

多光束干涉光谱成像技术

杜述松^{1,2} 王咏梅³ 陶 然¹

(¹ 中国科学院光电研究院, 北京 100094; ² 中国科学院大学, 北京 100049)
³ 中国科学院空间科学与应用研究中心, 北京 100190

摘要 法布里-珀罗(F-P)干涉仪是一种多光束干涉仪,具有极高的光谱分辨率,一般用于研究光谱的精细结构。F-P干涉仪的应用受限于自由光谱范围,如果波长超过自由光谱范围,将无法得到光谱的精细结构。基于F-P干涉仪,采用方程组来描述干涉图与光谱曲线之间的关系,并通过奇异值分解方法来解方程组,求出宽谱段范围的光谱曲线,使F-P干涉仪成为一种多光束干涉光谱成像仪,可用于遥感等领域;但奇异值分解法求解光谱曲线,对图像噪声较为敏感,通过仿真结果可以看出,干涉图噪声需控制在0.2%以内才能较好地复原出光谱曲线。

关键词 光谱学;法布里-珀罗干涉仪;光谱复原;自由光谱区;奇异值分解;谱分辨率

中图分类号 O433.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0830003

Multiple Beam Interferential Spectral Imaging Technology

Du Shusong^{1,2} Wang Yongmei³ Tao Ran¹

¹ Academy of Opto-Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China

² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

³ Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

Abstract Fabry-Perot (F-P) interferometer is a kind of multiple beam interferometer. It has very high spectral resolution, and can be used to research fine structure of the matter. The application of F-P interferometer is limited by the free spectral range. The fine structure of the matter will not be got when the bandwidth of the light surpass the free spectral range. Based on the F-P interferometer, we describe the relationship between the interference pattern and the spectral curve as equation sequence. The equation sequence is solved by the singular value decomposition, and the wide bandwidth spectral curve will be got. By this way F-P interferometer can be used as a spectral imaging instrument. But the algorithm is sensitivity to the noise of the interference pattern. After some simulation work, we find the noise of the interference pattern should be less than 0.2%.

Key words spectroscopy; Fabry-Perot interferometer; retrieve of the spectrum; free spectral range; singular value decomposition; spectral resolution

OCIS codes 120.2230; 120.3180; 120.6200; 070.4790

1 引 言

光谱成像技术是 20 世纪 80 年代出现的一种遥感技术,由于可以获取目标的图谱信息,该技术近年来获得了快速的发展。首先进入应用领域的光谱成像技术是基于棱镜或光栅的色散型光谱成像仪^[1],后来以迈克耳孙为代表的空间调制干涉光谱成像仪由于具有高通量的优势,在大气风场等领域得到了

广泛应用^[2]。但是,时间调制的干涉成像光谱仪具有运动部件,仪器的可靠性较低,因此空间调制和时空联合调制的干涉成像光谱技术逐渐成为新的研究热点。典型的空间调制干涉成像光谱仪有萨格奈克干涉成像光谱仪,与迈克耳孙等时间调制干涉成像光谱仪相比,萨格奈克无运动部件,可靠性更高^[3];另一类空间调制干涉成像光谱仪是空间外差式干涉

收稿日期: 2013-04-01; 收到修改稿日期: 2013-04-15

作者简介: 杜述松(1980—),男,助理研究员,主要从事航空航天领域光谱成像技术以及新型计算成像等方面的研究。

E-mail: dushusong@aoe.ac.cn

光谱成像仪,由于具有外差特性,可获取高的光谱分辨率,且能有效减少数据量,在大气成分探测领域得到了较好的应用^[4-5];结合时间调制与空间调制的特点,时空联合调制干涉成像光谱仪在获取图像的同时能获取目标的光谱信息,具有高通量、高稳定性等优点^[6],并在航天领域得到了实际应用。同时,近场像面干涉等新型高光谱干涉仪也被广泛研究^[7]。

法布里-珀罗(F-P)干涉仪是一种多光束干涉仪,与双光束干涉仪相比较,具有极高的光谱分辨率,可被用于中高层大气风场探测以及物质成分精细分析等领域^[8]。传统的F-P干涉仪其光谱分辨率由标准具的间距来决定,间距越大分辨率越高,但是另一方面F-P干涉仪的光谱范围受限于其自由光谱范围,如果谱段范围超出其自由光谱区,则会出现光谱混叠,无法获取目标的光谱信息。

传统的F-P干涉仪只能用于极窄的光谱范围,这是由于其数据处理采用的是直观的几何处理方法,只有当两种谱线的干涉环在探测器上被完全分开,才能被分辨。但是,如果不直接从干涉曲线当中获取光谱信息,而是采用类似于傅里叶变换的方法

对干涉环曲线进行处理,则可以获取目标宽谱段范围的光谱信息,使F-P干涉仪可应用于光谱成像领域。这种多光束干涉光谱成像仪具有结构简单、光谱分辨率高等优点,可以用于航空航天等遥感领域,也可用于小型化的光谱成像设备。

2 F-P干涉仪简介

2.1 F-P干涉仪基本原理

1899年,法国物理学家和数学家共同发现了F-P干涉现象。F-P干涉仪结构十分简单,如图1(a)所示,核心部分是两块相互平行的玻璃板,在两块平板的外表面镀增透膜,而在两块平板相对的内表面均镀反射膜。当一条光线进入两块相互平行的平板时,在平板内部将产生多次反射,从而形成多束相互平行的光线 $E_1, E_2, E_3, \dots, E_t$,而且这 t 束光线每两束相邻的光线之间具有相同的光程差,因此当这 n 束光线经过一成像镜后将在探测器上得到物点的干涉图,而当对物点以不同的入射角进行扫描时,在探测器上将得到干涉环,理论的干涉环如图1(b)所示。

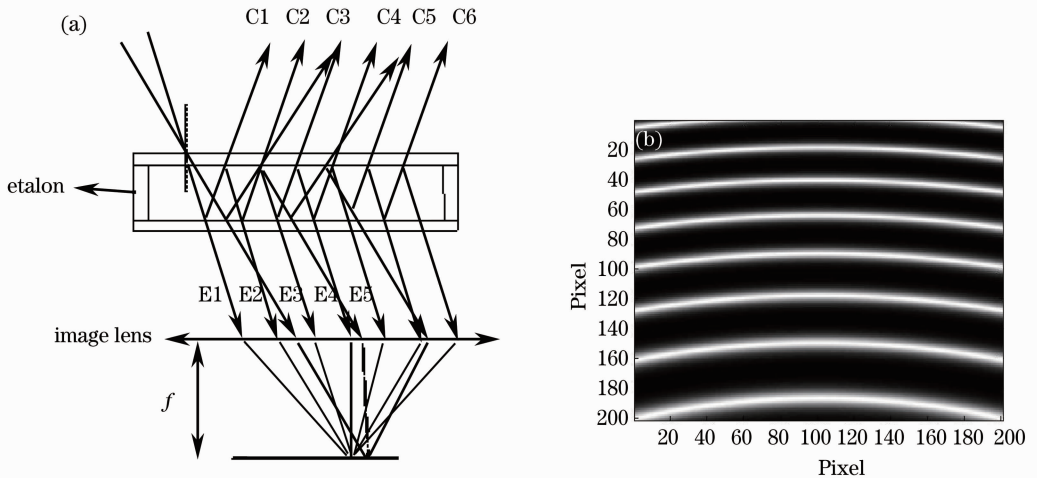


图1 (a) F-P干涉仪原理; (b)干涉环

Fig. 1 (a) Principle of the F-P interferometer; (b) interference fringes

在图1(a)中,光线在平板玻璃间反射次数越多,得到的干涉环亮条纹的宽度将会越窄,其光谱分辨率也将越高。另外,F-P干涉仪结构十分简单,相比较于迈克耳孙或萨格奈克干涉仪,F-P干涉仪具有更加紧凑的结构,且也无运动部件,F-P干涉还在光纤光学、激光学中有着广泛的应用^[9],例如采用光纤F-P可调谐滤波器来获取光谱,是白光干涉仪获取光谱的重要手段之一^[10]。

在图1(a)中,如果进入标准具之前的光线经过

一准直系统而变成一系列平行光线,这些平行光线经过F-P标准具后形成多光束干涉,并经过成像透镜重新会聚到一点上而得到了包含了干涉信息的目标像点。F-P干涉成像光谱仪原理如图2所示,由光学成像概念可知由一点所发出的光线经过光学系统后重新会聚于一点,会聚点即其像点,当探测器为二维探测器,则可以获取目标包含干涉信息的空间图像。

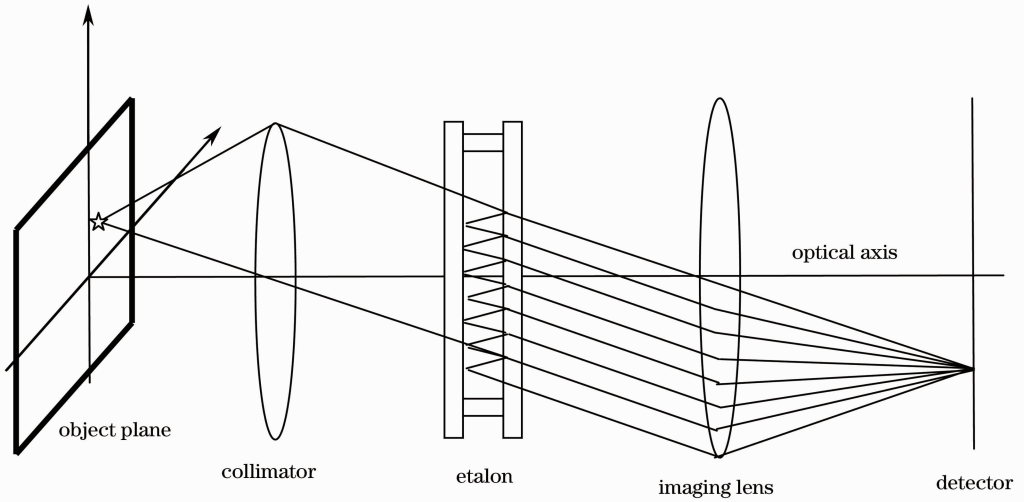


图 2 F-P 干涉成像光谱仪原理

Fig. 2 Principle of the F-P interferential imaging spectrometer

2.2 F-P 干涉仪基本公式

F-P 的透射光线在探测器上的强度表达式为^[11]

$$I^{(t)} = I^{(i)} \frac{(1-R)^2}{(1-R)^2 + 4R \sin^2\left(\frac{\delta}{2}\right)} = I^{(i)} \frac{1}{1 + \frac{4R}{(1-R)^2} \sin^2\left(\frac{\delta}{2}\right)} = I^{(i)} \frac{1}{1 + F \sin^2\left(\frac{\delta}{2}\right)}, \quad (1)$$

式中 $R = r^2 = r'^2$, r, r' 分别为上下两块玻璃板的反射率, $I^{(i)}$ 为入射光的强度, 一般情况下入射光为单色光. δ 为相邻两束光之间的相位差, 可以表示为^[7]

$$\delta = \frac{4h\pi n' \cos \theta}{\lambda}, \quad (2)$$

式中 h 为标准具两块平板的间距, n' 为标准具平板间介质的折射率, θ 为入射光进入平板后的折射角, λ 为入射光波长. 显然, 随着 h 的增大, 两束相邻光线之间的光程差将会增大.

由(1)式可以看出, 当相位差满足 $\delta = 2\pi$ 时, 透射光强度将等于入射光的强度, 也即在探测器上出现干涉极大值; 而当 $\delta \neq 2\pi$, 且 $F = \frac{4R}{(1-R)^2}$ 是一个较大的值时, 透射光的强度将随着相位差的变化迅速下降, 也即干涉条纹的宽度变窄, 这便是 F-P 干涉仪具有极高光谱分辨率的原因.

当入射光包含两种波长之差为 $\Delta\lambda$ 的相邻波长, 这两种波长的中间波长为 λ_0 , 由 $\Delta\lambda$ 所引起的相位改变为 ϵ , 相位差为 δ , 在探测器上得到二者叠加的干涉图强度可以表示为

$$I(\delta, \epsilon) = I\left(\delta + \frac{\epsilon}{2}\right) + I\left(\delta - \frac{\epsilon}{2}\right) = \frac{I_0}{1 + F \sin^2\left(\frac{\delta + \frac{\epsilon}{2}}{2}\right)} + \frac{I_0}{1 + F \sin^2\left(\frac{\delta - \frac{\epsilon}{2}}{2}\right)}. \quad (3)$$

根据瑞利判据, 如果要分辨这两种波长, 则 ϵ 应满足

$$\frac{2I_0}{1 + F \sin^2\left(\frac{\epsilon}{4}\right)} = 0.81 \left[I_0 + \frac{I_0}{1 + F \sin^2\left(\frac{\epsilon}{2}\right)} \right]. \quad (4)$$

当条纹很细时, ϵ 远小于 $\pi/2$, 可以有 $\sin \epsilon \approx \epsilon$, 因此可通过(4)式求出可以分辨的两种波长的相位最小差值应满足

$$\epsilon = \frac{4.15}{\sqrt{F}}. \quad (5)$$

当标准具间距 h 相对于波长很大时, 则可以分辨的两种波长的相位差可以表示为

$$|\Delta\delta| = \frac{4\pi n' h \cos \theta}{\lambda_0} - \frac{4\pi n' h \cos \theta}{\lambda_0 + \Delta\lambda} \approx \frac{4\pi n' h \cos \theta}{\lambda_0^2} \Delta\lambda = 2\pi m' \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0}. \quad (6)$$

若两种波长刚好可以被分辨, 即(5)式与(6)式相等, 可得

$$\frac{\lambda_0}{\Delta\lambda} = 2\pi m' \frac{\sqrt{F}}{4.15}. \quad (7)$$

F-P 干涉仪的另一个重要的参数是自由光谱范围, 自由光谱范围物理意义在于, 当两种波长 λ_1, λ_2 之差 $\Delta\lambda$ 等于自由光谱范围的时候, 这两种波长的光在探测器上的干涉环将完全重合在一起, 但是其

干涉级次有差别,这时无法将这两种波长的光区分开。自由光谱范围可以表示为^[7]

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{2n/h}. \quad (8)$$

显然, h 越大,其光谱分辨率越高,但是自由光谱范围也越小,例如:当波长 $\lambda = 630 \text{ nm}$,标准具间距 $h = 10 \text{ mm}$,介质为真空时,自由光谱范围 $\Delta\lambda = 0.02 \text{ nm}$,如此小的自由光谱范围使得以往的 F-P 干涉仪只能用于谱段范围极窄的特殊领域,而一般不用作成像光谱仪。

3 多光束干涉成像光谱仪理论

3.1 多光束干涉成像光谱仪基本构成

多光束干涉成像光谱仪以传统的 F-P 干涉仪为基础。传统的 F-P 干涉仪由于受到自由光谱区的限制,一般都需在光线进入标准具前加极窄带的干涉滤光片,以保证不出现光谱混叠现象。多光束干涉成像光谱仪系统中将去除窄带干涉滤光片,一台典型的多光束干涉成像光谱仪如图 3 所示,系统中包含了准直系统、F-P 标准具、成像系统以及探测器系统。

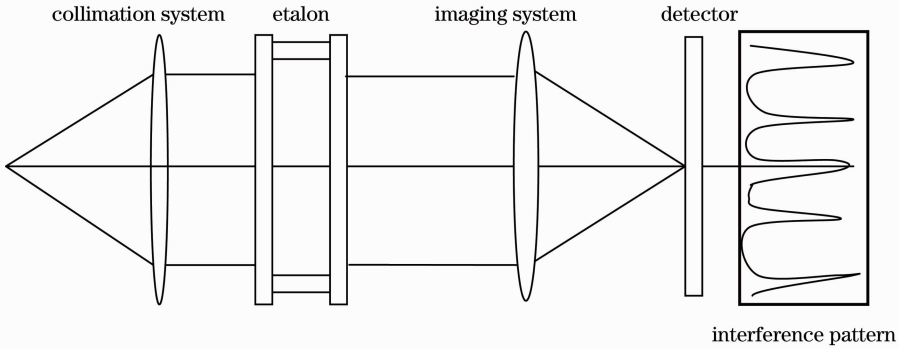


图 3 多光束干涉成像光谱仪

Fig. 3 Multiple beam interferential imaging spectrometer

多光束干涉成像光谱仪可以获取宽谱段范围的光谱曲线,可以用于航空航天遥感领域。相比普通的相机,多光束干涉成像光谱仪在光路中增加了 F-P 标准具,这样将一束光线经过多次反射后变成了多束相互平行的相干光,从而可以在像面上获得包含干涉信息的图像。

3.2 奇异值分解算法

奇异值分解是线性代数中的一种重要的矩阵分解,是矩阵分析中正规矩阵酉对角化的一种推广,在信号处理和统计学中有着重要的应用价值。假设需求解线性方程组

$$\mathbf{A}\mathbf{X} = \mathbf{B}, \quad (9)$$

式中矩阵 \mathbf{A} 是一个 $m \times n$ 矩阵 ($m \geq n$), \mathbf{X} 为 n 维列向量, \mathbf{B} 为 m 维列向量。如果 $\mathbf{A} \in \mathbf{R}^{m \times n}$, 那么存在正交方阵 $\mathbf{U} \in \mathbf{R}^{m \times m}$ 和 $\mathbf{V} \in \mathbf{R}^{n \times n}$ 满足

$$\mathbf{A} = \mathbf{U}\mathbf{\Sigma}\mathbf{V}^*, \quad (10)$$

式中

$$\mathbf{\Sigma} = \begin{pmatrix} \mathbf{S} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{pmatrix}. \quad (11)$$

$\mathbf{S} = \text{diag}(s_1, s_2, \dots, s_r)$ 且 $s_1, s_2, \dots, s_r > 0$, 此时 $s_1, s_2, \dots, s_r > 0$ 与 $s_{r+1}, s_{r+2}, \dots, s_n = 0$ 一起被称为矩阵 \mathbf{A} 的奇异值,在数值上与矩阵 $\mathbf{A}^* \mathbf{A}$ 的特征值平方根相等。矩阵 \mathbf{U} 的列称为 \mathbf{A} 的左奇异向量,矩阵 \mathbf{V} 的列

称为 \mathbf{A} 的右奇异向量。(11)式即为矩阵 \mathbf{A} 的奇异值分解表达式。求解(9)式方程组,其实就是求解向量 \mathbf{X} ,使其满足

$$\|\mathbf{A}\mathbf{X} - \mathbf{B}\|_2 = M_{\min}, \quad (12)$$

式中 M_{\min} 为等号左边可取到的最小值。显然,如果(12)式中的矩阵 \mathbf{A} 的秩小于 n ,则满足方程组的向量 \mathbf{X} 将不是唯一的,但是存在向量 $\hat{\mathbf{X}}$ 满足

$$\hat{\mathbf{X}} = \mathbf{A}^+ \mathbf{B} = \mathbf{V}\mathbf{\Sigma}^+ \mathbf{U}^* \mathbf{B}, \quad (13)$$

使得 $\hat{\mathbf{X}}$ 为方程组最小模解,这便是奇异值分解法求解方程组的原理。

3.3 奇异值分解法的多光束干涉光谱复原

(1)式所描述的透射光强度是单色光的情况,如果进入多光束干涉成像光谱仪的光是波数范围为 $\sigma_1 \sim \sigma_2$ 的复合光,则在探测器上得到的透射光强度可以改写成

$$I(x) = \int_{\sigma_1}^{\sigma_2} \frac{(1-R)^2}{(1-R)^2 + 4R\sin^2(2h\sigma\pi n' \cos \theta)} B(\sigma) d\sigma. \quad (14)$$

如果考虑离散化的情况,(14)式可进一步改写成

$$I(x_i) = \sum_{j=i}^n \frac{(1-R)^2}{(1-R)^2 + 4R\sin^2(2h\sigma_j\pi n' \cos \theta)} B(\sigma_j), \quad (15)$$

式中 $I(x_i)$ 为探测器上所获取的干涉强度, $B(\sigma)$ 为未知的光谱信息, 多光束干涉成像光谱仪获取目标的光谱曲线就是在获取同一目标点在不同入射角 θ

情况下的干涉强度 $I(x_i)(i = 1, \dots, m)$ 后, 通过解方程组

$$\begin{cases} I(x_1) = \sum_{j=1}^n \frac{(1-R)^2}{(1-R)^2 + 4R\sin^2(2h\sigma_j\pi n' \cos \theta_1)} B(\sigma_j) \\ I(x_2) = \sum_{j=1}^n \frac{(1-R)^2}{(1-R)^2 + 4R\sin^2(2h\sigma_j\pi n' \cos \theta_2)} B(\sigma_j) \\ \vdots \\ I(x_m) = \sum_{j=1}^n \frac{(1-R)^2}{(1-R)^2 + 4R\sin^2(2h\sigma_j\pi n' \cos \theta_m)} B(\sigma_j) \end{cases} \quad (16)$$

来得到 $B(\sigma_j)(j = 1, 2, \dots, n)$ 。

如果, 令

$$K(i, j) = \frac{(1-R)^2}{(1-R)^2 + 4R\sin^2(2h\sigma_j\pi n' \cos \theta_i)} \quad (17)$$

则方程组(16)可以简写为

$$\mathbf{I} = \mathbf{KB}. \quad (18)$$

通过多光束干涉光谱成像仪求解光谱 \mathbf{B} 就是求解方程组(18), 当 $m \geq n$ 时, 采用奇异值分解的方法求解方程组(18)所得到的解是其最小模解, 即可认为是复原光谱, 且可以通过该方法获取目标的宽波段信息。

4 多光束干涉成像光谱仪仿真分析

4.1 理想情况仿真

首先, 考虑干涉图为理想情况下获取, 通过奇异值分解法求解光谱曲线的情况。假设波数范围 $\sigma_1 \sim \sigma_2$ 为 $1111.1 \sim 2500 \text{ mm}^{-1}$, F-P 标准具间距为 2 mm , 谱段数取 100 个, 采样点数取 200 个, 干涉光谱成像仪一次成像可以获取目标点一次干涉信息, 通过推扫获取 200 幅图像便可获取同一点的干涉曲线, 当干涉图无噪声时, 图 4 为原始光谱和复原光谱结果。

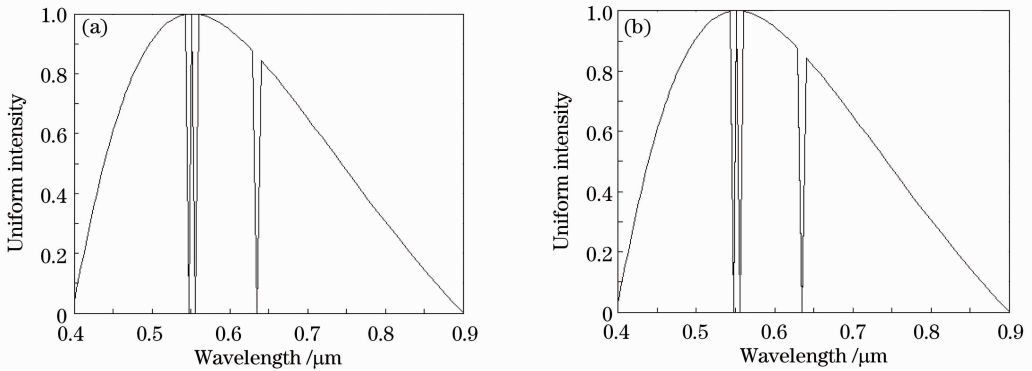


图 4 理想情况下复原光谱情况。(a) 原始光谱; (b) 复原光谱

Fig. 4 Retrieved spectra under the ideal situation. (a) Original spectrum; (b) retrieved spectrum

通过图 4 可以看出, 在理想情况下, 对于宽波段范围的入射光, 通过奇异值分解的方法可以完全复原出原始光谱。当入射光为单色光或者波长范围较小的情况下, 可以通过奇异值分解的方法求出光谱曲线。

4.2 添加噪声情况下仿真

通过 4.1 节可以看出, 没有噪声的情况下, 通过奇异值分解的办法可以很好地复原出光谱曲线。但是, 在实际情况下, 干涉成像光谱仪一般都是通过

CCD 探测器来获得干涉图, 实际的干涉图中将会包含多种噪声, 例如 CCD 探测器的暗电流、电子系统噪声、光学系统杂散光、光学系统装调误差带来的噪声等^[12], 因此, 实际上干涉图总有一定的噪声。如果定义信噪比(SNR)为平均信号与平均噪声之比, 当 SNR 的值 V_{SNR} 分别等于 50、40 的时候, 也即噪声约为信号的 0.1%、1% 的情况下, 仿真结果如图 5 所示。

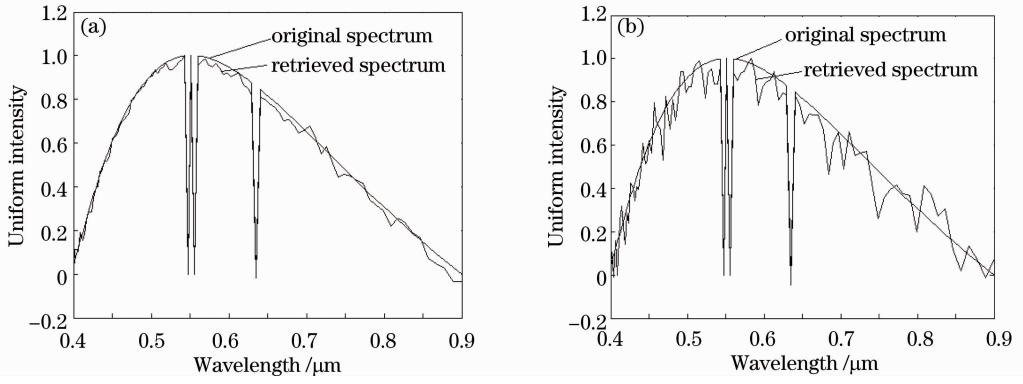


图 5 有噪声时光谱复原情况。(a) $V_{\text{SNR}} = 50$; $V_{\text{SNR}} = 40$

Fig. 5 Retrieved spectra with noises. (a) $V_{\text{SNR}} = 50$; $V_{\text{SNR}} = 40$

从仿真结果很容易看出,当 $V_{\text{SNR}} = 50$ 的时候,通过奇异值分解的算法,多光束干涉光谱成像仪仍然可以较好地复原出光谱信息,定义均方根误差为

$$E = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [B(i) - B_r(i)]^2}{N}}, \quad (19)$$

式中 B 为原始光谱, B_r 为复原光谱, N 为谱段数,对应于不同的 SNR 值,复原光谱的均方根误差 (RMSE) 如表 1 所示。

表 1 不同信噪比情况下多光束干涉复原光谱的 RMSE

Table 1 RMSE of the multiple beam interferential retrieve spectra under different SNRs

Number	SNR value	RMSE of the retrieved spectrum / %
1	10	22.6
2	20	6.7
3	30	2
4	40	0.8
5	50	0.2
6	60	0.07
7	80	0.007

由表 1 的结果可知,当信噪比 $V_{\text{SNR}} = 50$ 时,光谱复原误差为 0.2%,此时可认为精确复原了光谱;当信噪比 $V_{\text{SNR}} = 40$ 时,光谱复原误差为 0.8%,基本可以复原出原始光谱,不会出现伪吸收峰,若探测目标为典型的发射线或吸收峰,此时仍然能复原;但是当 $V_{\text{SNR}} = 30$ 时,光谱复原误差为 2%,这会出现明显的伪吸收峰,复原光谱已经不可信了。因此,对于遥感应用,若光谱分辨率要达到 5 nm,则信噪比需达到 50,也即信号均值与噪声均值之比为 316 时,多光束干涉光谱成像仪可以较好地复原出原始光谱,这比一般的干涉光谱成像仪要求更高。

4.3 多光束干涉成像光谱仪分辨率分析

如果测量的波数范围为 $\sigma_1 \sim \sigma_2$,波数分辨率为

$\delta\sigma$,那么总的谱段数 $N = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\delta\sigma}$,由 2.2 节讨论可知,F-P 干涉仪的理论光谱分辨率由

$$\frac{\lambda_0}{\Delta\lambda} = 0.96m' \frac{\pi\sqrt{R}}{1-R} = 0.96 \times \frac{2hn' \cos \theta}{\lambda_0} \times \frac{\pi\sqrt{R}}{1-R} \quad (20)$$

决定。 $0.96m'F_1$ 被称为是有效光束数,其中 $F_1 = \frac{\pi\sqrt{R}}{1-R}$ 而在光谱学领域,用波数分辨率的方法来分分析往往更为有效,如果已知光谱分辨率,波数分辨率为

$$\delta\sigma = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0^2}, \quad (21)$$

将(20)式代入(21)式可得

$$\delta\sigma = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0^2} = \frac{1}{2hn' \cos \theta \times 0.96F_1}. \quad (22)$$

由(20)式和(22)式可以看出,为了获得高的光谱分辨率可以增大标准具的间距、增大标准具介质折射率以及提高反射率 R 。进一步,假定

$$P = 0.96 \times F_1 = 0.96\pi \times \frac{\sqrt{R}}{1-R}, \quad (23)$$

则(22)式化简成

$$\delta\sigma = \frac{1}{2hn' \cos \theta P}. \quad (24)$$

因此,多光束干涉光谱成像仪的波数分辨率主要由标准具间距和标准具的玻璃板反射率决定,其关系如图 6 所示。

5 结 论

通过理论分析,突破了由于受限于自由光谱区 F-P 干涉仪仅能用作干涉仪的传统,将 F-P 干涉仪用于光谱成像领域,设计并仿真一种新的多光束干涉光谱成像仪,通过奇异值分解的方法求解多光束

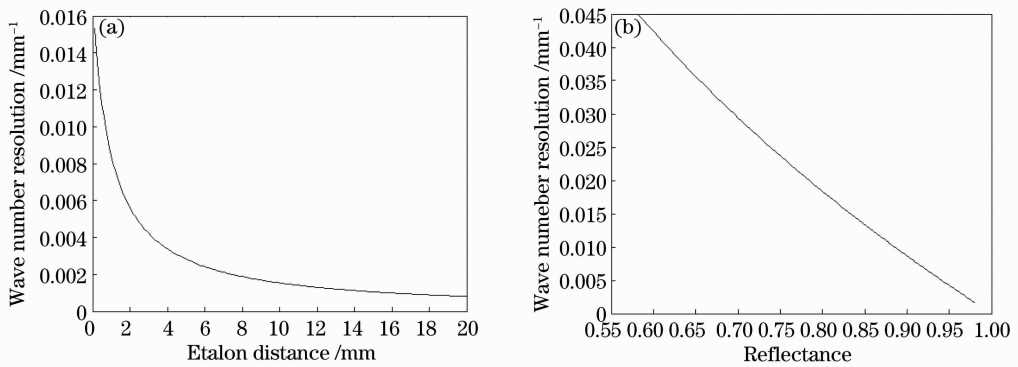


图6 波数分辨率影响因素分析。(a)标准具间距；(b)标准具反射率

Fig. 6 Influencing factor analyses of the wave number resolution. (a) Etalon distance; (b) etalon reflectance

干涉光谱成像仪的光谱曲线,并通过仿真验证了的可行性。多光束干涉光谱成像仪具有比传统的干涉光谱成像仪更为简单而紧凑的结构,有利于仪器的小型化设计;但是,多光束干涉光谱成像仪对图像信噪比要求较高,这对多光束干涉光谱成像仪的电子、光学系统设计带来了新的挑战。

参 考 文 献

- Xiangli Bin, Zhao Baochang, Xue Mingqiu. Spatially modulated imaging interferometry [J]. *Acta Optica Sinica*, 1998, 18(1): 18-22.
相里斌, 赵葆常, 薛鸣球. 空间调制干涉成像光谱技术[J]. *光学学报*, 1998, 18(1): 18-22.
- G G Shepherd. Application of Doppler Michelson imaging to upper atmospheric wind measurement; WINDII and Beyond [J]. *Appl Opt*, 1996, 35(16): 2764-2773.
- R G Sellar, B Rafert. Effects of aberrations on spatially modulated Fourier transform spectrometers [J]. *Opt Engng*, 1994, 33(9): 3087-3092.
- J M Harlander, F L Roesler, J G Cardon, *et al.*. SHIMMER: a spatial heterodyne spectrometer for remote sensing of earth/middle atmosphere [J]. *Appl Opt*, 2002, 41(7): 1343-1352.
- Wu Jun, Wang Xianhua, Fang Yonghua, *et al.*. Ability analysis of spatial heterodyne spectrometer in atmospheric CO₂ detection [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(1): 0101001.
吴 军, 王先华, 方勇华, 等. 空间外差光谱技术应用于大气二氧化碳探测的能力分析[J]. *光学学报*, 2011, 31(1): 0101001.
- Dong Ying, Xiangli Bin, Zhao Baochang. Analysis of interferometer system in a large aperture static imaging spectrometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, 21(3): 330-334.
董 瑛, 相里斌, 赵葆常. 大孔径静态干涉成像光谱仪的干涉系统分析[J]. *光学学报*, 2001, 21(3): 330-334.
- Li Jianxin, Meng Xin, Zhou Wei, *et al.*. Image plane interferometric hyperspectral imaging based on re-imaging [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(12): 1230001.
李建欣, 孟 鑫, 周 伟, 等. 基于二次成像的像面干涉高光谱成像方法[J]. *光学学报*, 2012, 32(12): 1230001.
- Timothy L Killeen, Wilbert R Skinner, Roberta M Johnson, *et al.*. TIMED Doppler Interferometer (TIDI) [C]. *SPIE*, 1999, 3756: 289-301.
- Niu Siliang, Liao Yi, Rao Wei, *et al.*. Experimental investigation on antinoise technique of interferometric fiber Fabry-Perot sensor system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 32(1): 0106003.
牛嗣亮, 廖 毅, 饶 伟, 等. 干涉型光纤法布里珀罗传感系统抗噪方法的实验研究[J]. *光学学报*, 2011, 32(1): 0106003.
- Fan Fan, Zhao Jianlin, Wen Xixing, *et al.*. Sensitivity analysis on strain sensor based on Fabry-Perot interferometer with intensity interrogation [J]. *Chinese J Lasers*, 2010, 37(6): 1525-1531.
樊 帆, 赵建林, 文喜星, 等. 强度解调型光纤光栅法布里珀罗干涉仪的应变传感灵敏度分析[J]. *中国激光*, 2010, 37(6): 1525-1531.
- M Born, E Wolf. *Principels of Optics* [M]. Yang Jiasun, Transl. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2009. 299-309.
马科斯·玻恩, 埃米尔·沃耳夫. *光学原理* [M]. 杨葭孙译. 北京: 电子工业出版社, 2009. 299-309.
- Bradley S Carlson. Evaluating image sensor sensitivity by measuring camera signal-to-noise ratio [C]. *International Symposium on Optical Science and Technology*, 2002. 78-85.
栏目编辑: 李文喆