

文章编号: 0258-7025(2004)Supplement-0387-03

相干激光雷达中光学天线与探测器光敏面的最佳匹配关系

王春晖, 王 骐, 尚铁梁

(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 在相干激光雷达中, 本振光和信号光的物理模型一般为均匀光束-艾里斑或高斯光束-艾里斑。在均匀光束-艾里斑模型下, 如果光学天线的有效孔径和有效焦距已知, 则探测器光敏面半径应该按光学系统衍射极限光斑半径的0.79倍设计, 这时系统外差效率的最佳理论值约为71%。在高斯光束-艾里斑模型下, 探测器光敏面半径应按光学系统衍射极限光斑半径的0.63倍设计, 这时系统外差效率的最佳理论值保持在81%左右。

关键词 相干激光雷达; 外差探测; 外差效率; 高斯光束; 艾里斑

中图分类号 TN958.98

文献标识码 A

Suited Connection of the Optical Antenna and Photoconductive Surface on the Coherent Ladar

WANG Chun-hui, WANG Qi, SHANG Tie-liang

(National Key Laboratory of Tunable Laser Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150006, China)

Abstract The physical models of local laser and signal laser are plane wave-Airy spot model or Gauss wave-Airy spot model commonly in heterodyne laser radar optics. In the case of plane wave-Airy spot, the radius of the photosensitive plane should be 0.79 times of that of the diffraction limit speckle of the optical system, the heterodyne efficiency is about 71% at this time. In the case of Gauss wave-Airy spot, the radius of the photosensitive plane should be 0.63 times of that of the diffraction limit speckle of the optical system and the heterodyne efficiency is about 81%.

Key words heterodyne laser radar; heterodyne detect; heterodyne efficiency; Gaussian beam; Airy spot

1 引言

A. E. Siegman^[1]最早提出:相干激光雷达的接收视场应该限制在立体角 $\Omega \approx \lambda^2/A_p$ 范围之内(A_p 为入射光瞳的面积, λ 为接收光波波长), 超过该限制条件, 将无法实现外差探测。但这个限制条件只是相干激光雷达光学天线必须满足的上限条件, 而不是最佳条件。其实, 在相干激光雷达光学天线的设计中, 还必须考虑本振光与信号光的光束物理模型。理论上, 外差探测中的本振光与信号光可由平面波、高斯光束和艾里斑等三种物理模型中任何两种组合而成, 这样就有六种可能的物理模型组合, 即平面波-平面波、平面波-艾里斑、平面波-高斯光、高斯光-高斯光、高斯光-艾里斑和艾里斑-艾里斑^[2-3]。采用不同的本振光与信号光物理模型设计, 反映到相干激光雷达外差效率这个参量上, 则存在比较大的

设计误差^[4]。

外差效率是相干激光雷达光学系统特有的一个综合性指标参量, 它反映总的入射信号光积分光强中有多少能被以外差接收方式探测到。为了使外差效率最大化, 本振光与信号光必须充分满足空间相干性条件: 两束光的径向强度分布尽量相似; 波前曲率相等; 两束光空间位移必须很小; 两束光之间的角误差应该很小; 两束光应该具有相同的偏振态^[5-7]。本文从分析相干激光雷达外差效率入手, 本振光分别为均匀光束和高斯光束, 信号光为艾里斑, 分别给出了均匀光束-艾里斑及高斯光束-艾里斑相干激光雷达光学天线定理。

2 本振光与信号光的物理-数学模型

在相干激光雷达中, 本机振荡激光器输出一般

为高斯光束。通过精心设计成像物镜,可以将高斯光束束腰聚焦在探测器光敏面的半径(r_0)上,则高斯光束束腰的相位表现为等相位。这时,若 $w_0 \gg r_0$ 时本振光振幅分布处处相等,可称为均匀光束;若 $w_0 \sim r_0$ 时本振光振幅分布按高斯光束规律变化。所以,本振光的数学模型可分别表示为

$$U_{ELO}(r) = \begin{cases} C_{LO} \exp[-jk \cdot r] & r \leq r_0 \\ 0 & r > r_0 \end{cases} \quad (1)$$

$$U_{ALO}(r) = C_{LO} \exp\left[-\frac{r^2}{w(z)}\right] \exp[-jk \cdot r - j\frac{r^2}{2R(z)}] \quad (2)$$

式中 $R(z) = z[1 + (\pi w_0^2 / \lambda z)^2]$ 为高斯本振光在纵坐标 z 处等相面的曲率半径,当 $z=0$, $R(0) = \infty$; $w^2(z) = w_0^2 [1 + (\lambda z / \pi w_0^2)^2]$ 为高斯本振光在纵坐标 z 处的模场半径,当 $z=0$, $w(0) = w_0$; k 为光波传播矢量的大小; C_{LO} 为光束振幅常量因子; r 为光束在探测器光束横截面坐标。

发射激光器输出的光束也是高斯光束。但该光束经过长距离大气传输后,在不考虑大气湍流和散斑效应的情况下,能被光学天线接收的那部分信号光回波近似为平面波。因此,位于光学天线系统焦平面处探测器光敏面的信号光场分布,对于圆形孔径,应该是光学天线有效孔径的艾里斑图样,其数学模型为

$$U_s(r) = C_s \left[\frac{2J_1(\chi)}{\chi} \right] \exp[-jk \cdot r] \quad (3)$$

式中 $\chi = \pi r / F\lambda$; $F = f/d$ 为光学系统的“ F ”数; d , f 和 r 分别为光学系统有效孔径、有效焦距和探测器光敏面半径; C_s 为常量因子; J_1 为一阶贝塞尔函数。

3 均匀光束-艾里斑模型下的探测器最佳光敏面

在光学系统装调中,可以将均匀本振光束调整到与探测器光敏面几乎完全重合的程度,并以光敏面作为参考坐标系(r, φ),则有本振光与信号光由于空间角失配而产生的附加位相差及 $k \cdot r = kr_s \sin\theta \cos\varphi \approx kr_s \theta \cos\varphi$ 。所以,均匀光束-艾里斑模型下的相干激光雷达系统外差效率 η_H 为

$$\eta_H = \frac{4}{\chi_0^2} \left[\int_0^{\chi_0} J_1(\chi) J_0(2F\theta\chi) d\chi \right]^2 \quad (4)$$

式中 $\chi_0 = \pi r_0 / \lambda F$ 为探测器的光学参量; θ 为本振光与信号光的失配角。

图 1 和图 2 分别给出在外差效率 η_H 随探测器光学系统参量 χ_0 和空间失配角参量 $F\theta$ 的数值仿真

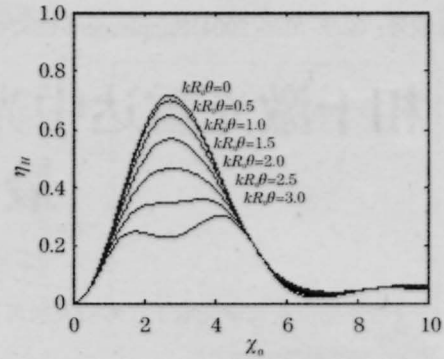


图 1 均匀光束-艾里斑系统外差效率 η_H 随参量 χ_0 的变化曲线

Fig.1 Numerical curve that even-Airy heterodyne efficiency η_H with parameter χ_0 different

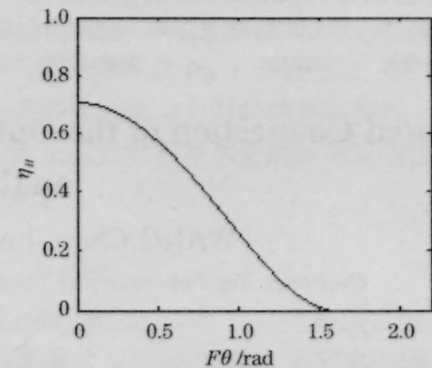


图 2 均匀光束-艾里斑系统外差效率 η_H 随参量 $F\theta$ 的变化曲线

Fig.2 Numerical curve that even-Airy heterodyne efficiency η_H with parameter different $F\theta$

曲线。从中可以得出以下结果:

- 1) 在 $\chi_0 \approx 3$ 附近,外差效率损失很小;
- 2) 在 $\chi_0 \approx 3$ 附近,外差效率对本振光和信号光空间失配角 θ 不敏感,虽然增加 θ 时外差效率下降,但下降后的外差效率分布曲线仍然在 $\chi_0 \approx 3$ 附近保持较好的匹配状态;

3) 当相干光学系统的有效孔径 d 和有效焦距 f 确定以后,增大探测器的光敏面积,即使 χ_0 远离 $\chi_0 \approx 3$ 时,并不能给系统带来任何好处,反而使系统的信噪比迅速恶化。

因此,根据图 1 计算的结果,可以确定 d , f 和 r_0 之间最佳匹配关系,即

$$r_0 = \frac{3\lambda f}{\pi d} \approx 0.96 \frac{\lambda f}{d} \quad (5)$$

(5) 式表明,当探测器光敏面半径 r_0 为艾里斑半径 ($r_0 = 1.22\lambda f/d$) 的 0.79 倍时,能减少准直损耗。除了失配的平面波有损耗系数外,在这个范围内对匹配误差是不敏感的,也就是说用单一的非聚焦平面波实现外差是可行的。因此,不妨把(5)称之为均匀光束-艾里斑相干激光雷达光学天线定理。

4 高斯光束-艾里斑模型下的探测器最佳光敏面

当 $z=0$ 时, $R(z) \rightarrow \infty$, $\cos[kr^2/2R(z)]=1$, 即束腰聚焦在探测器光敏面上, 则这时, 高斯光束-艾里斑模型下的相干激光雷达系统外差效率 η_H 为

$$\eta_H = \frac{8}{\Omega^2} \frac{\left[\int_0^{\chi_0} J_1(\chi) \exp\left(-\frac{\chi^2}{\Omega^2}\right) J_0(2F\theta\chi) d\chi \right]^2}{\left[1 - \exp\left(-\frac{2\chi_0^2}{\Omega^2}\right) \right]} \quad (6)$$

式中 $\Omega = \pi w_0 / \lambda F$ 为高斯本振光的光学参量。

在这种情况下, 探测器光学参量 χ_0 一般可以选择光学天线系统衍射极限时即 $\chi_0 \approx 3.83$ 。本振光

高斯光束最佳模场半径 w_0 应该由式(6)决定, 但式(6)没有解析解只能进行数值计算, 计算结果如图3(a)-(c)所示。

由式(6)数值计算结果发现, 当 $\theta=0$ 即完全准直状态下, 高斯本振光光学参量 $\Omega \approx 2.41$ 时系统外差效率最大, 则有

$$w_0 \approx 0.77 \times \frac{\lambda f}{d}, \chi_0 = 3.83 \quad (7)$$

(7)式表明, 当探测器光敏面半径 r_0 为艾里斑半径, 选择高斯本振光束腰半径约为艾里斑半径的 0.63 倍时, 系统外差效率最佳。因此, 不妨把式(7)称之为高斯光束-艾里斑相干激光雷达光学天线定理。

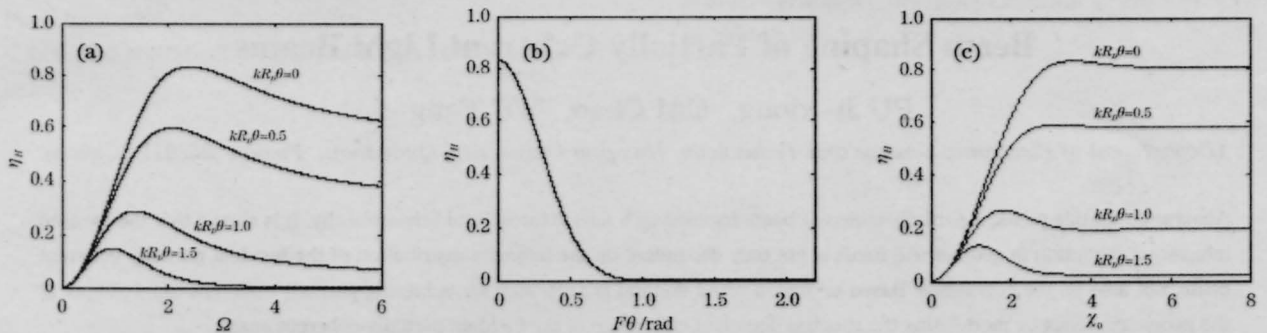


图3 高斯光束-艾里斑系统外差效率 η_H (a) 随参量 Ω 的变化曲线; (b) 随参量 $F\theta$ 的变化曲线; (c) 随参量 χ_0 的变化曲线
Fig.3 Numerical curve that Gaussian-Airy heterodyne efficiency η_H (a) with parameter Ω different, (b) with parameter $F\theta$ different, (c) with parameter χ_0 different

5 结论

在相干激光雷达光学系统设计中, 如果已有一套有效孔径 d 和有效焦距 f 都确定光学天线系统, 那么探测器光敏面的尺寸不能简单地按照衍射极限理论来计算, 而应该根据不同的本振光和信号光的物理模型, 按照均匀光束-艾里斑相干激光雷达光学天线定理, 或高斯光束-艾里斑相干激光雷达光学天线定理来精确计算选择。反之, 如果已有一套光伏型 HgCdTe 探测器, 其光敏面半径 r_0 已知, 则应按照上述原理确定光学天线的有效孔径和有效焦距。

参考文献

1 A. E. Siegman. The Antenna properties of optical heterodyne receivers[J]. *Appl. Opt.*, 1966, 5(10): 1588-1594

2 S. C. Cohen. Heterodyne detection: phase front alignment, beam spot size, and detector uniformity[J]. *Appl. Opt.*, 1975, 14(8):1953-1959
3 T. Takenaka, K. Tanaka, O. Fukumitsu. Signal-to-ratio in heterodyne detection for Gaussian fields[J]. *Appl. Opt.*, 1978, 17(21): 3466-3471
4 I. Renhorn, O. Steinval, D. Letalick. Performance study of a coherent laser radar[C]. *Proc. SPIE*, 1983, 415:39-50
5 He Yi. Optical system of imaging CO₂ Laser radar [J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, 19(8):1079-1083
何毅. 相干式 CO₂ 激光成像雷达的光学系统[J]. *光学学报*, 1999, 19(8):1079-1083
6 Tian Zhangshuo, Wang Qi, Wang Chunhui. Investigation of the pulsed heterodyne of an electro-optically Q-switched radio-frequency-excited CO₂ waveguide laser with two channels [J]. *Appl. Opt.*, 2001, 40(18):3033-3037
7 V. J. Corcoran. Directional characteristics in optical heterodyne detection processes[J]. *J. Appl. Phys.*, 1965, 36(6):1819-1825