

# 空间外差光谱仪视场展宽棱镜设计理论与方法

冯玉涛<sup>1</sup> 白清兰<sup>1</sup> 王咏梅<sup>2</sup> 胡炳樑<sup>1</sup> 王姝娜<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119  
<sup>2</sup> 中国科学院空间科学与应用中心, 北京 100190  
<sup>3</sup> 长春理工大学理学院, 吉林 长春 130022

**摘要** 空间外差光谱仪采用特定楔角的棱镜实现视场拓展是提高仪器通量和辐射灵敏度的重要手段之一。借鉴传统傅里叶变换光谱仪视场展宽基础理论,结合空间外差光谱仪的技术特点,研究了基于数值归纳方法进行视场展宽棱镜设计的理论依据和实现途径。分析了不同 Littrow 角和目标波数下视场展宽棱镜顶角的最优取值及最大视场展宽容限。结果表明数值归纳方法全面衡量各级次视场对相位差的影响给出视场展宽棱镜顶角的最优取值,与传统理论推导方法相比,沿色散主截面方向视场容限提高了 10%~30%,且数值归纳方法设计空间外差视场展宽棱镜简单、直观,在设计过程中可同时分析仪器参数对视场展宽容限的影响。

**关键词** 光谱学;视场展宽;数值分析;棱镜设计;空间外差

**中图分类号** O435 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.1030001

## Theory and Method for Designing Field-Widened Prism of Spatial Heterodyne Spectrometer

Feng Yutao<sup>1</sup> Bai Qinglan<sup>1</sup> Wang Yongmei<sup>2</sup> Hu Bingliang<sup>1</sup> Wang Shu'na<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Xi'an Institute of Optics precision Mechanic of Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710119, China  
<sup>2</sup> National Space Science Center, Chinese Academy Sciences, Beijing 100190, China  
<sup>3</sup> College of Science, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

**Abstract** It is one of the most important methods to use field-widened prism to increase the throughput or sensitivity for spatial heterodyne spectrometer. This paper borrows idea from the basic principle of traditional Fourier transform spectrometer with field-widened and combines the characteristics of spatial heterodyne spectroscopy, a method based on numerical reduction to design the field-widened prism of spatial heterodyne spectrometer is proposed. The optimum apex angle of field-widened prism and the maximum field are analyzed with certain Littrow angles and scene wave-numbers. The results indicate that numerical induction method can find the optimum solution of prism apex angle by judging the effect of all orders of field angle on the phase difference. Compared with the results obtained by theoretical deduce method, the maximum field angle along dispersive principal cross section increases by 10%~30%, and the numerical induction method is simple and obvious, the influencing factors on the maximum field angle can be analyzed in the process of optimizing field-widened prism angle.

**Key words** spectroscopy; field-widened; numerical analysis; prism design; spatial heterodyne

**OCIS codes** 080.1753; 080.2720; 110.4234; 220.2740

## 1 引言

空间外差光谱仪是 20 世纪 90 年代发展起来的一种高光谱分辨率傅里叶变换光谱仪。与迈克尔孙干涉仪和法布里-珀罗干涉仪相比,空间外差光谱仪

无运动部件、对元件工艺要求低,同时具备傅里叶变换光谱仪高通量的优点<sup>[1,2]</sup>。广泛应用于星际介质辐射探测、实验室天体物理学观测和大气微量成分探测等微弱拓展目标的观测<sup>[3~6]</sup>。为满足微弱拓展

**收稿日期**: 2012-04-09; **收到修改稿日期**: 2012-06-03

**基金项目**: 国家 863 计划、国家自然科学基金(41005109)和中国科学院“西部之光”人才基金项目(Y129281213)资助课题。

**作者简介**: 冯玉涛(1980—),男,博士,副研究员,主要从事光谱成像技术方面的研究。E-mail: fytciom@126.com

目标探测的高辐射灵敏度要求,空间外差光谱仪主要从3个方面提高仪器的辐射通量和灵敏度:增大系统口径、展宽视场、降低传输损耗和干扰<sup>[7~11]</sup>。其中视场展宽技术借鉴传统傅里叶变换光谱仪视场拓展的思路,并结合空间外差光谱仪的技术特点,至今已有大量的理论研究成果和应用案例<sup>[7~12]</sup>。Harlander<sup>[13]</sup>采用理论公式推导的方法对传统窄波段空间外差光谱仪视场展宽棱镜设计进行了研究,指出利用视场展宽棱镜可以使系统通量提高约100倍;同时也对宽波段和反射式系统视场展宽棱镜设计进行了研究,并给出了初步结果。在光谱范围很窄的情况下,不考虑视场展宽棱镜的色散效应,理论公式推导可直接确定棱镜顶角,但无法直接得到允许视场的极限值。随着计算机硬件和数值计算软件的不断发展,基于计算机数值计算的设计方法日益普及,其结果简单、直观,对相关物理量分析方便。另外,在不能忽略棱镜色散效应的情况下,理论公式推导的方法繁琐、甚至无法得到解析解。针对上述问题,本文研究一种基于数值计算归纳的视场增宽棱镜设计方法,对空间外差光谱仪视场展宽棱镜的设计和工程研制有借鉴意义。

## 2 视场展宽理论基础

空间外差光谱仪基本形式是将迈克耳孙干涉仪两干涉臂的平面反射镜用两块闪耀光栅代替。对于同一入射波前,在干涉仪出口存在两个交叉出射波前相干产生菲索型干涉条纹<sup>[1]</sup>,如图1所示。采用闪耀光栅代替迈克耳孙干涉仪的平面反射镜,仪器视场(FOV)相对光轴已不再具备回转对称性。当光栅色散主截面内的视场角为 $\beta$ 、垂直光栅色散主截面方向视场角为 $\phi$ 时,对于入射光谱辐射 $B(\sigma)$ 在干涉仪出口处两相干波前的相位差可以表示为 $\Phi =$

$$2\pi x \left[ 4 \tan \theta_L \frac{\sigma - \sigma_0}{\sigma} - 2\sigma \tan \theta_L (\beta^2 + \phi^2) + o(\sigma, \beta, \phi) \right], \quad (1)$$

式中 $x$ 为探测器像元对应的干涉图采样位置, $\theta_L$ 为光栅 Littrow 角, $\sigma_0$ 为外差波数,系统视场对应的立体角可表示为 $\Omega \approx \pi(\beta^2 + \phi^2)$ 。对于轴上光束有 $\beta = \phi = 0$ ,相位差 $\Phi_0 = 2\pi x [4 \tan \theta_L (\sigma - \sigma_0) / \sigma]$ 。可见轴外与轴上视场的相位差之差 $[(1)$ 式中的二次项和高阶项 $o(\sigma, \beta, \phi)]$ 随视场角、目标波数和干涉图采样光程差的增大而变大。

傅里叶变换光谱仪视场与光谱分辨能力之间存

在相互制约关系<sup>[7~9]</sup>:

$$\Omega_{\max} = \frac{2\pi}{R}, \quad (2)$$

式中 $R = \sigma/\delta\sigma$ 为光谱分辨能力。满足(2)式确定的极限视场条件时,在最大光程差 $x_{\max}$ 和最大目标波数 $\sigma$ 下,轴外与轴上视场的相位差之差恰好为 $\pi$ ,此时轴外与轴上视场产生的干涉图恰好相差一个完整的干涉条纹<sup>[7]</sup>。传统傅里叶变换光谱仪视场展宽的基本思想是在干涉臂光路中插入特定厚度的平行平板,使轴外与轴上视场相位差的差异尽量减小,实现增大视场的目的。空间外差光谱仪干涉光路不再具有关于光轴的回转对称性,需要在干涉臂光路中插入特定楔角的棱镜实现视场拓展,棱镜主截面与光栅色散主截面重合,通过优化棱镜楔角减小轴外与轴上视场相位差的差异实现视场展宽,如图2所示。

传统空间外差光谱仪光谱范围很窄(一般几纳米到十几纳米),可不考虑视场展宽棱镜的色散效

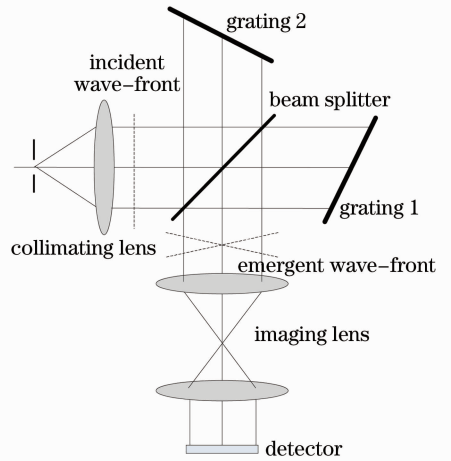


图1 空间外差光谱仪原理示意图

Fig. 1 Sketch of spatial heterodyne spectrometer

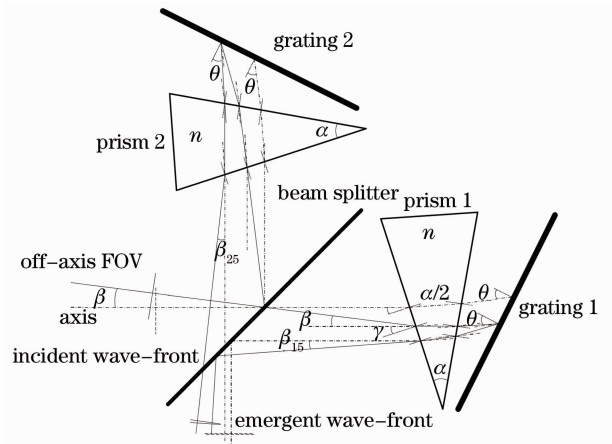


图2 单棱镜视场增宽光路示意图

Fig. 2 Light path of a single field-widened prism

应,图 2 是外差波数为  $\sigma_0$  的目标辐射经过干涉仪的光路,轴上视场对应的两个干涉臂的出射波前互相平行,光程差采样位置  $x = 0$  和  $x = x_{\max}$  具有相同的相位差(理想情况下为 0);轴外视场光束以  $\beta$  角入射到干涉仪,其对应的两个出射波前不再平行,且相位差随光程差采样位置  $x$  增大而增大。视场展宽棱镜设计即通过优化棱镜角度减小轴外与轴上视场相位差的差异。

### 3 理论推导法

根据图 2 所示的视场展宽干涉仪系统光路,沿色散主界面(MCS)和垂直色散主界面的视场角分别为  $\beta_0$  和  $\phi_0$  在“棱镜-光栅-棱镜”整个传输路径的各界面处相对于光轴的夹角可以根据斯涅尔公式和光栅方程由以下 3 组方程表示(光栅 1 干涉臂):

$$\begin{cases} n \sin \phi_{1p} = \sin \phi_0 \\ n \sin \left( \frac{\alpha}{2} + \beta_{11} \right) \cos \phi_{1p} = \sin(\gamma + \beta_0) \cos \phi_0 \\ \sin \phi_{12} = n \sin \phi_{1p} \\ \sin(\gamma - \beta_{12}) \cos \phi_{12} = n \sin \left( \frac{\alpha}{2} - \beta_{11} \right) \cos \phi_{1p} \end{cases}, (3)$$

$$\begin{cases} \phi_{13} = -\phi_{12} \\ \sin(\theta_L - \beta_{12}) = \frac{2\sigma_0 \sin \theta}{\sigma \cos \phi_{12}} - \sin(\theta_L + \beta_{13}) \end{cases}, (4)$$

$$\begin{cases} n \sin \phi'_{1p} = \sin \phi_{13} \\ n \sin \left( \frac{\alpha}{2} + \beta_{14} \right) \cos \phi'_{1p} = \sin(\gamma + \beta_{13}) \cos \phi_{13} \\ \sin \phi_{14} = n \sin \phi'_{1p} \\ \sin(\gamma - \beta_{15}) \cos \phi_{14} = n \sin \left( \frac{\alpha}{2} - \beta_{14} \right) \cos \phi'_{1p} \end{cases}, (5)$$

式中  $\alpha$  为棱镜顶角,  $n$  为棱镜折射率,  $\gamma$  为满足最小偏向角条件的光轴入射角度,  $\sin \gamma = n \sin(\alpha/2)$ 。 $\beta_{1i}$ 、 $\phi_{1i}$  为各界面上沿光栅色散主截面和垂直色散主截面的离轴角度。另一个干涉臂同样满足上述 3 组方程,有  $\beta_{2i} = -\beta_{1i}$ 、 $\phi_{2i} = \phi_{1i}$ 。则干涉仪出口处对应两出射波前的相位差可以近似表述为

$$\begin{aligned} \Phi_\Omega = 2\pi x \sigma |\beta_{15} - \beta_{25}| = 2\pi x \left\{ 4(\sigma - \sigma_0) \tan \theta_L + \right. \\ \left. 2\sigma_0^2 \left[ \frac{2(n^2 - 1) \tan \gamma}{n^2 \cos^2(\alpha/2)} - \tan \theta_L \right] + \right. \\ \left. 2\sigma_0^2 \left[ \frac{2(n^2 - 1) \tan \gamma}{n^2} - \tan \theta_L \right] + o(\sigma, \beta_0, \phi_0) \right\}, (6) \end{aligned}$$

在求解(6)式过程中忽略了棱镜色散影响,当  $\beta_0 = \phi_0 = 0$  时,为轴上光束对应的相位差  $\Phi_0 = 2\pi x [4(\sigma - \sigma_0) \tan \theta_L]$ ,与无视场展宽系统的相位差表达式一致。由视场角带来的相位差变化完全取决于视场角的二

阶项和高阶小量  $o(\sigma, \beta_0, \phi_0)$ ,通过优化棱镜顶角取值可使  $\beta_0$  或  $\phi_0$  的二次项系数为零,从而减小轴外与轴上视场相位差之差,最终获得更大的视场容限。即:

$$\begin{aligned} \frac{2(n^2 - 1) \tan \gamma}{n^2 \cos^2(\alpha/2)} - \tan \theta_L = 0, \\ \frac{2(n^2 - 1) \tan \gamma}{n^2} - \tan \theta_L = 0, \end{aligned} (7)$$

(7)式结合最小偏向角条件即可求得沿主截面方向和垂直主截面方向视场二次项系数为零时棱镜顶角。Harlander<sup>[13]</sup>指出垂直主截面方向视场二次项系数为零对应的棱镜顶角取值更利于视场展宽,但未给出具体证明,因为通过理论推导无法给出高阶小量的变化趋势。理论推导的另一个局限是在满足沿主截面方向或垂直主截面方向视场的二次项系数为零时,视场二次项的残余量与高阶小量之和未必最小,即可能未达到视场展宽的最大容限。上述问题可以利用第 4 节介绍的基于数值计算的数值归纳法解决。

### 4 数值归纳法

数值归纳法以第 2 部分阐述的傅里叶变换光谱仪极限视场的临界条件和视场展宽基本思路为依据,以数值计算的手段确定视场展宽棱镜顶角值。根据(3)~(5)式可知干涉仪出口处两波面相位差可以一般表示为

$$\begin{aligned} \Phi_\Omega = 2\pi x \sigma [F_0(\theta_L, \alpha, n) 4(\sigma - \sigma_0) / \sigma \tan \theta_L + \\ f_1(\theta_L, \alpha, n) \beta_0 + g_1(\theta_L, \alpha, n) \phi_0 + f_2(\theta_L, \alpha, n) \beta_0^2 + \\ g_2(\theta_L, \alpha, n) \phi_0^2 + o(\beta_0, \phi_0)]. \end{aligned} (8)$$

由(8)式可知轴外与轴上视场的相位差之差由视场各级次系数决定,视场展宽棱镜顶角取值应在尽量增大视场的前提下获得更小的相位差变化。至此,利用如表 1 所示的空间外差光谱仪系统参数,对上节推导得到棱镜顶角的两种取值(沿主截面方向视场二次项系数为 0 和垂直主截面方向视场二次项系数为 0)可获得的视场展宽能力进行了计算,如图 3 所示,图中实线对应沿主截面视场角二次项系数为零;点划线对应垂直主截面视场角二次项系数为零。可以得到以下 3 个结论:1)采用视场展宽棱镜极大地拓展干涉仪的视场容限,对于  $R = 10^5$  无视场展宽的空间外差干涉仪,其某一方向的极限视场(假定另一方向视场角为  $0^\circ$ )约为  $0.26^\circ$ ,可见采用视场展宽棱镜后极限视场至少提高一个量级。2)图 3 中曲线纵坐标值小于 1 的部分对应为视场允许值,可见取垂直主截面视场二次项系数为零更有利于获得较

大的视场展宽容限,很好地证明了 Harlander 给出的截面方向的视场展宽能力受到限制。  
 的结论。3)随着光栅 Littrow 角的增大,沿色散主

表 1 视场展宽外差干涉仪参数

Table 1 Parameters of field-widened spatial heterodyne spectrometer

Parameter	Value	Comment
Spectral resolution power	$10^5$	
Littrow wave number	$17900 \text{ cm}^{-1}$	
Incident wave number	$18000 \text{ cm}^{-1}$	
Prism glass	K9	
Littrow angle $\theta_L$	$10^\circ, 20^\circ, 30^\circ$	
Prism apex angle	$11.6563^\circ, 23.3577^\circ, 35.5743^\circ$	Coefficient of field angle along main cross section is zero
Prism apex angle	$11.6609^\circ, 23.3096^\circ, 34.8932^\circ$	Coefficient of field angle vertical main cross section is zero

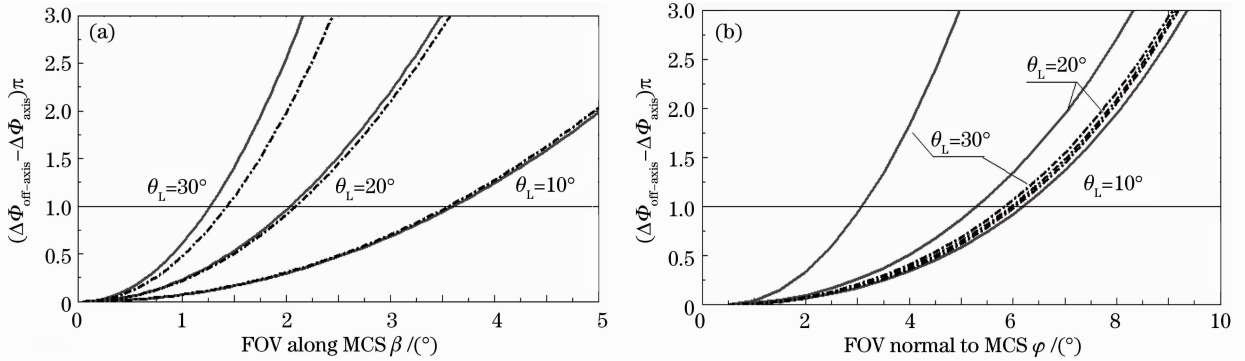


图 3 不同 Littrow 角下两个方向视场拓展能力

Fig. 3 Maximum field angle of two directions with different Littrow angles

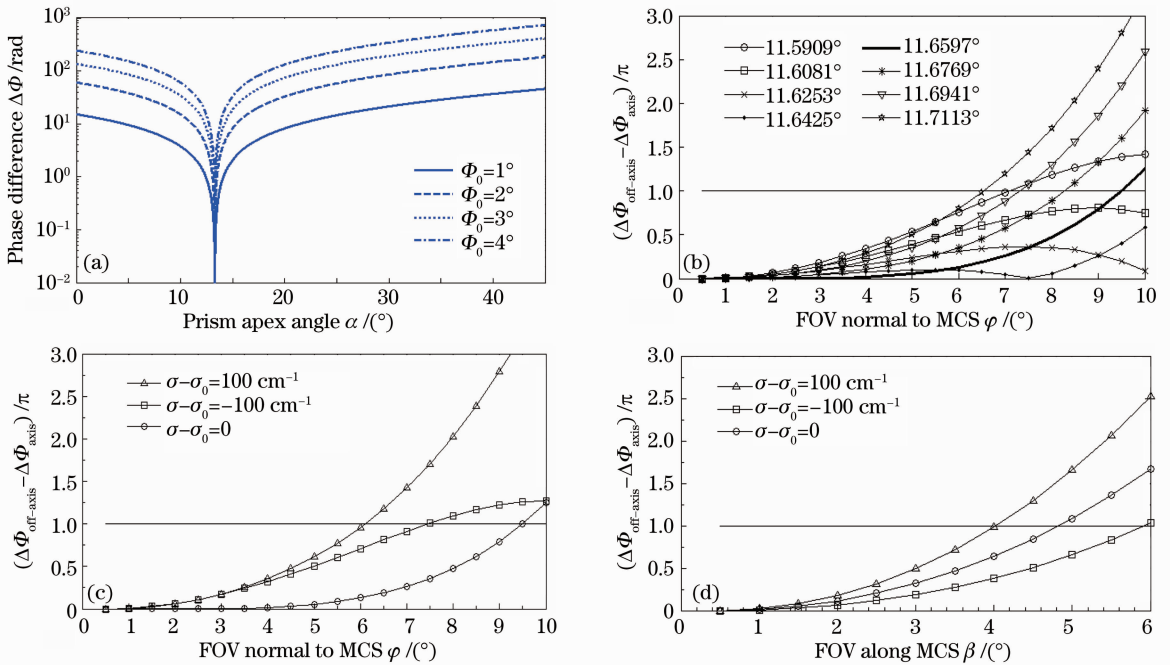


图 4  $\theta_L = 10^\circ$ , 棱镜顶角优化过程及两个方向视场容限。(a) 外差波数  $\sigma_0$  对应相位差随棱镜顶角  $\alpha$  的变化;(b) 不同棱镜顶角  $\alpha$  下,外差波数  $\sigma_0$  对应的视场容限; 最优棱镜顶角  $\alpha = 11.6597^\circ$  时(c)垂直主截面视场容限和(d)沿主截面视场容限  
 Fig. 4  $\theta_L = 10^\circ$ , the process of optimizing prism angle and the maximum viewing-field angle in two directions. (a) Change of phase difference of  $\sigma_0$  along with prism apex angle  $\alpha$ ; (b) maximum field angle of  $\sigma_0$  corresponding to different prism angle  $\alpha$ ; (c) maximum field angle normal to MCS and (d) maximum field angle along MCS at optimum prism angle  $\alpha = 11.6597^\circ$

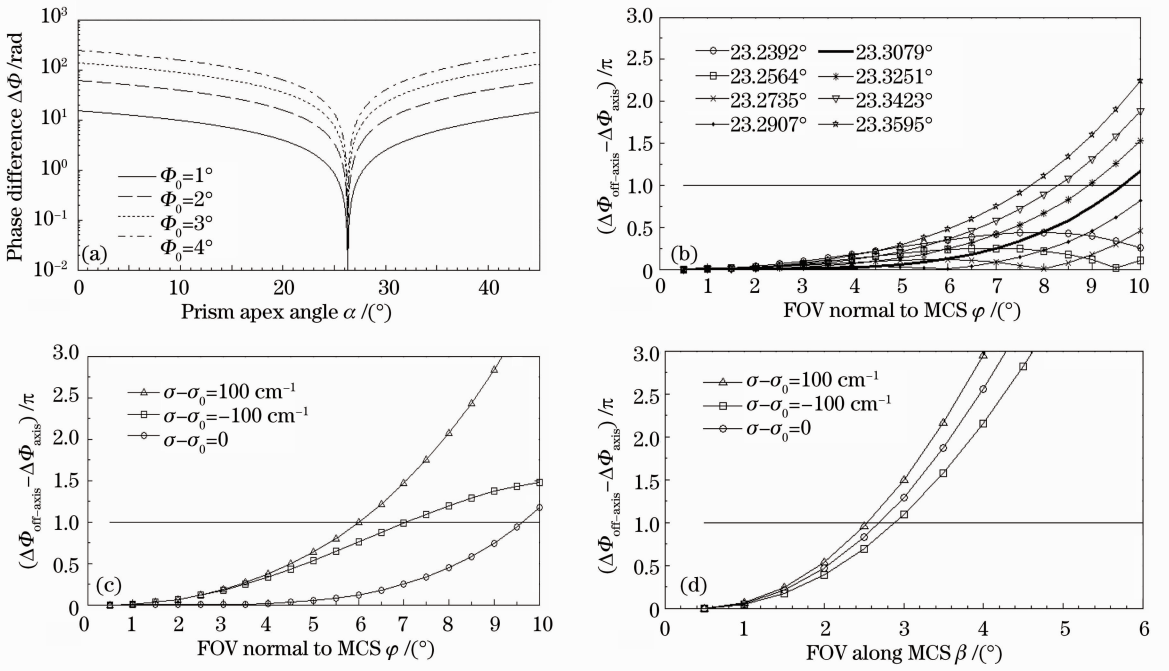


图 5  $\theta_L = 20^\circ$ ，棱镜顶角优化过程及两个方向视场容限。(a) 外差波数  $\sigma_0$  对应相位差随棱镜顶角  $\alpha$  的变化；(b) 不同棱镜顶角  $\alpha$  下，外差波数  $\sigma_0$  对应的视场容限，最优棱镜顶角  $\alpha = 23.3079^\circ$  时 (c) 垂直主截面视场容限和 (d) 沿主截面视场容限

Fig. 5  $\theta_L = 20^\circ$ , the process of optimizing prism angle and the maximum viewing-field angle in two directions. (a) Change of phase difference of  $\sigma_0$  along with prism apex angle  $\alpha$ ; (b) maximum field angle of  $\sigma_0$  corresponding to different prism angle  $\alpha$ , optimum prism angle  $\alpha = 23.3079^\circ$ , (c) maximum field angle normal to MCS and (d) maximum field angle along MCS

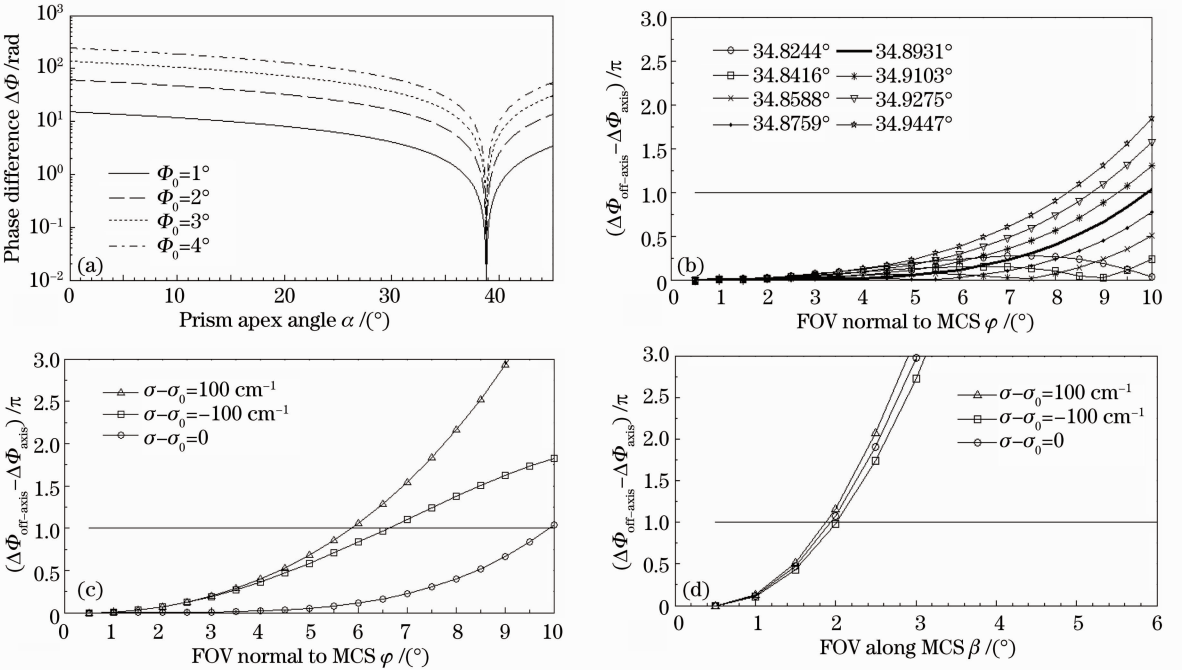


图 6  $\theta_L = 30^\circ$ ，棱镜顶角优化过程及两个方向视场容限。(a) 外差波数  $\sigma_0$  对应相位差随棱镜顶角  $\alpha$  的变化；(b) 不同棱镜顶角  $\alpha$  下，外差波数  $\sigma_0$  对应的视场容限；最优棱镜顶角  $\alpha = 34.8931^\circ$  时 (c) 垂直主截面视场容限；(d) 沿主截面视场容限

Fig. 6  $\theta_L = 30^\circ$ , the process of optimizing prism angle and the maximum viewing-field angle in two directions. (a) Change of phase difference of  $\sigma_0$  along with prism apex angle  $\alpha$ ; (b) maximum field angle of  $\sigma_0$  corresponding to different prism angle  $\alpha$ , optimum prism angle  $\alpha = 34.8931^\circ$ , (c) maximum field angle normal to MCS and (d) maximum field angle along MCS

结合(8)式与上述分析结论可给出基于数值归纳方法设计视场展宽棱镜的具体技术途径:即在一定的 Littrow 角、棱镜材料和视场角下改变棱镜顶角,满足视场展宽条件时,Littrow 波数对应的相位差存在极小值,该极小值对应的棱镜顶角附近小范围内获得最大视场展宽能力的角度值即为视场展宽棱镜顶角的最优值。图 4~6 为基于表 1 数据采用数值归纳法求解视场增宽棱镜顶角的过程及结果。由图 4(a)、5(a)、6(a)可以看出随棱镜顶角  $\alpha$  变化,不同视场角入射辐射的外差波数对应的相位差存在极小值,说明视场展宽棱镜顶角存在最优化值。图 4(b)、5(b)、6(b)为棱镜顶角在相位差极小值对应点一侧的单调区间内取值,外差波数对应的轴外与轴上视场相位差之差随视场变化情况,其满足随视场单调递增关系,且可获得最大视场容限的曲线对应的棱镜顶角角度为最优化值。从图 4~图 6 的 (c)、(d)可以看出,随着光栅 Littrow 角增大,沿垂直主截面方向的极限视场变化不大,而沿主截面方向的极限视场明显变小。另外,目标波数距外差波数越远,视场容限越小,外差波数  $\sigma_0$  具有最大的视场展宽容限,且  $\sigma_0 + \Delta\sigma$  与  $\sigma_0 - \Delta\sigma$  的目标波数具有不同的视场展宽容限,在仪器具体设计时要根据具体应用的光谱范围确定可达到的视场极限值。

表 2 列出采用理论推导方法和数值归纳法求得的棱镜顶角及对应极限视场角。对比可见采用数值归纳法综合考虑视场各级次对相位差的影响,给出最优的棱镜顶角取值,使色散主截面内视场角的极限值提高了 10%~30%。

表 2 两种方法得到的棱镜顶角值和极限视场

Table 2 Optimum prism angle and the maximum field angle corresponding to two methods

	Theoretical deduction method / (°)	Numerical induction method / (°)	
$\alpha$	11.6609	11.6597	
$\theta_L = 10^\circ$	$\beta_{\max}$	3.625	
	$\varphi_{\max}$	6.04	
	$\alpha$	23.3096	23.3079
$\theta_L = 20^\circ$	$\beta_{\max}$	2.08	2.58
	$\varphi_{\max}$	6.01	6.025
	$\alpha$	34.8932	34.8931
$\theta_L = 30^\circ$	$\beta_{\max}$	1.438	1.88
	$\varphi_{\max}$	5.8	5.85

## 5 结 论

结合空间外差光谱仪技术特点和傅里叶变换光谱仪视场展宽技术原理,分析了空间外差光谱仪视场展宽棱镜设计基本理论,提出了基于数值归纳方法进行视场展宽棱镜设计的理论依据和实现途径,该方法全面衡量各级次视场对相位差的影响给出视场展宽棱镜顶角的最优取值,获得最大视场容限。对比理论推导方法,数值归纳方法设计空间外差视场展宽棱镜简单、直观,在设计过程中可同时分析仪器参数对视场展宽容限的影响,更有利于仪器工程实践中的设计和研制。

## 参 考 文 献

- 1 J. M. Harlander, F. L. Roesler, C. R. Englert. Spatial heterodyne spectroscopy for high spectral resolution space-based remote sensing [J]. *Optics & Photonics News*, 2004, **15**(1): 46~51
- 2 F. L. Roesler. An overview of the SHS technique and applications [C]. Santa Fe:OSA/FTS, 2007. FTuC1
- 3 S. Watchorn, F. L. Roesle, J. Harlander. Development of the spatial heterodyne spectrometer for VUV remote sensing of the interstellar medium [C]. *SPIE*, 2001, **4498**: 284~296
- 4 J. E. Lawler, Z. E. Labby, F. L. Roesler. A spatial heterodyne spectrometer for laboratory astrophysics first interferogram [C]. *SPIE*, 2001, **4498**: 284~296
- 5 Xiong Wei, Shi Hailiang, Wang Yuanjun *et al.*. Study on near-infrared spatial heterodyne spectrometer and detection of water vapor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(5): 1511~1516
- 熊 伟, 施海亮, 汪元钧 等. 近红外空间外差光谱仪及水汽探测研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(5): 1511~1516
- 6 J. M. Harlander, F. L. Roesler, J. G. Cardon. SHIMMER: a spatial heterodyne spectrometer for remote sensing of Earth's middle atmosphere [J]. *Appl. Opt.*, 2001, **41**(7): 1343~1352
- 7 R. J. Bell. Introductory Fourier Transform Spectroscopy [M]. New York and London: Academic Press, 1972. 141~152
- 8 Fu Qiang, Xiangli Bin, Jing Juanjuan. System signal-to-noise ratio analysis based on imaging chain model in multispectral remote sensing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(2): 0211001
- 付 强, 相里斌, 景娟娟. 基于多光谱遥感成像链模型的系统信噪比分析[J]. *光学学报*, 2012, **32**(2): 0211001
- 9 Vidi Saptari. Fourier Transform Spectroscopy Instrument Engineering [M]. Washington USA: SPIE Press, 2004. 99~109
- 10 Fu Jianguo, Liang Jingqiu, Liang Zhongzhu. Analysis and design for the optical system of a static infrared Fourier transform spectrometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(2): 0222006
- 付建国, 梁静秋, 梁中翥. 一种静态傅里叶变换红外光谱仪的光学系统分析与设计[J]. *光学学报*, 2012, **32**(2): 0222006
- 11 Zheng Ying, Liang Zhongzhu, Liang Jingqiu. Simulation and fabrication of multi-micro mirror used in infrared spectrometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(12): 1222005
- 郑 莹, 梁中翥, 梁静秋. 红外光谱仪多级微反射镜模拟分析及制作研究[J]. *光学学报*, 2011, **31**(12): 1222005
- 12 Wu Yan, Tang Yi, Liu Jianpeng *et al.*. Optics design of far ultraviolet imaging spectrometer for ionosphere remote sensing [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(1): 0122001
- 吴 雁, 唐 义, 刘健鹏 等. 电离层遥感远紫外成像光谱仪光学系统设计[J]. *光学学报*, 2012, **32**(1): 0122001
- 13 J. M. Harlander. Spatial Heterodyne Spectroscopy: Interferometric Performance at Any Wavelength Without Scanning [D]. Madison: University of Wisconsin, 1991. 20~110