

一种高效率主被动复合成像雷达分光系统设计

刘丽萍 孙秀冬 赵 远 靳辰飞 张 勇

(哈尔滨工业大学物理系, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要 以小型化、高效率为目的,提出了利用全反射原理,采用复合棱镜结构,通过适当选配光学材料,实现在主被动复合成像雷达接收光学系统中对主、被动光束进行高效率分光的方案。根据技术指标要求完成了分光系统的设计,该系统可以对主动成像光波波长 850 nm,全视场角 3.5°,被动成像光波中心波长 9.7 μm ,全视场角 6.9°的两束光进行高效率的分光,计算结果表明,对主被动光波分光效率的理论值都可以达到 98%以上,该方案还兼具结构稳定,工艺简单,易于工程实现的优点。该设计方案,可以在主被动复合成像激光雷达接收系统中实现主被动共用孔径,从而实现系统的小型化。

关键词 应用光学; 成像雷达; 主被动复合; 分光系统

中图分类号 TN216 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20092908.2293

Design of High-Efficiency Beam Dividing System Used in Active-Passive Composite Imaging Radar

Liu Liping Sun Xiudong Zhao Yuan Jin Chenfei Zhang Yong

(Department of Physics, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

Abstract A high-efficiency beam dividing system design was accomplished, which could be used in the receiving optical system of the active-passive composite image radar to divide the active beam from the passive beam. The beam dividing system could divide the active beam with wavelength of 850 nm, view field angle of 3.5° from the passive beam with wavelength of 9.7 μm and view field angle of 6.9°. The efficiency of the beam dividing system is over 98% for both active beam and passive beam. In addition, the structure stabilization and technical facility are the other advantages of the design. The beam dividing system design could share the same aperture for both active beam and passive beam which is important to achieve the miniaturization of active-passive composite image radar.

Key words applied optics; imaging radar; active-passive composite; beam dividing system

1 引 言

激光主动成像雷达因为具有极高的频域、空域、时域分辨率而在目标探测、跟踪、瞄准、和成像识别等方面得到越来越广泛的应用,激光雷达技术是目前精度最高的测距手段^[1,2]。但其也存在一些缺点,相对于红外成像,其像素分辨率不高,帧频也较低,视场角较小。红外成像是一种被动成像系统,它的优点是成像像素分辨率高、成像帧频高;但是由于只能获取二维平面像,不能得到目标的距离数据,因此,利用红外成像进行目标识别比较困难,特别是在复杂背景条件下有效识别和提取目标的能力较差。

采用激光主动成像与红外被动成像的复合体制,优势互补,实现一种远距离、高精度复合成像的雷达系统,能够提高目标的识别效率;另外,由于二者可以共光学系统、共电源系统和共数据处理系统,则能够有效地降低系统的载荷,对空间应用意义尤为重大。

采用主被动共用孔径结构,可以降低系统载荷,减小系统体积,实现系统的小型化。但是,在主被动光波均有一定的视场角分布范围的情况下,如何实现主被动光束高效率的分光,是所要解决的一个关键技术。一般的分光方法通常采用光楔或干涉法分光^[3-9],但对于本课题的技术要求,前者所需要的空

收稿日期: 2008-10-10; 收到修改稿日期: 2008-11-26

作者简介: 刘丽萍(1963—),女,博士,副教授,主要从事光电探测、光学系统设计和激光雷达等方面的研究。

E-mail: hit_liuliping@yahoo.com.cn

间较大,不符合小型化的方针;后者工艺复杂,且理论分光效率与实际分光效率差异较大,分光效率不高,不符合高效率的要求^[10-16]。本文提出了利用全反射原理,采用复合棱镜结构的分光方案,通过选用适当的材料组合,可以实现对主动光 3.5° 视场和被动光 6.9° 视场的高效率分光。计算结果表明,这种方法对主被动光的光分效率都可以达到 98% 以上。

2 主被动复合成像雷达分光系统的设计

主被动复合成像雷达主要技术指标和技术要求:主动成像光波波长 850 nm,视场角 2°;被动成像光波中心波长 9.7 μm,视场角 4°;系统接收口径 100 mm。

2.1 全反射分光原理

根据菲涅耳折射定律,当光束从折射率为 n 的光密媒质入射到折射率为 n' 的光疏媒质界面时,如果入射角 $\theta_0 \geq \arcsin(n'/n)$,则光束会发生全反射。根据不同光学材料对同一波长光波的折射率不同,同一种光学材料对不同波长光波的折射率也不同,提出一种分光方案:通过选择两种适当的材料,并调整入射光束的方位,使得主动光波和被动光波在从第一种介质入射到第二种介质表面时,全反射角大的主动光束在全视场内都不发生全反射,而全反射角小的被动光束全视场内的光束都发生全反射。然后,再把第二种介质按照使主动光增透镀膜,即可实现主被动光的高效率分光。

分光原理如图 1,图 2 所示。设主被动光束在折射率为 n 的介质中的全视场角分别为 ω, ω' ,入射光束的主光线、即系统的光轴与界面的法线夹角为 α 。 θ, θ' 分别为主被动光波的全反射角。参照图 1,则全反射角小的被动入射光全部视场范围的光束都

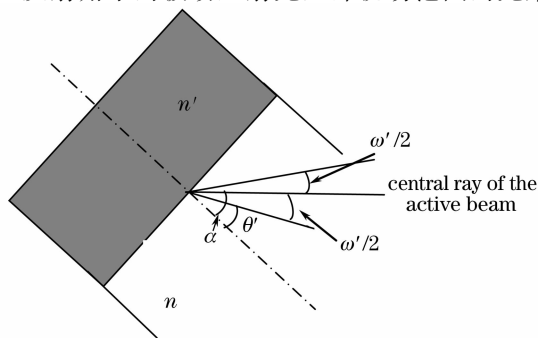


图 1 分光原理 θ' 与 α 关系示意图

Fig. 1 Sketch of the beam dividing principle-connection of the θ' and α

发生全反射的条件为

$$\alpha - \omega'/2 \geq \theta'. \quad (1)$$

参照图 2,这时,可得全反射角大的主动光束不发生全反射的全视场范围 ω 满足条件

$$\alpha + \omega/2 \leq \theta. \quad (2)$$

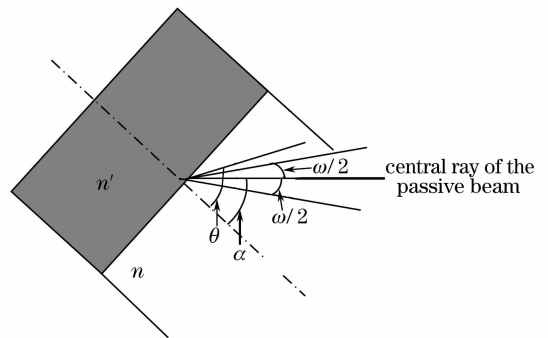


图 2 分光原理 θ 与 α 关系示意图

Fig. 2 Sketch of the beam dividing principle-connection of the θ and α

2.2 光学材料的选配

根据主被动光波的波段范围,和上述全反射分光原理,要求选用两种光学材料既要在主被动光波段均有高透过率,又要满足 $\theta \geq \alpha + \omega/2$, 和 $\theta' \leq \alpha - \omega'/2$ 。

设两种介质对主动光的折射率分别为 n_1, n_2 ; 对被动光的折射率分别为 n'_1, n'_2 , 则主动光的全反射角为 $\theta = \arcsin(n_2/n_1)$, 被动光的全反射角为 $\theta' = \arcsin(n'_2/n'_1)$ 。

由(1)式,(2)式,可得

$$\theta' + \omega'/2 \leq \alpha \leq \theta - \omega/2, \quad (3)$$

则有

$$\omega + \omega' \leq 2(\theta - \theta'). \quad (4)$$

(4)式给出了光学材料组合的选配依据,即光学材料组合对主被动光波全反射角的差异越大,可以实现的分光视场角越大。

由于主被动光均在红外波段,而且两者构成较宽的光谱带,所以能够满足同时透过主被动光波的材料较少,在此条件下,进一步能够满足全反射分光要求的材料就更加有限,在长春光机所给出的透红外材料库中,通过筛选、比较,只选出一组能够满足课题技术指标要求的光学材料:碘化铯和氟化钠。

碘化铯对于 $\lambda = 850 \text{ nm}$ 的主动光,折射率 $n_1 = 1.76290$,对于 $\lambda' = 9.7 \text{ μm}$ 的被动光,折射率 $n'_1 = 1.73937$;氟化钠对于 $\lambda = 850 \text{ nm}$ 的主动光,折射率 $n_2 = 1.32247$,对于 $\lambda' = 9.7 \text{ μm}$ 的被动光,折射率 $n'_2 = 1.24100$ 。则光从碘化铯介质入射到氟化钠介质

中时,主动光的全反射角 $\theta = \arcsin(n_2/n_1) = 48.6^\circ$,被动光的全反射角 $\theta' = \arcsin(n'_2/n'_1) = 45.5^\circ$ 。

由(4)式可得 $\omega + \omega' \leq 2(\theta - \theta') = 6.2^\circ$,即在碘化铯介质中,能够利用全反射原理分光的主被动光的全视角之和最大可达到 6.2° 。

按照使用要求,取 $\omega = 2^\circ, \omega' = 4^\circ$ 时,可得 $\alpha = 47.5^\circ$,即要求主被动光束的中心光线以 $\alpha = 47.5^\circ$ 从碘化铯介质入射到氟化钠介质表面。

2.3 分光系统结构的确定

采用两相同的直角棱镜构成复合棱镜作为分光系统的基本结构,直角棱镜的两锐角分别为 47.5° 和 42.5° ,相互接触的两斜棱面间镀对 850 nm 增透的单层氟化钠膜,如图 3 所示,来自于探测目标的主被动光束的中心光线垂直入射到碘化铯棱镜 I 的一个直棱面上,该直棱面与斜棱面间夹角为 47.5° 。这种结构的优点在于既可以保证来自目标的主被动光束的主光线在碘化铯介质中以 $\alpha = 47.5^\circ$ 入射到氟化钠介质表面,又可以使主动光在氟化钠膜层两侧是在相同介质中传播,这一点可以保证单层增透膜即可使主动光具有较高的透过率。另外,采用复合棱镜结构还

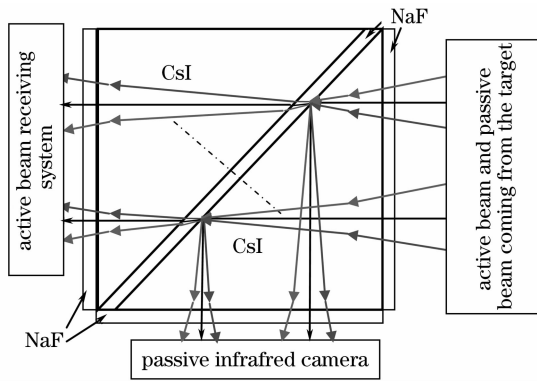


图 3 分光系统图

Fig. 3 Sketch of the beam dividing system

可以保护膜层,并兼具结构稳定,装调便易,分光精度高的特点。按照上述光路,本分光系统可以分光的空气中最大全视角角为

主动光

$$\omega_0 = 2\arcsin\left(\frac{n_1}{n_0} \sin \frac{\omega}{2}\right) = 3.5^\circ,$$

被动光

$$\omega'_0 = 2\arcsin\left(\frac{n'_1}{n'_0} \sin \frac{\omega'}{2}\right) = 6.9^\circ.$$

2.4 分光效率的计算

在两直角棱镜斜棱面间镀单层氟化钠时,由菲涅耳反射、透射系数公式,反射系数 r ,透射系数 t 分别为

$$r = \frac{\Gamma_0 m_{11} + \Gamma_0 \Gamma_s m_{12} - m_{21} - \Gamma_s m_{22}}{\Gamma_0 m_{11} + \Gamma_0 \Gamma_s m_{12} + m_{21} + \Gamma_s m_{22}}, \quad (5)$$

$$t = \frac{2\Gamma_0}{\Gamma_0 m_{11} + \Gamma_0 \Gamma_s m_{12} + m_{21} + \Gamma_s m_{22}}, \quad (6)$$

其中 $\Gamma_0 = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} n_0 \cos \theta_{i1}$, $\Gamma_s = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} n_s \cos \theta_{i2}$, $m_{11}, m_{12}, m_{21}, m_{22}$ 是特征矩阵的矩阵元,当只镀单层膜时,特征矩阵为

$$\mu = \begin{bmatrix} \cos(k_0 h) & [i \sin(k_0 h)] / \Gamma_1 \\ \Gamma_1 i \sin(k_0 h) & \cos(k_0 h) \end{bmatrix}. \quad (7)$$

当电场强度 E 垂直于入射面时, $\Gamma_1 \equiv \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} n_1 \cos \theta_{i2}$,

当电场强度 E 在入射面内时, $\Gamma_1 \equiv \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} n_1 / \cos \theta_{i2}$ 。其中 ϵ_0, μ_0, k_0 分别为真空介电常数,真空磁导率,和入射波波矢。 $\theta_{i1}, \theta_{i2}, \theta_{t2}$ 分别为入射波进入膜层前的入射角,在膜层中的折射角,和穿过膜层后在另一种介质中的折射角。 n_0, n_1, n_s 分别为膜层上表面外介质的折射率,膜层介质的折射率,和膜层下表面外介质的折射率。

将各量代入(5)式中,得

$$r = \frac{(n_0 \cos \theta_{i1} - n_s \cos \theta_{i2}) \cos(k_0 h) + i \left(\frac{n_0 n_s}{n_1} \cos \theta_{i1} \cos \theta_{i2} \cos \theta_{t2} - n_1 / \cos \theta_{i2} \right) \sin(k_0 h)}{(n_0 \cos \theta_{i1} - n_s \cos \theta_{i2}) \cos(k_0 h) + i \left(\frac{n_0 n_s}{n_1} \cos \theta_{i1} \cos \theta_{i2} \cos \theta_{t2} + n_1 / \cos \theta_{i2} \right) \sin(k_0 h)}. \quad (8)$$

本设计中,薄膜上下表面平行,且薄膜两侧介质相同,即 $n_0 = n_s$,因此有 $\theta_{i1} = \theta_{i2}$ 。则当 $\sin(k_0 h) = 0$ 时,即薄膜厚度为 $\lambda_1/2$ 时(λ_1 为主动光波长),有 $r = 0$ 。

由上分析可知,两直角棱镜斜棱面处的分光效率理论上可以达到 100% ,且由于只需镀单层膜,所

以工艺简单易于保证精度。

在棱镜的几个直角平面上采用单层氟化钠增透膜,这时,光束接近垂直入射,当

$$k_{01} h_1 = (2k_1 + 1)\pi/2, \quad (9)$$

同时,满足

$$k_{02} h_2 = (2k_2 + 1)\pi/2 \quad (10)$$

时,主被动光的反射率为

$$R = \frac{(n_0 n_s - n_1^2)^2}{(n_0 n_s + n_1^2)^2}, \quad (11)$$

若满足 $n_1^2 = n_0 n_s$, 则 $R = 0$ 。

在本设计中,由于主被动光的特定波长,(9)式、(10)式不能同时满足,只能尽可能接近。考虑主动光的相干长度,选择 $k_{01}h = 5\pi + \pi/2$, 这时, $k_{02}h = 1.514 \text{ rad}$ 。

$\lambda_1 = 850 \text{ nm}$ 时, $n_0 = 1$, $n_1 = 1.32247$, $n_s = 1.76290$, 主动光反射率为 $R_1 = 1.5 \times 10^{-5}$ 。

对于被动光, $\lambda_2 = 9.7 \mu\text{m}$, $n_0 = 1$, $n_1 = 1.2410$, $n_s = 1.73937$, 这时, 被动光反射率为 $R_2 = 3.9 \times 10^{-3}$ 。

碘化铯的厚度按 100 mm 计算, 吸收率按 0.1% 计算, 分光棱镜系统对光能的吸收率为 $\tau_1 = \tau_2 = 0.1\% \times 100/10 = 1\%$ 。

综上, 分光系统对主动光的能量利用率为

$$\begin{aligned} \eta_1 &= (1 - R_1)^2 (1 - \tau_1) = \\ &= (1 - 1.5 \times 10^{-5})^2 (1 - 1\%) = \\ &= 98.997\% \end{aligned}$$

分光系统对被动光的利用率为

$$\begin{aligned} \eta_2 &= (1 - R_2)^2 (1 - \tau_2) = \\ &= (1 - 3.9 \times 10^{-3})^2 (1 - 1\%) = \\ &= 98.229\% \end{aligned}$$

3 结 论

以高效率、小型化为目的,提出了一种主被动复合雷达分光系统的设计方案,完成了主要参数设计和性能分析。分析结果表明,采用全反射原理的分光系统,对主被动光波的分光效率都可以达到 98% 以上。该方法具有结构稳定,工艺简单,分光效率高的优点。可以实现主被动共用孔径,达到使系统小型化的目的。

参 考 文 献

- 1 C. W. Trussell. 3D imaging for army applications, laser radar and technology applications VI[C]. *SPIE*, 2001, **4377**: 126~131
- 2 Zhao Yuan, Cai Xiping, Chen Zhongxian. Overview of imaging laser radar technique[J]. *Laser & Infrared*, 2000, **30**(6): 328~330
赵 远,蔡喜平,陈锺贤. 成像激光雷达技术概述[J]. *激光与红外*, 2000, **30**(6): 328~330
- 3 Bi Jia, Wu Fuquan, Zheng Mengmeng. Study on the transmittance of Marple-Hess prism undulating with the incident angle[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(4): 716~720

- 毕 佳, 吴福全, 郑萌萌, 马普-赫斯棱镜透射比随入射角变化的波动研究[J]. *光学学报*, 2007, **27**(4): 716~720
- 4 M. C. Simon. Wollaston prism with large split angle[J]. *Appl. Opt.*, 1986, **25**(3): 369~376
- 5 Xu Xiaofeng, Zhang Fengshan, Fan Bin. The study of antireflection coatings of $600 \sim 700 \text{ nm}$ at wide angle incidence [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(9): 1173~1176
徐晓峰,张凤山,范 滨. 宽角度入射 $600 \sim 700 \text{ nm}$ 波段减反射膜的研究[J]. *光学学报*, 2004, **24**(9): 1173~1176
- 6 He Yuping, Wu Guifang, Li Aixia *et al.*. Microstructure and optical constants of sputtering Ag films with different thicknesses [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(6): 678~682
何玉平,吴桂芳,李爱侠 等. 不同厚度溅射 Ag 膜的微结构及光学常数研究[J]. *光学学报*, 2002, **22**(6): 678~682
- 7 Gu Peifu, Li Haifeng, Zhang Yaoguang *et al.*. Characteristics and improvement of dense wavelength division multiplexing (DWDM) thin film filters used in tilted incidence[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(3): 377~380
顾培夫,李海峰,章岳光 等. 用于倾斜入射的波分复用薄膜滤光片的特性及改进[J]. *光学学报*, 2003, **23**(3): 377~380
- 8 W. H. Southwell. Coating design using very thin high and low index layers[J]. *Appl. Opt.*, 1985, **24**(2): 457~460
- 9 R. Willey. Predicting achievable design performance of broadband antireflection coatings [J]. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(28): 5447~5451
- 10 P. Baumeister. Starting designs for the computer optimization of optical coatings[J]. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(22): 4835~4843
- 11 Duan Weibo, Liu Dingquan, Zhang Fengshan. Infrared dichroic filter used in multi-channel image-forming system[J]. *Infrared Millim. Waves*, 2008, **27**(5): 397~400
段微波,刘定权,张凤山. 一种用于多通道成像系统的宽光谱红外分色片[J]. *红外与毫米波学报*, 2008, **27**(5): 397~400
- 12 Zhang Jinlong, Liu Xu, Li Yiyu *et al.*. Polarization beam splitters based on one-dimensional metal-dielectric Sstructure[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(9): 1788~1792
张锦龙,刘 旭,厉以宇 等. 基于一维金属-介质周期结构的偏振分束[J]. *光学学报*, 2008, **28**(9): 1788~1792
- 13 Zhao Peitao, Zhang Yanchao, Hu Shunxing *et al.*. Design of beam-splitting optical path for differential absorption air pollution monitoring lidar[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(6): 957~961
赵培涛,张寅超,胡顺星 等. 差分吸收测污激光雷达光路分束设计[J]. *光学学报*, 2007, **27**(6): 957~961
- 14 Wu Zubin, Wang Ying, Cao Shiyong *et al.*. Phase measurement of femtosecond laser pulses using improved spectral phase interferometry for direct electric-field reconstruction technique [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(1): 21~25
吴祖斌,王 颖,曹士英 等. 用改进的光谱相位相干直接电场重构法装置测量飞秒激光脉冲的相位[J]. *中国激光*, 2006, **33**(1): 21~25
- 15 Li Yiyu, Gu Peifu, Wang Baoqing *et al.*. Filling-factor graded wavelike two-dimensional photonic crystals [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(1): 169~173
厉以宇,顾培夫,王保清 等. 填充率渐变型波状结构二维光子晶体[J]. *光学学报*, 2008, **28**(1): 169~173
- 16 Sun Xuezheng, Gu Peifu, Cheng Haixing. Novel method for calculating group delay of optical films based on multi-mirror theory[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(6): 818~821
孙雪铮,顾培夫,陈海星. 一种基于多晶理论的光学薄膜群延迟算法[J]. *光学学报*, 2006, **26**(6): 818~821