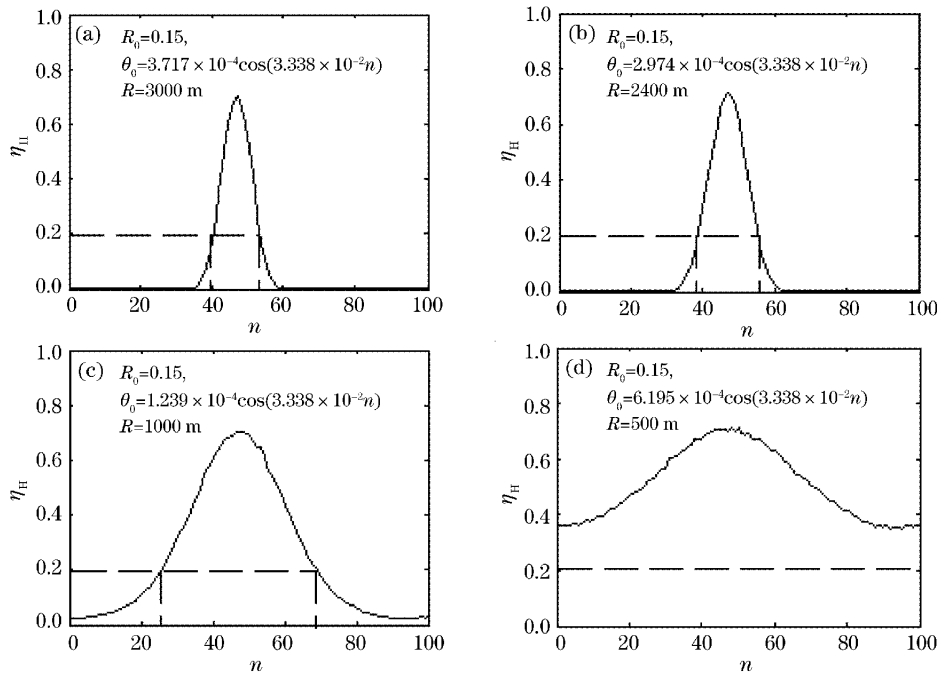


图 3 在 3000 m (a), 2400 m (b), 1000 m (c) 和 500 m (d) 时 100 个像素对应的外差效率数值曲线

Fig. 3 Heterodyne efficiency curve of 100 image lattices at 3000 m (a), 2400 m (b), 1000 m (c) and 500 m (d)

数值计算表明,当进行 340 lines/s 平行光束简谐波扫描时,作用距离 $R > 1000 \text{ m}$ 时,扫描空域中央处视场角滞后效应显著,扫描空域边缘处视场角滞后效应相对较弱,在行与行之间的边缘处存在巨变拐点,随着作用距离继续增加,将使扫描空域内某些列阵(特别是中央区域)像点外差效率小于阈值 20% 越来越多,结果导致部分像点阵列模糊甚至丢失,进而降低激光雷达图像的分辨率。

4 会聚光束扫描的滞后角

如图 4 所示,在会聚光束扫描系统中,设振镜位于焦点之后 $FO=l$ 处,根据镜面成像关系有

$$OP=PF_1=PF_2=b+l, PQ=a$$

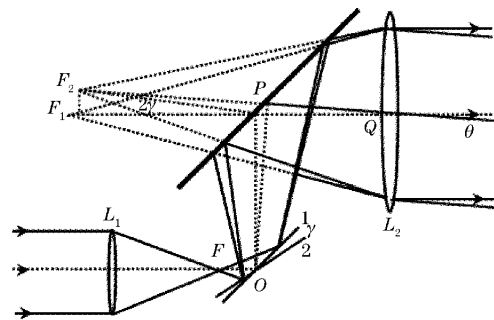


图 4 对于透镜 L_2 振镜转角 ϕ 与扫描角 θ 之间关系示意图

Fig. 4 Sketch map of connection between scanners sway angle γ and scanning angle θ at the lens L_2

当 ϕ 和 θ 都很小时, 振镜转角与扫描视场角之间的关系近似表示为

$$\theta \approx \frac{2(b+l)\phi}{a+b+l}, \quad (9)$$

如图 5 所示, 给出了会聚光束扫描振镜滞后角 ϕ_m 与扫描视场滞后角 θ_m 之间关系示意图。在保持像方光束方向不变条件下, 则

$$\theta_m = 2\theta_n/f_1, \quad (10)$$

式中 f_1 为开普勒望远镜的前焦距。由 (10) 式可见, 会聚光束扫描与平行光束扫描相比, 如果 $f_1 > 2l$, 则其视场滞后角至少减少 $(f_1/2l)$ 倍。

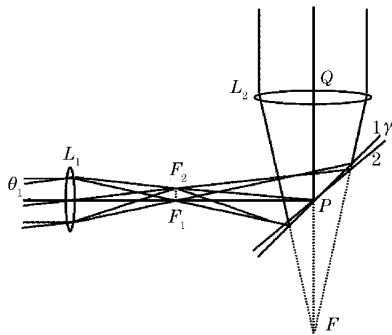


图 5 对于透镜 L_1 振镜转角 ϕ 与扫描角 θ 之间关系示意图

Fig. 5 Sketch map of connection between scanner sway angle γ and scanning angle θ at the lens L_1

图 2 所示平行光束扫描系统的开普勒望远镜参

量: 筒长 371 mm, 有效孔径 $\phi 100$ mm, 前焦距 $f_1 = 62$ mm 和后焦距 $f_2 = 309$ mm。将图 2 所示的直筒式开普勒望远镜设计成图 6 所示的折叠式结构, 而且把双检流计振镜置于望远镜折叠光路之中。选择折叠间距 $b = 180$ mm, X-振镜位于焦点之后 $l = 10$ mm 处, Y-振镜距望远镜目镜光轴 $a = 119$ mm, 然后把把这些参量代入 (9) 式, 可得到 ϕ 与 θ 的关系为: $\theta \approx 1.23\phi$ 。

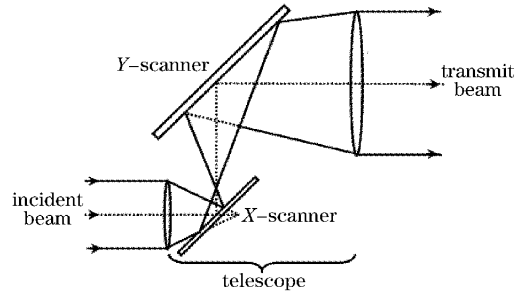


图 6 折叠式开普勒望远镜 X-振镜位于焦点之后会聚光束扫描原理图

Fig. 6 Block diagram of the convergent beam scanner by foldaway telescope at X-scanner after focus

如果要求 $\theta = \pm 1^\circ$, 则 $\phi_0 = 0.813^\circ$ 。在同样要求下, 如果采用平行光束扫描, 则需要 2.5° 。

根据 (3) 式滞后角瞬态运动方程, 当作用距离为 3000 m, 振镜摆动频率分别为 170 Hz 和 340 Hz 时, 平行光束扫描方式振镜摆角滞后角动态运动规律为

$$\theta_n(3000, 2\pi \times 170, n) = 3.03 \times 10^{-4} \cos(3.338 \times 10^{-2} n), \quad (11)$$

$$\theta_n(3000, 2\pi \times 340, n) = 0.09 \times 10^{-4} \cos(3.338 \times 10^{-2} n). \quad (12)$$

根据 (10) 式会聚光束扫描滞后角瞬态运动方程, 当作用距离为 3000 m, 振镜摆动频率分别为 170 Hz 和 340 Hz 时, 会聚光束扫描方式信号光束滞后角动态运动规律为

$$\theta_m(3000, 2\pi \times 170, n) = 9.774 \times 10^{-5} \cos(3.338 \times 10^{-2} n), \quad (13)$$

$$\theta_m(3000, 2\pi \times 340, n) = 1.955 \times 10^{-4} \cos(6.676 \times 10^{-2} n), \quad (14)$$

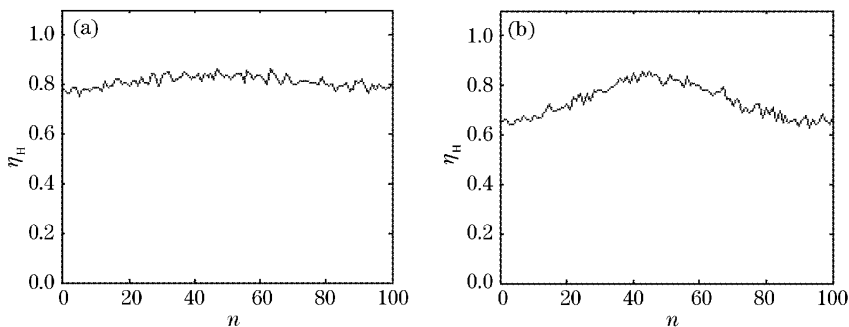


图 7 在 3000 m, $2\pi \times 170$ rad/s (a) 和 $2\pi \times 340$ rad/s (b) 时 100 个像素对应的外差效率数值曲线

Fig. 7 Heterodyne efficiency curve of 100 image lattices at 3000 m, $2\pi \times 170$ rad/s (a) and 3000 m, $2\pi \times 340$ rad/s

将(13)式和(14)式分别代入(6)式,采用蒙特-卡罗数值积分算法,得图7扫描视场内各个像素点(图中只给出100个像素点)外差效率理论值。从图7可见,所计算的像素点的外差效率均超过20%的阈值。

根据(13)式和(14)式,会聚光束扫描像点最大漂移量 $x_{0n} = f \times \theta_{m,\max}$ 。当成像物镜有效焦距 $f = 297$ mm时,会聚光束扫描像点最大漂移量分别为 $29 \mu\text{m}$ (340 lines/s)和 $58 \mu\text{m}$ (680 lines/s)。

根据(11)式和(12)式,成像物镜有效焦距 $f = 297$ mm,平行光束扫描像点最大漂移量 x_{0n} 分别为 $552 \mu\text{m}$ (340 lines/s)和 $1104 \mu\text{m}$ (680 lines/s)。

在会聚光束扫描设计中,行扫镜(一般定义为X方向)高速摆动,摆动频率170 Hz(340lines)在作用距离都是3000 m情况下,其最大滞后角约为平行光束扫描方案的1/19,这时滞后角效应可不考虑,而帧扫镜(Y方向)做低速振动,如20帧即20 lines/s,滞后角效应则可忽略。

5 结 论

上述讨论表明,会聚光束扫描可以大幅度降低滞后角。设计思想是,将前后焦距分别是62 mm和

309 mm直筒式开普勒望远镜,改成折叠间距为180 mm的折叠式开普勒望远镜,行扫振镜放在焦点后面10 mm处。计算表明,振镜的最大摆动幅度只需 $\pm 0.813^\circ$ 即可实现 $\pm 1^\circ$ 的扫描视场角,作用距离 $R = 3000$ m,振镜振动频率分别为170 Hz和340 Hz,信号光光斑在 $300 \mu\text{m}$ 光敏面上的最大偏移量分别是 $29 \mu\text{m}$ 和 $58 \mu\text{m}$,这时滞后角效应可忽略不计。可见,在小角度近似条件下,会聚光束扫描具有明显的技术优势,是降低视场滞后角非常有效的方法之一。

参 考 文 献

- 1 Wang Chunhui, Wang Qi, M. L. Belov *et al.*. The numerical modeling of heterodyne efficiency of nonlinear scanning coherent image system [C]. *SPIE*, 2004, **5743**: 491~496
- 2 E. A. Wachter, W. G. Fisher, M. L. Keltos. Coherent burst laser ranging [C]. *SPIE*, 1998, **3380**: 250~258
- 3 R. C. Harney. Dual active/passive infrared imaging systems [J]. *Reprinted from Optical Engineering*, 1981, **20**(6): 976~980
- 4 H. Ahlberg, S. Lundqvist, D. Latalick *et al.*. Imaging Q-switched CO₂ laser radar with heterodyne detection: design and evaluation [J]. *Appl. Opt.*, 1986, **25**(17): 2891~2898
- 5 V. Hasson. Review of recent advancements in the development of compact high power pulsed CO₂ laser radar systems [C]. *SPIE*, 1999, **3707**: 499~502
- 6 R. M. Frey, R. C. Hareney. Laser imagine radar sensor [C]. *SPIE*, 1983, **415**: 1~12