

空间调制干涉型和衍射光栅型成像光谱仪信噪比性能的分析比较

靳阳明^{1,2} 王 岩^{1,2} 赵知诚^{1,2*} 陈新华^{1,2} 宋文宝^{1,2} 沈为民^{1,2}

¹苏州大学 物理与光电·能源学部 教育部现代光学技术重点实验室, 江苏 苏州 215006

²苏州大学 物理与光电·能源学部 江苏省先进光学制造技术重点实验室, 江苏 苏州 215006

摘要 以Sagnac空间调制干涉型成像光谱仪和Offner凸面光栅衍射型成像光谱仪为例,着重分析和比较这两类成像光谱仪的信噪比性能。在相同观测条件下,通过推导这两类成像光谱仪所得到的图像像元的光谱辐亮度,指出空间调制干涉型成像光谱仪并不具有高通量和多路复用优势,信噪比也低于衍射光栅成像光谱仪。而且随着光谱段数的增加,即光谱分辨率的提高,衍射光栅成像光谱仪的信噪比优势更明显。

关键词 成像系统; 成像光谱仪; 信噪比; 空间调制干涉仪; 干涉型; 衍射光栅

中图分类号 TH744

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0911001

Analysis and Comparison of Signal-to-Noise Ratio of Spatially Modulated Interference and Diffraction Grating Imaging Spectrometers

Jin Yangming^{1,2} Wang Yan^{1,2} Zhao Zhicheng^{1,2} Chen Xinhua^{1,2}

Song Wenbao^{1,2} Shen Weimin^{1,2}

¹Key Laboratory of Modern Optical Technologies of Education Ministry of China, College of Physics, Optoelectronics and Energy, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215006, China

²Key Laboratory of Advanced Optical Manufacturing Technologies of Jiangsu Province, College of Physics, Optoelectronics and Energy, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215006, China

Abstract Sagnac spatially-modulated interference imaging spectrometer and Offner convex diffraction grating imaging spectrometer are focused on, and their signal-to-noise performance is seriously analyzed. Through derivation of the spectral radiance of their acquired image pixels under same observation condition, it is shown that spatially-modulated interference imaging spectrometer no longer has high throughput and multiplex advantages so that its signal-to-noise is lower than diffraction grating imaging spectrometer. Further, the latter's signal-to-noise ratio advantage becomes more significant as the increase of spectral band number.

Key words imaging systems; imaging spectrometer; signal-to-noise ratio; spatially-modulated interferometer; interference; diffraction grating

OCIS codes 110.2970; 120.6200; 030.4280; 100.2960

1 引 言

基于空间调制干涉仪和衍射光栅的推扫式成像光谱仪,是遥感领域常见的两类光谱成像载荷^[1-5],广泛

收稿日期: 2015-03-02; 收到修改稿日期: 2015-04-30

基金项目: 国家自然科学基金(61205188)

作者简介: 靳阳明(1989—),男,博士研究生,主要从事光学设计与光学仪器方面的研究。E-mail: jym_good@126.com

导师简介: 沈为民(1963—),男,研究员,博士生导师,主要从事光学设计和仪器光学以及航天遥感技术等方面的研究。

E-mail: swm@suda.edu.cn

*通信联系人。E-mail: keatszao@gmail.com

应用于机载、星载遥感探测。这两类成像光谱仪通常都由前置物镜、分光装置和探测器组成,但它们的光分装置组成和工作原理不同,这引起了对其探测能力和信噪比性能的广泛研究和争论^[6-10]。

争论的焦点是空间调制干涉型成像光谱仪是否存在经典干涉型光谱仪高通量优势和多路复用优势,从而是否具有比衍射光栅型成像光谱仪信噪比高的优点。如文献[6-7]直接采用传统非成像时间调制干涉光谱仪的结论,认为空间调制干涉型成像光谱仪具有此优点。Pritt等^[8-9]认为用于成像时空间调制干涉型光谱仪不再具有此优点,但文献是直接给出其简化的信噪比公式,对信噪比模型的建立过程论述较少,从而未能清晰解释探测器噪声和光子噪声等是如何对信噪比产生影响的。文献[10]认为此优点与是否使用面阵探测器和狭缝有关。

为了阐明上述两类成像光谱仪的信噪比性能,以基于Sagnac空间调制干涉仪和Offner凸面衍射光栅分光装置的成像光谱仪为例,首先介绍这两类成像光谱仪的结构组成和工作原理,并在此基础上分析比较它们的通量特点,然后推导它们图像像元的光谱和信噪比公式,给出信噪比性能比较结果和多路复用特点,最后举例说明理论分析结果。

2 工作原理

空间调制干涉型和衍射光栅型成像光谱仪都由前置物镜、狭缝、分光装置和探测器组成。狭缝置于前置物镜焦面处,为视场光阑,限制成像光谱仪的视场。探测器置于分光装置焦平面上。它们均由前置物镜将收集到的光束成像在像面上,然后光束经狭缝限制后进入分光装置,由分光装置分光后成像在探测器上。

但它们具有不同的分光方式和工作原理。空间调制干涉型成像光谱仪包括两种类型:带狭缝的^[11,6,11]和不带狭缝的^[12],文中主要针对前者进行研究。它基于双光束干涉,产生空间调制的干涉条纹,典型代表为Sagnac空间调制干涉型成像光谱仪^[11]。它的分光装置如图1所示,基于Sagnac共光路干涉仪,由狭缝、分束/合束器、反射镜1和反射镜2、傅里叶透镜和柱面透镜构成,狭缝垂直纸面,位于傅里叶透镜的前焦面上,柱面透镜的母线平行纸面。光线传输过程为:通过狭缝某个像元的光束被分束/合束器分成透射光束(蓝色线)和反射光束(红色线),透射光束依次经反射镜1和反射镜2反射后,再次透过分束/合束器,而反射光束依次经反射镜2反射镜1回到分束/合束器,这两束光在分束/合束器处发生合束,合束后的两束光透过傅里叶透镜后变成两束平行光,经由柱面透镜后,与柱面透镜母线垂直方向上的光束聚焦,在焦面上产生与柱面透镜母线平行的一维像,称平行柱面透镜母线的方向为干涉维,空间维与之垂直。当反射镜1与反射镜2相对于分束/合束器不对称时,两束平行光不重合,在焦平面上发生干涉形成空间调制的干涉图,对干涉图进行逆傅里叶变换可得到目标的光谱辐亮度。来自狭缝其他像元的光束经该分光装置产生的干涉图相互平行地分布在空间维上,焦平面上得到目标的一维空间信息和一维干涉信息。垂直狭缝推扫得到目标另一维的空间信息及其干涉信息,它们构成目标的干涉图数据立方体。

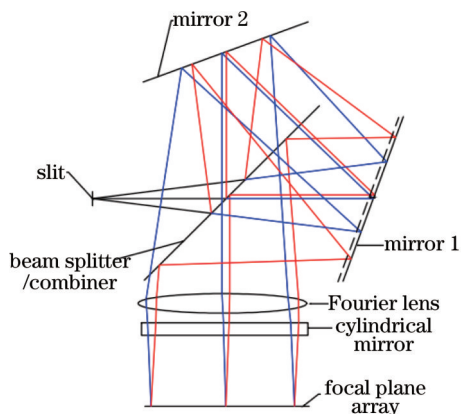


图1 Sagnac空间调制干涉型成像光谱仪的分光装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of Sagnac spatially-modulated interference imaging spectrometer

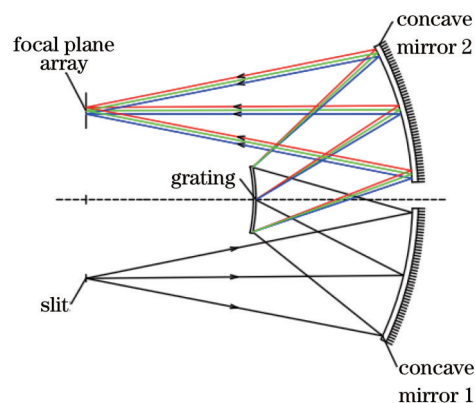


图2 Offner凸面衍射光栅型成像光谱仪的分光装置示意图

Fig.2 Schematic diagram of Offner convex diffraction grating imaging spectrometer

衍射光栅型的成像光谱仪^[2,5,13]以衍射光栅作为色散元件,探测器上得到按波长匀排的光谱。以 Offner 凸面衍射光栅型成像光谱仪^[13]为例,分光装置如图 2 所示,由狭缝、凹面镜 1、凸面衍射光栅、凹面镜 2 和探测器组成,凹面镜 1、凸面衍射光栅、凹面镜 2 为同心结构。光线通过狭缝经凹面镜 1 反射到达凸面衍射光栅,在凸面衍射光栅处发生衍射,光栅衍射遵循光栅方程,衍射后经凹面镜 2 反射聚焦,在焦平面上得到按波长排列的狭缝像,焦平面内平行狭缝方向为空间维,另一维为光谱维。焦平面上得到目标的一维空间信息和一维光谱信息,垂直狭缝推扫得到目标的另一维空间信息及光谱信息,它们直接构成目标的光谱数据立方体。

3 信噪比性能分析比较

为便于比较这两类成像光谱仪的固有信噪比性能,设目标的幅宽、光谱范围 $[\sigma_1, \sigma_2]$ (σ 为波数)、光谱辐亮度 $B(\sigma)$, 成像光谱仪的空间分辨率、光谱通道数 M , 曝光时间 t , 所使用的前置物镜和探测器^[14-15]均相同。

在分析信噪比性能之前,首先讨论它们的辐射通量特点。通过成像光谱仪到达探测器光敏面的辐射通量 ϕ , 主要由前置物镜相对孔径 $1/F$ 、狭缝面积 s 、光谱范围、光谱辐亮度 $B(\sigma)$, 探测器光电转换量子效率为 $Q(\sigma)$ 和系统透过率 $\tau(\sigma)$ 决定, 即

$$\phi = \int_{\sigma_1}^{\sigma_2} B(\sigma)\tau(\sigma)Q(\sigma)\frac{\pi s}{4F^2}d\sigma. \quad (1)$$

根据前述假设,式中除系统透过率外,其余影响因子均相同。而这两类成像光谱仪的系统透过率主要受各自核心元件分束/合束器和光栅的影响,理想情况下分束/合束器能量利用率为 0.5,光栅衍射效率为 0.5 以上^[16]。由此可知,空间调制干涉型成像光谱仪将不再具有高通量优势。

3.1 Sagnac 空间调制干涉型成像光谱仪信噪比

对于 Sagnac 空间调制干涉型成像光谱仪,若要实现在光谱范围 $[\sigma_1, \sigma_2]$ 内具有 M 个光谱通道数,该成像光谱仪的光谱分辨率 σ_{res} 需为

$$\sigma_{res} = (\sigma_2 - \sigma_1)/M. \quad (2)$$

干涉光谱仪的光谱分辨率由最大光程差 Δ_{max} 决定^[7],为实现上述光谱分辨率要求,该成像光谱仪的最大光程差为

$$\Delta_{max} = 1/2\sigma_{res}. \quad (3)$$

若用 δ_Δ 表示光程差采样间隔,为避免光谱混叠,光谱采样间隔需满足香农采样定理,即

$$\delta_\Delta \leq \frac{1}{2\sigma_2}. \quad (4)$$

设干涉图双边对称采样,采样点数为 m ,

$$m = 2\Delta_{max}/\delta_\Delta = 1/(\sigma_{res} \cdot \delta_\Delta). \quad (5)$$

令 j 表示光程差采样序列, $j=[-m/2+1, -m/2+2, \dots, m/2]$, 则该成像光谱仪采样得到的干涉图,其第 j 个取样值为

$$\begin{aligned} W_s(j\delta_\Delta) &= \int_{\sigma_1}^{\sigma_2} B(\sigma)\tau_s(\sigma)\eta_s(\sigma)Q(\sigma)t\frac{\pi d_1 d_2}{4F^2 m h c \sigma} [1 + \cos(2\pi\sigma j\delta_\Delta)]d\sigma = \\ &= \int_{\sigma_1}^{\sigma_2} B(\sigma)\tau_s(\sigma)\eta_s(\sigma)Q(\sigma)t\frac{\pi d_1 d_2}{4F^2 m h c \sigma} d\sigma + \int_{\sigma_1}^{\sigma_2} B(\sigma)\tau_s(\sigma)\eta_s(\sigma)Q(\sigma)t\frac{\pi d_1 d_2}{4F^2 m h c \sigma} \cos(2\pi\sigma j\delta_\Delta)d\sigma = \\ &= W_{s-dc}(j\delta_\Delta) + W_{s-ac}(j\delta_\Delta) \end{aligned} \quad (6)$$

式中 h 为普朗克常量, c 为光速, τ_s 为除分束/合束器外光学系统透过率, η_s 为分束/合束器光能利用率, d_1, d_2 为探测器像元大小, $W_{s-dc}(j\delta_\Delta)$ 为干涉图直流分量, $W_{s-ac}(j\delta_\Delta)$ 为干涉图交流分量。为将(6)式表述成傅里叶变换的形式,设想目标光谱辐亮度为一偶函数,即 $B(\sigma) = B(-\sigma)$, 将光谱辐亮度扩展到负波数区,则交流分量和直流分量可改写为

$$W_{s-ac}(j\delta_\Delta) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{2} B(\sigma)\tau_s(\sigma)\eta_s(\sigma)Q(\sigma)t\frac{\pi d_1 d_2}{4F^2 m h c \sigma} \exp(-i2\pi\sigma j\delta_\Delta)d\sigma, \quad (7)$$

$$W_{s-dc}(j\delta_\Delta) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{2} B(\sigma)\tau_s(\sigma)\eta_s(\sigma)Q(\sigma)t\frac{\pi d_1 d_2}{4F^2 m h c \sigma} d\sigma, \quad (8)$$

式中 i 为虚数单位。从(7)式和(8)式可以看出,干涉图交流分量与入射光的光谱之间存在傅里叶变换关系,干涉图直流分量与 δ 函数之间存在傅里叶变换关系。由此可知,交流分量反映入射光的光谱形状。对(7)式作逆傅里叶变换,得到的是入射光波数为 σ 、谱宽为 σ_{res} 的光经该成像光谱仪后在每个像元上产生的光电子数的平均值。由于干涉图离散采样,傅里叶变换需采用离散形式,则有

$$\tilde{B}(q\sigma_{res}) = \frac{2}{m} \sum_{j=-m/2+1}^{m/2} W_{s-ac}(j\delta_{\Delta}) \cdot \exp(-i2\pi jq/m) = B(q\sigma_{res})\tau_s(q\sigma_{res})\eta_s(q\sigma_{res})Q(q\sigma_{res})t \frac{\pi d_1 d_2}{4F^2 m hc q \sigma_{res}} \sigma_{res}, \quad (9)$$

式中 q 为光谱采样序列, $q=[-m/2+1, -m/2+2, \dots, m/2]$ 。

(6)式是没有考虑噪声的干涉图,实际干涉图会受到光子噪声 $n_s(j\delta_{\Delta})$ 和探测器噪声 n_d 的影响。光子噪声与干涉图信号 $W_s(j\delta_{\Delta})$ 有关,其期望值为 0,方差为 $W_s(j\delta_{\Delta})$,探测器噪声期望值为 0,方差为 n_d^2 。干涉图光子噪声和探测器噪声经逆傅里叶变换后变为谱域的噪声。

对光子噪声作逆傅里叶变换,有

$$\tilde{n}_s(q\sigma_{res}) = \frac{2}{m} \sum_{j=-m/2+1}^{m/2} n_s(j\delta_{\Delta}) \cdot \exp(-i2\pi jq/m) = \frac{2}{m} \sum_{j=-m/2+1}^{m/2} [n_s(j\delta_{\Delta}) \cdot \cos(2\pi jq/m) + n_s(j\delta_{\Delta}) \cdot i \sin(2\pi jq/m)], \quad (10)$$

式中求和号内包含 \sin 函数的项为奇函数,包含 \cos 函数的项为偶函数,当干涉图对称时,因奇函数在对称取样点上的和为零,(10)式虚部为零。由于受噪声影响,干涉图失去对称性,奇函数在对称取样点上的和将不为零,但它相比于偶函数在对称取样点上的和将是小量,可以忽略,所以取(10)式实部作为变换结果。

则光子噪声经逆傅里叶变换后的方差为

$$\begin{aligned} \sigma_{\tilde{n}_s}^2(q\sigma_{res}) &= E\{\text{Re}[\tilde{n}_s(q\sigma_{res})]^2\} - E\{\text{Re}[\tilde{n}_s(q\sigma_{res})]\}^2 = \\ &= E\left\{\left[\frac{2}{m} \sum_{j=-m/2+1}^{m/2} n_s(j\delta_{\Delta}) \cdot \cos(2\pi jq/m)\right]^2\right\} - \left\{E\left[\frac{2}{m} \sum_{j=-m/2+1}^{m/2} n_s(j\delta_{\Delta}) \cdot \cos(2\pi jq/m)\right]\right\}^2 = \\ &= E\left\{\left[\frac{2}{m} \sum_{j=-m/2+1}^{m/2} n_s(j\delta_{\Delta}) \cdot \cos(2\pi jq/m)\right]^2\right\} - \left\{\frac{2}{m} \sum_{j=-m/2+1}^{m/2} E[n_s(j\delta_{\Delta})] \cdot \cos(2\pi jq/m)\right\}^2 \end{aligned} \quad (11)$$

式中 $E\{\cdot\}$ 为期望算子, $\text{Re}[\cdot]$ 为取复数实部的算子。因光子噪声的期望为 0,则等式右边第二项等于 0。由于像元间光子噪声是不相关的,则像元与像元间光子噪声积的期望等于像元与像元间光子噪声期望的积,因光子噪声的期望为 0,所以像元与像元间光子噪声积的期望为 0,则(11)式可化简为

$$\begin{aligned} \sigma_{\tilde{n}_s}^2(q\sigma_{res}) &= \frac{4}{m^2} \sum_{j=-m/2+1}^{m/2} E[n_s(j\delta_{\Delta})^2] \cos^2(2\pi jq/m) + \\ &= \frac{4}{m^2} \sum_{j=-m/2+1}^{m/2} \sum_{j'=-m/2+1}^{m/2} E[n_s(j\delta_{\Delta}) \cdot n_s(j'\delta_{\Delta})] \cos(2\pi jq/m) \cos(2\pi j'q/m) |_{j \neq j'} + \\ &= \frac{4}{m^2} \sum_{j=-m/2+1}^{m/2} W_s(j\delta_{\Delta}) \cos^2(2\pi jq/m) \end{aligned} \quad (12)$$

对于复杂光谱光源,通常(12)式难以直接进一步化简的,但由于任意复杂光谱光源均可分解为若干准单色光的叠加,可通过先求出准单色光入射的结果,然后将各准单色光入射时的结果叠加,得出任意光谱光源入射时光子噪声变换后的方差。设准单色光波数为 σ ,线宽为 σ_{res} ,则由(6)式得干涉图

$$W_s(j\delta_{\Delta}) = B(\sigma)\tau_s(\sigma)\eta_s(\sigma)Q(\sigma)t \frac{\pi d_1 d_2}{4F^2 m hc \sigma} \sigma_{res} [1 + \cos(2\pi \sigma j \delta_{\Delta})]. \quad (13)$$

(13)式代入到(12)式中,并利用三角函数的倍角公式,得

$$\sigma_{\tilde{n}_s}^2(q\sigma_{res}) = \frac{4}{m^2} B(q\sigma_{res})\tau_s(q\sigma_{res})\eta_s(q\sigma_{res})Q(q\sigma_{res})t \frac{\pi d_1 d_2}{4F^2 m hc q \sigma_{res}} \sigma_{res} \cdot \sum_{j=-m/2+1}^{m/2} \left[\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos(4\pi jq/m) + \cos^3(2\pi jq/m)\right], \quad (14)$$

式中余弦项 $\cos(4\pi jq/m)$ 的周期为 $m/2q$,而在区间 $[-m/2+1, m/2]$ 内该余弦项恰有 $4q$ 个周期,所以其 Σ 和为 0。同理余弦项 $\cos^3(2\pi jq/m)$ 的 S 和也为 0。

则准单色光入射时光子噪声经变换后的方差为

$$\sigma_{\tilde{n}_s}^2(q\sigma_{res}) = \frac{2}{m^2} B(q\sigma_{res})\tau_s(q\sigma_{res})\eta_s(q\sigma_{res})Q(q\sigma_{res})t \frac{\pi d_1 d_2}{4F^2 hc q \sigma_{res}} \sigma_{res}. \quad (15)$$

任意光谱光源入射时,其光子噪声变换后的方差为

$$\sigma_{\tilde{n}_s}^2(q\sigma_{\text{res}}) = \int_{\sigma_1}^{\sigma_2} \frac{2}{m^2} B(\sigma)\tau_s(\sigma)\eta_s(\sigma)Q(\sigma)t \frac{\pi d_1 d_2}{4F^2} \frac{1}{hc\sigma} d\sigma. \quad (16)$$

同样,对探测器噪声作离散逆傅里叶变换,求得其变换后的方差为

$$\sigma_{\tilde{n}_d}^2 = \frac{2}{m} n_d^2. \quad (17)$$

则该成像光谱仪的信噪比为

$$R_{\text{SNs}}(\sigma) = \frac{\tilde{B}(q\sigma_{\text{res}})}{\sqrt{\sigma_{\tilde{n}_s}^2(q\sigma_{\text{res}}) + \sigma_{\tilde{n}_d}^2}} = \frac{B(\sigma)\tau_s(\sigma)\eta_s(\sigma)Q(\sigma)t \frac{\pi d_1 d_2}{4F^2} \frac{1}{hc\sigma} \sigma_{\text{res}}}{\sqrt{2 \int_{\sigma_1}^{\sigma_2} B(\sigma)\tau_s(\sigma)\eta_s(\sigma)Q(\sigma)t \frac{\pi d_1 d_2}{4F^2} \frac{1}{hc\sigma} d\sigma + 2mn_d^2}}, \quad (18)$$

式中分母中第一项为目标光谱范围内所有谱段光子噪声的贡献,第二项为所有像元探测器噪声的贡献。通常式中积分项的解析表达式难以求出,但对于一个目标光谱范围、光谱辐亮度以及仪器能量利用率等参数确定了了的仪器,该积分结果为定值,与光谱分辨率无关,而探测器噪声又与光谱辐亮度无关。因此,对于已确定了的空间调制干涉成像光谱仪,不管目标光谱是复杂光谱还是简单光谱,对目标光谱范围内任一谱段来说噪声都是一样的,信噪比曲线与光源光谱相似。但简单的光源光谱将易于获得(18)式的解析表达式。

3.2 Offner 凸面光栅衍射型成像光谱仪信噪比

对于 Offner 凸面光栅衍射型成像光谱仪,因光栅色散按波长匀排,将入射光光谱辐亮度表示为 $B(\lambda)$ 形式,光谱范围表示为 $[\lambda_1, \lambda_2]$, λ 为波长。 $B(\lambda)$ 与 $B(\sigma)$ 是同一光源光谱的两种不同表现形式,前者为波长的函数,后者为波数的函数,波长与波数互为倒数。当要求光谱通道数为 M 时,则该成像光谱仪的光谱分辨率 λ_{res} 为

$$\lambda_{\text{res}} = \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{M}. \quad (19)$$

用 $\eta_g(\lambda)$ 表示光栅衍射效率, $\tau_g(\lambda)$ 表示除光栅外系统透过率,则在满足光谱分辨率要求下,该成像光谱仪单个探测器像元接收到的光电子数为

$$W_g(\lambda) = B(\lambda)\tau_g(\lambda)\eta_g(\lambda)Q(\lambda)t \frac{\pi d_1 d_2}{4F^2} \frac{\lambda}{hc} \lambda_{\text{res}}. \quad (20)$$

实际探测中,单个探测器像元上的光电子数将会受到光子噪声 $n_g(\lambda)$ 和探测器噪声 n_d 的影响。光子噪声与探测器像元上光电子数密切相关,其期望值为 0,方差为 $W_g(\lambda)$,探测器噪声的期望值为 0,方差为 n_d^2 。

则该成像光谱仪的信噪比为

$$R_{\text{SNg}} = \frac{W_g(\lambda)}{\sqrt{n_g^2(\lambda) + n_d^2}} = \frac{B(\lambda)\tau_g(\lambda)\eta_g(\lambda)Q(\lambda)t \frac{\pi d_1 d_2}{4F^2} \frac{\lambda}{hc} \lambda_{\text{res}}}{\sqrt{B(\lambda)\tau(\lambda)\eta(\lambda)Q(\lambda)t \frac{\pi d_1 d_2}{4F^2} \frac{\lambda}{hc} \lambda_{\text{res}} + n_d^2}}. \quad (21)$$

由(21)式可知,该成像光谱仪的信噪比只受所测谱段自身光子噪声和探测器噪声影响,不受其他谱段光子噪声影响。因各谱段互不相关,其信噪比曲线与光源光谱相似,不同光源光谱入射时所得到的信噪比曲线仅是形状上有所差异。

3.3 比较讨论

基于上述分析,不妨假设光源为矩形分布光谱光源,光学系统透过率 τ_s 和 τ_g 、光栅衍射效率 η_g 、分束/合束器光能利用率 η_s 和探测器光电量子转换效率 Q 均为常量。

在光子噪声限下,光子噪声为主要噪声,忽略探测器噪声。由(18)式和(21)式,并利用波长和波数之间的关系,得两类成像光谱仪信噪比的比值为

$$\frac{R_{\text{SNg}}}{R_{\text{SNs}}} = \sqrt{\frac{\tau_g \eta_g \lambda_1^2 \lambda_2^2 (\lambda_1 + \lambda_2)}{\tau_s \eta_s \lambda^5}} M. \quad (22)$$

该比值与 \sqrt{M} 成正比,在高光谱领域,通常 M 取值为几十到几百,(22)式比值将明显大于 1,且随光谱通道数的增多,该比值增大,衍射光栅型成像光谱仪将更具信噪比优势。

在探测器噪声限下,探测器噪声为主要噪声,忽略光子噪声的影响,有

$$\frac{R_{\text{SNg}}}{R_{\text{SNs}}} = \sqrt{2m} \frac{\lambda_1 \lambda_2 \tau_g \eta_g}{\lambda^2 \tau_s \eta_s} \quad (23)$$

该比值与 \sqrt{m} 成正比,而采样点数 m 通常远大于1,所以在探测器噪声限下,衍射光栅型成像光谱仪同样具有信噪比优势,尤其是对具有高光谱分辨率要求的情况,因为高光谱分辨率不仅意味着每个谱段的能量减少,而且需要有更多采样点数。

以上说明无论在光子噪声限下还是探测器噪声下,空间调制干涉型成像光谱仪的多路复用都不再是优点,其信噪比低于衍射光栅型成像光谱仪。

4 举 例

为使上述分析更直观化,下面举例说明理论分析结果。本例中前置物镜 F 数为3.5,探测器像素数为 $512 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$,像素尺寸为 $16 \text{ }\mu\text{m} \times 16 \text{ }\mu\text{m}$,光源为矩形光谱,光谱范围 $0.45 \sim 0.95 \text{ }\mu\text{m}$,光谱辐亮度 $0.003 \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{str} \cdot \text{mm})$,光栅各波长衍射效率0.5,分束/合束器光能利用率0.5,系统透过率0.8,光电量子转换效率0.8,曝光时间 14.6 ms ,要求光谱通道数为128。

图3给出这两类成像光谱仪光子噪声限下的信噪比。由于光源的光谱辐亮度为常量,其包含的光子数与波长成正比,与波数成反比,衍射光栅型信噪比会随波长增加而增加,而干涉型成像光谱仪信噪比随波数增加而减小。以 $0.5 \text{ }\mu\text{m}$ 、 $0.7 \text{ }\mu\text{m}$ 和 $0.9 \text{ }\mu\text{m}$ 作为参考波长,空间调制干涉型成像光谱仪的信噪比分别4.63、12.72和27.06,衍射光栅型信噪比为150.09、177.58和201.36。

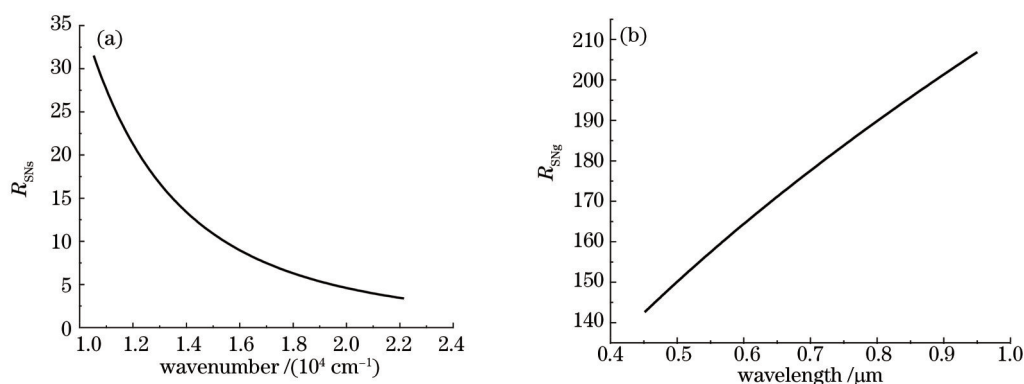


图3 (a) 空间调制干涉型; (b) 衍射光栅型

Fig.3 (a) Spatially modulated type; (b) diffraction grating type

从图中可以看出,衍射光栅型成像光谱仪的信噪比明显高于空间调制干涉型成像光谱仪。探测器噪声限下的信噪比曲线将得到与此类似的结果。

5 结 论

基于具有代表性的Sagnac空间调制干涉型和Offner衍射光栅型成像光谱仪信噪比性能比较研究,指出前者不再具有高通量和多路复用优点,且信噪比低于Offner衍射光栅型成像光谱仪。光谱通道数越多,衍射光栅型成像光谱仪越具有高信噪比优点。所得到的结论可用于指导实际应用中分光方式的选择。建立信噪比模型的方法可用于分析其他类型成像光谱仪的信噪比,对于与不带狭缝的空间调制干涉成像光谱仪^[12,17]及其他类型成像光谱仪信噪比性能的比较分析,将在另一篇文章中论述。

参 考 文 献

- 1 Leonard John Otten III, Andrew D Meigs, Bernard A Jones, *et al.*. Engineering model for the Mighty SatIII 1 hyperspectral imager[C]. SPIE, 1997, 3221: 412-420.
- 2 Xiang Zhao, Zhengqing Xiao, Qian Kang, *et al.*. Overview of the fourier transform hyperspectral imager (HSI) boarded on HJ-1A satellite[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2010: 4272-4274.

- 3 R L Lucke, M Corson, N R Mc Glothlin, *et al.*. Hyperspectral imager for the coastal ocean: instrument description and first images [J]. *Applied Optics*, 2011, 50(11): 1501-1516.
- 4 Vane G, Green R, Chrien T, *et al.*. The airborne visible/infrared imaging spectrometer (aviris) [C]. *Remote Sensing of Environment*, 1993, 44: 127-143.
- 5 Liu Xuxia, Ji Yiqun, He Hucheng, *et al.*. Analysis and design of Littrow-Offner spectroscopic system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(4): 0422009.
刘旭霞, 季轶群, 贺虎成, 等. Littrow-Offner型分光系统的分析与设计[J]. *光学学报*, 2013, 33(4): 0422009.
- 6 Jin Xizhe. The Study Imaging Fourier Transform Spectroscopy Technology[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physic Academia Sinica, 2000: 11~34.
金锡哲. 干涉成像光谱技术研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2000: 11-34.
- 7 R J Bell. *Introductory Fourier Transform Spectroscopy*[M]. London: Academic Press, 1972.
- 8 A T Pritt, Jr, P N Kupferman, S J Young, *et al.*. Imaging LWIR spectrometers for remote sensing applications[C]. SPIE, 1997, 3063: 138-149.
- 9 R Glenn Sellar, Glenn D Boreman. Comparison of relative signal-to-noise ratios of different classes of imaging spectrometer[J]. *Applied Optics*, 2005, 44(9): 1614-1624.
- 10 Alessandro Barducci, Donatella Guzzi, Cinzia Latri, *et al.*. Theoretical aspects of fourier transform spectrometry and common path triangular interferometers[J]. *Optics Express*, 2010, 18(11): 11622-11649.
- 11 Lin Xuling, Zhou Feng, Wang Huaiyi, *et al.*. Spatically modulated interference imaging spectrometer based on Wollaston prisms[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(7): 1798-1802.
林翎凌, 周 峰, 王怀义, 等. 采用 Wollaston 棱镜的空间调制干涉成像光谱仪[J]. *红外与激光*, 2012, 41(7): 1798-1802.
- 12 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.
- 13 Ji Yiqun, Shen Weimin. Design and manufacture of Offner convex grating hyper-spectral imager[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(2): 285-287.
季轶群, 沈为民. Offner凸面光栅超光谱成像仪的设计与研制[J]. *红外与激光*, 2010, 39(2): 285-287.
- 14 Ma Jun, Xiao Xizhong, Lang Junwei, *et al.*. Study om selection of CCD detector of space-borne hyper-spectral imager[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(10): 1011001.
马 骏, 肖喜中, 郎均慰, 等. 航空推扫高光谱成像仪 CCD探测器选型研究[J]. *光学学报*, 2014, 34(10): 1011001.
- 15 Zhang Ying, Niu Yanxiong, Yang Lu, *et al.*. Analysis and study on detection capability of satellite photoelectric imaging system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(1): 0111004.
张 颖, 牛燕熊, 杨 露, 等. 星载光电成像系统探测能力分析与研究[J]. *光学学报*, 2014, 34(1): 0111004.
- 16 Lan Weihua, Wang Xin, Liu Yinnian, *et al.*. The convex grating diffractive efficiency calculating and second diffraction suppression [J]. *Infrared Technology*, 2009, 31(5): 256-258.
兰卫华, 王 欣, 刘银年, 等. 凸面光栅的衍射效率计算及其二级光谱抑制[J]. *红外技术*, 2009, 31(5): 256-258.
- 17 Liu Yang, Liao Ningfang, Bai Tingzhu, *et al.*. Study of the structure of large aperture ultraviolet Fourier transform imaging spectrometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(3): 0330001.
刘 洋, 廖宁放, 白廷柱, 等. 一种大孔径紫外傅里叶变换成像光谱仪结构研究[J]. *光学学报*, 2014, 34(3): 0330001.

栏目编辑: 刘丰瑞