

文章编号: 0258-7025(2002)Supplement-0251-03

用二元光学元件简化相干激光雷达天线系统的 光学设计

刘丽萍 王 骐 李 琦

(哈尔滨工业大学可调谐激光技术国家级重点实验室, 哈尔滨 150001)

摘要: 根据对相干激光雷达小型化、轻量化、低成本和高性能的要求, 采用小口径、平面基底二元光学元件、对外差探测、收发合置的相干激光雷达天线系统进行简化。按照使用要求设计了一个透射式伽利略型天线系统, 设计参数为: 作为发射系统, 物方视场角 $2\omega = 10^\circ$, 出瞳口径 $\Phi = 100 \text{ mm}$, 束散角压缩比 $\beta = 5\times$, 激光光源波长 $\lambda = 10.6 \mu\text{m}$ 。设计结果为系统的像质达到了衍射限。

关键词 二元光学, 相干激光雷达, 天线, 光学设计, 伽利略望远系统

中图分类号 TN958.98 文献标识码 A

Optical Design of Coherent Laser Radar Antenna System Simplified by Binary Element

LIU Li-ping WANG Qi LI Qi

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

Abstract According to the requirement to the coherent laser radar, a coherent laser radar antenna system was simplified by using a binary optics element with planar substrate to correct aberration. Only one large aperture spherical lens and one small aperture spherical lens as well as one small aperture binary optical corrector with planar substrate were used in the system. The designing parameters are, as a transmitting system, the objective field of view $2\omega = 10^\circ$, the aperture of the exit pupil $\Phi = 100 \text{ mm}$, the reducing times of the angle of the diverging beam $\beta = 5\times$, the wavelength of the laser source $\lambda = 10.6 \mu\text{m}$. The designing result is that the imaging quality of the optical antenna system reaches the diffraction limit.

Key words binary optics, coherent laser radar, antenna, optical design, Galileo telescope system

1 引 言

用于外差探测的相干激光雷达的天线系统, 受其使用特性的限制, 要求具有小型化、轻量化、低成本和高像质的特点。传统的伽利略型透射式望远系统, 可以满足一般的光学性能要求, 并且具有小型化的优点。但是, 目前用于 $10.6 \mu\text{m}$ 远红外波段的光学透射材料如 ZnSe, Ge 等, 不仅比重大, 而且价格非常昂贵, 特别是大口径材料的价格尤其昂贵且难于获得。因此, 在满足使用要求的前提下, 尽量减少材料的使用量, 从而减轻系统重量, 降低成本是非常重要的, 有意义的研究课题。

二元光学是近年来发展起来的光学的一个分支。它建立在光的衍射原理基础上, 利用计算机辅助设计, 采用超大规模集成电路的制作工艺, 进行设

计和加工光学元件。二元光学元件与传统的光学元件一起可以构成重量轻、结构简单、高像质的光学系统^[1]。

已有的用二元光学元件简化透射式望远系统的设计方法是^[2]: 分别在物镜组和目镜组元件的一个表面上设计一个衍射光学面, 用于校正系统的像差和达到所要求的光学功能。其缺点是衍射面的基底往往不是平面, 而且与物镜对应的衍射面口径比较大, 这都增加了加工难度和成本。

我们完成的设计是: 采用一片大口径的球面透镜作物镜, 一片小口径的球面透镜作目镜, 另外用一片小口径平面基底的二元光学元件作校正元件, 从而使整个系统的结构最简单, 工艺最简单, 达到小型化、轻量化、低成本和高像质的要求。

2 设计方法

按照使用要求和前面提出的设计考虑,相干激光雷达收发合置天线系统的基本结构如图 1 所示。筒长选为 180 mm,透镜材料选用 ZnSe,衍射元件的基底为平面,另一面为曲面。

具有旋转对称型位相分布的衍射元件的位相函数为^[3]:

$$\phi(r) = \frac{2\pi}{\lambda} \sum_{i=1}^m A_i r^{2i} \quad (1)$$

上式中, r 为衍射元件的径向坐标, A_i 为位相多项式各项的系数。

由于系统是在 $\lambda = 10.6 \mu\text{m}$ 的远红外波段使用,像差的校正比较困难。另外,系统用于外差探测,扫描光束由单元探测器接收,则要求天线系统在全视场的光束强度和质量均匀,无渐晕,波像差小于 $\lambda/4$,这都增加了设计难度。在设计中比较关键的问题是确定二元光学元件的位置。

光学系统波像差 W 是归一化物坐标 h 和归一化光瞳极坐标 ρ, ϕ_p 的函数^[4]:

$$\begin{aligned} W(h, \rho, \cos\phi_p) = & 1/8S_I \rho^4 + \\ & 1/2S_{II} h \rho^3 \cos\phi_p + 1/2S_{III} h^2 \rho^2 \cos\phi_p + \\ & 1/4(S_{III} + S_{IV}) h^2 \rho^2 + 1/2S_V h^3 \rho \cos\phi_p \quad (2) \end{aligned}$$

其中, $S_I, S_{II}, S_{III}, S_{IV}, S_V$ 分别表示赛德像差系数的球差、彗差、像散、匹兹万场曲和畸变。对于单个衍射透镜,当光阑位置与衍射透镜重合时,它的赛德像差系数为^[5]:

$$S_I = \frac{y^4 \phi^3}{4} (1 + B^2 + 4BT + 3T^2) - 8\lambda A y^4 \quad (3a)$$

$$S_{II} = \frac{-y^2 \phi^2 H}{2} (B + 2T) \quad (3b)$$

$$S_{III} = H^2 \phi \quad (3c)$$

$$S_{IV} = 0 \quad (3d)$$

$$S_V = 0 \quad (3e)$$

其中 y 是边缘光线入射在衍射透镜上的高度, ϕ 是衍射透镜的光焦度, H 是拉格朗日不变量,

$$B = \frac{2c_s}{\phi}, \quad T = \frac{u + u'}{u - u'}$$

c_s 是衍射透镜基底的曲率, A 是由衍射元件非球面项系数引入的球差附加项, u, u' 分别是边缘光线通过衍射透镜前后与光轴的夹角。

当孔径光阑与衍射透镜不重合时,衍射透镜的赛德像差系数为:

$$S_I^* = S_I \quad (4a)$$

$$S_{II}^* = S_{II} + \epsilon S_I \quad (4b)$$

$$S_{III}^* = S_{III} + 2\epsilon S_{II} + \epsilon^2 S_I \quad (4c)$$

$$S_{IV}^* = S_{IV} \quad (4d)$$

$$S_V^* = S_V + \epsilon(3S_{III} + S_{IV}) + 3\epsilon^2 S_{II} + \epsilon^3 S_I \quad (4e)$$

其中, $\epsilon = \delta y/y, \delta y$ 是由光阑移动引起的近轴主光线在透镜上的高度改变量, \bar{y} 是近轴主光线在透镜上的高度。

我们在设计中,分别对光阑置于不同位置的情况进行了优化设计,结果表明,当孔径光阑与衍射元件重合时,它对该系统的像差校正能力最佳。

另外,我们也对衍射元件到目镜的距离对衍射元件校正能力的影响进行了研究。由于小型化的要求,我们希望在得到预定像质的前提下,衍射元件到目镜的距离越小越好,实际设计结果表明,当这个距离小于一定值时,衍射元件的校正能力迅速下降,本设计中,这个距离约为 20 mm,这时,衍射元件的校正能力最佳。

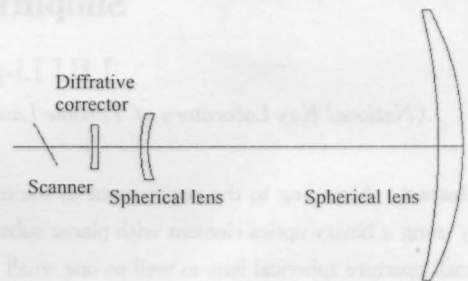


图 1 天线系统的结构简图

Fig. 1 Schematic diagram of the optical antenna system



图 2 二元光学校正元件位相等高线图

Fig. 2 Profile of the phase of the binary corrector

应用北京理工大学编制的 GOLD 光学设计软件,按照使用要求,设计了一个 CO_2 相干激光雷达的收发合置天线系统。如图 1 所示,二元光学元件位于系统的孔径光阑处,用于校正系统的像差。表 1 是系统的结构参数,表 2 是二元光学元件的位相系数,图 2 为二元光学校正元件的位相等高线图。

图3为各视场天线系统的调制传递函数曲线,还给出了衍射限的调制传递函数曲线作为对比。由图中

可以看出,系统的像质已经达到了衍射限。

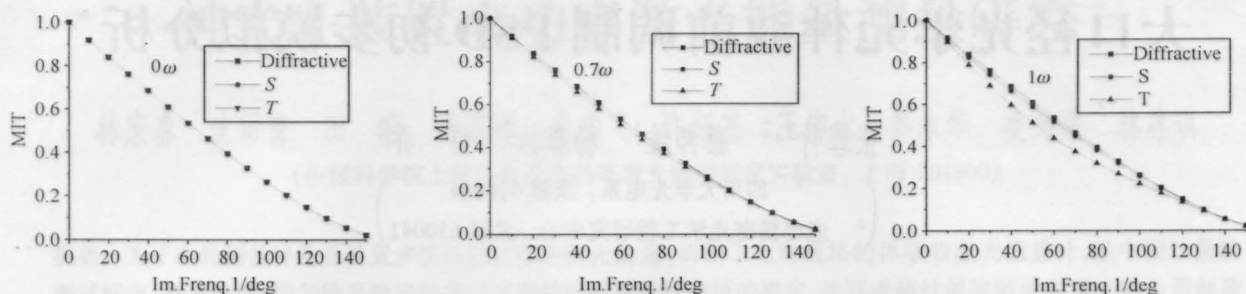


图3 光学天线系统的调制传递函数曲线

Fig. 3 Modulation transfer function of the optical antenna system

表1 天线系统的结构参数

Table 1. Lens prescription date for antenna system

Surface	Radius/mm	Thickness/mm	Glass	Aperture/mm
1	-82.2152	3.00	ZnSe	20.00
2*	infinite	20.01		20.39
3	62.8417	3.50	ZnSe	31.92
4	49.9160	137.25		31.50
5	-282.5040	12.00	ZnSe	128.62
6	-144.9959			130.80

*第2面为衍射面

表2 二元光学元件的位相系数

Table 2 Phase coefficients of binary element

A_1	5.12823×10^6	A_3	-2.37121×10^9
A_2	-8.53853×10^7	A_4	-2.05549×10^{11}

3 结 论

按照使用要求,我们设计了一个用于外差探测,

收发合置的相干激光雷达的天线系统,整个系统只用一片球面透射物镜,一片球面透射目镜,和一片平面基底的二元光学校正元件,其像质达到了衍射限。这种设计的结构形式和工艺要求达到了相干激光雷达要求的小型化,轻量化,低成本和高像质的要求。这种设计方法对于一般用二元光学元件简化光学系统的研究也有一定的参考价值。

参 考 文 献

- 1 M. D. Missing, G. Michael Morris. Diffraction optics applied design. *Appl. Opt.*, 1995, **34**:2452~2461
- 2 Patent 5,044,706. Optial element employing aspherical and binary grating optical surface. Sept. 3, 1991
- 3 金国藩,严瑛白,邬敏贤 等著. 二元光学. 北京:国防工业出版社,1998
- 4 W. T. Welford. *Aberration of Optical System*. Bristol: Hilger, 1986. 226~234
- 5 D. A. Buralli, G. Michael Morris. Design of diffraction singlets for monochromatic imaging. *Appl. Opt.*, 1991, **30**:2151~2158