

文章编号: 1007-4619 (2000) 03-0194-03

成像干涉光谱仪信噪比分析

金锡哲, 向 阳, 禹秉熙

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室, 长春 130022)

摘 要: 以 Sagnac 型成像干涉(傅里叶变换)光谱仪为例, 详细推导了空间调制型成像干涉光谱仪信噪比的一般表达式, 分析了各种因素与信噪比之间的关系并得出了相应的结论。

关键词: 成像干涉光谱仪; 信噪比

中图分类号: TP702 **文献标识码:** A

1 引 言

依据阵列探测器扫描的空间调制型成像干涉(傅里叶变换)光谱仪(SMIFTS)是在 80 年代末开始引起人们重视、具有重要的研究和应用价值的空间遥感器。它具有许多独特的优点, 如光通量大、信噪比高、使用方便和易于实现等。近年来, 成像干涉光谱方法和技术在遥感领域中得到迅速发展, 正逐步成为以高分辨率遥感探测红外和可见弱辐射的强有力工具。

信噪比是遥感器的重要技术指标。对光学成像遥感器的信噪比特性的一般研究曾有过报道^[1-3]。本文以 Sagnac 型成像干涉光谱仪为例, 详细推导了其信噪比的数学表达式, 分析了各种因素对成像干涉光谱仪信噪比的影响, 以期对它的研制开发及应用有所裨益。

2 公式推导及计算

现以图 1 所示的 Sagnac 型成像干涉光谱仪在空间对地观测的情况为例进行计算。在考虑地物反射太阳辐射的光谱范围(400—2500 nm)时, 地物本身的热辐射可以忽略。视地物为具有漫反射特性的 Lambert 体, 并设其对 λ 波长辐射的反射率为 $\rho(\lambda)$ 。太阳辐射到地面的 λ 波长的辐照度为 $E(\lambda)$, 太阳天顶角为 Z , 该辐照度由两部分构成: 太阳直射光 $E_{sol}(\lambda)$

和天空漫射光 $E_{sky}(\lambda)$ (即天空半球在地面像元处的光谱辐照度)。则地物反射的波长为 λ 的太阳辐射辐亮度为: $L(\lambda) = \frac{1}{\pi} E(\lambda) \rho(\lambda)$

$$= \frac{1}{\pi} [E_{sol}(\lambda) \cos Z + E_{sky}(\lambda)] \rho(\lambda) \quad (1)$$

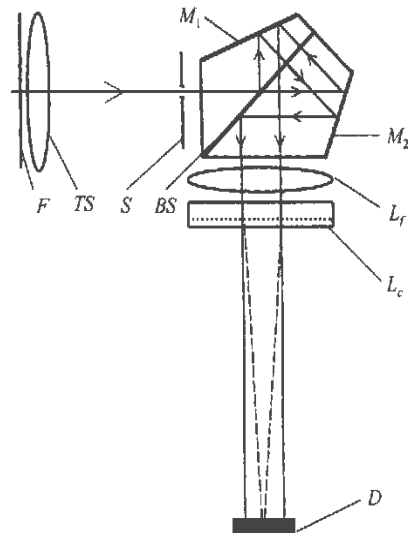


图 1 成像干涉光谱仪原理图

Fig. 1 Schematic diagram of the SMIFTS

参照图 1, 设: 光谱仪前置望远系统 TS 焦距为 f , 孔径为 D , 光学系统光谱透过率为 $\tau_o(\lambda)$ 。沿目标-遥感器路径的大气光谱透过率为 $\tau_a(\lambda)$, 沿目标-遥感器路径大气散射的上行光谱辐亮度为 $L_a(\lambda)$ 。狭缝 S 宽度为 w 。傅里叶透镜焦距为 f' 。狭缝与其在探测器上所成的像为 1 倍关系。探测器 D 的阵

元宽度和高度分别为 d_1 和 d_2 。则光谱仪入射狭缝上瞬时视场接收的 λ 波长的辐通量为：

$$\Phi'(\lambda) = \tau_0(\lambda) \tau_f(\lambda) \frac{\omega d_2}{f^2} \left(\frac{D}{2}\right)^2 \times [E(\lambda) \rho(\lambda) \tau_a(\lambda) + \pi L_a(\lambda)] \quad (2)$$

式中 $\tau_f(\lambda)$ 是为避免探测器饱和而加入的衰减滤光片 F 的光谱透过率。遥感器接收的地面场景像元辐照度 $E(\lambda)$ 可由 LOWTRAN7 或 6S 等大气辐射传输代码计算出来。大气散射上行光谱辐亮度 $L_a(\lambda)$ 的影响经计算处理亦可扣除掉。

设入射到 Sagnac 干涉仪的 λ 波长辐射强度为 $I_0(\lambda)$ ，分束器 BS 的反射率和透射率分别为 $R_s(\lambda)$ 和 $T_s(\lambda)$ ，Sagnac 棱镜两反射面 M_1 、 M_2 的反射率为 $R_{M_1}(\lambda)$ 和 $R_{M_2}(\lambda)$ (可设其为 $R_{M_1}(\lambda) = R_{M_2}(\lambda) = R_M(\lambda)$)，傅里叶透镜 L_f 和柱面镜 L_c 的透射率分别为 $T_f(\lambda)$ 和 $T_c(\lambda)$ ，则有：

$$I_0(\lambda) = \tau_0(\lambda) \tau_f(\lambda) \frac{f'^2}{f_2} \left(\frac{D}{2}\right)^2 \times [E(\lambda) \rho(\lambda) \tau_a(\lambda) + \pi L_a(\lambda)] \quad (3)$$

$I_0(\lambda)$ 经分束器反/透射、 M_1 及 M_2 反射、傅里叶透镜和柱面镜的透射，入射到探测器的两相干光束辐射强度分别为：

$$I_1(\lambda) = I_0(\lambda) R_s(\lambda)^2 R_M^2(\lambda) T_f(\lambda) T_c(\lambda)$$

$$I_2(\lambda) = I_0(\lambda) T_s(\lambda)^2 R_M^2(\lambda) T_f(\lambda) T_c(\lambda)$$

两束光在探测面处合束产生干涉，在距零级条纹 x 距离处，其干涉强度为：

$$I_x(\lambda) = I_0(\lambda) R_M^2(\lambda) T_f(\lambda) T_c(\lambda) [R_s(\lambda)^2 + T_s(\lambda)^2 + 2R_s(\lambda) T_s(\lambda) \cos(2\sqrt{2}\pi x l / \lambda f')] \quad (4)$$

式中 l 为 Sagnac 棱镜的反射面 M_1 或 M_2 相对于对称位置的偏移量。

设探测器的光谱响应度为 $R(\lambda)$ ，则有公式^[4]：

$$R(\lambda) = \frac{V_N D^*(\lambda)}{\sqrt{A_D \Delta f}} \quad (5)$$

式中 V_N 为探测器的噪声电压， $D^*(\lambda)$ 为光谱比探测率， A_D 为探测器阵元的光敏面积 ($A_D = d_1 d_2$)， Δf 为噪声带宽。则扣除 $L_a(\lambda)$ 的影响后，探测器上距零级条纹 x 距离处阵元的输出信号电压 V_{sx} 为：

$$V_{sx} = \int_{400}^{1000} I_x(\lambda) \omega R(\lambda) d\lambda$$

$$= \frac{V_N \sqrt{A_D} \eta_k}{f^2 \sqrt{\Delta f}} \left(\frac{D}{2}\right)^2 \int_{400}^{1000} R_M^2(\lambda) T_f(\lambda) \times T_c(\lambda) E(\lambda) D^*(\lambda) \tau_0(\lambda) \tau_a(\lambda) \tau_f(\lambda)$$

$$\times \rho(\lambda) [R_s(\lambda)^2 + T_s(\lambda)^2 + 2R_s(\lambda) T_s(\lambda) \cos(2\sqrt{2}\pi x l / \lambda f')] d\lambda \quad (6)$$

式中 $\omega (= A_D / f'^2)$ 为探测器阵元对应的视场立体角， $\eta_k (= 3/4)$ 为信号过程因子^[2]。于是探测器上距零级条纹 x 距离处的干涉条纹信噪比 SNR_x 为：

$$SNR_x = V_{sx} / V_N$$

$$= \frac{\sqrt{A_D} \eta_k}{f^2 \sqrt{\Delta f}} \left(\frac{D}{2}\right)^2 \int_{400}^{1000} R_M^2(\lambda) T_f(\lambda) \times T_c(\lambda) E(\lambda) D^*(\lambda) \tau_0(\lambda) \tau_a(\lambda) \tau_f(\lambda) \times \rho(\lambda) [R_s(\lambda)^2 + T_s(\lambda)^2 + 2R_s(\lambda) T_s(\lambda) \cos(2\sqrt{2}\pi x l / \lambda f')] d\lambda \quad (7)$$

设面阵探测器帧扫描频率 ν ，飞行速高比为 V/H ，则探测器的积分时间为：

$$\tau_d = 1/\nu = \alpha H / V = d_1 H / f' V$$

(纵向瞬时视场角 $\alpha = d_1 / f'$) (8)

等效噪声带宽 Δf 为：

$$\Delta f = 1/(2\tau_d) \quad (9)$$

设单边干涉图采样点数为 N ，光谱元数为 m ($= \Delta\lambda / \delta\lambda = \Delta\lambda \lambda_L N / 2\lambda_H^2$)。则在光子发射噪声受限响应条件下，像面探测器测得的干涉图平均信噪比 SNR_a 与其傅里叶变换后的谱域的理论平均信噪比 SNR 之间存在以下关系^[3]：

$$SNR = SNR_a \sqrt{N} / (\sqrt{2}m) = SNR_0 \sqrt{N} / (2m) \quad (10)$$

式中， SNR_0 为零级干涉条纹处的信噪比。故系统在谱域(400—1000 nm)的理论平均信噪比为：

$$SNR = \frac{\lambda_H^2 \sqrt{2A_D} \tau_d \eta_k}{\Delta\lambda \lambda_L f^2 \sqrt{N}} \left(\frac{D}{2}\right)^2 \int_{400}^{1000} R_M^2(\lambda) T_f(\lambda) \times T_c(\lambda) E(\lambda) \rho(\lambda) D^*(\lambda) \tau_0(\lambda) \tau_a(\lambda) \times \tau_f(\lambda) [R_s(\lambda) + T_s(\lambda)]^2 d\lambda \quad (11)$$

式中， $\Delta\lambda$ 、 λ_L 和 λ_H 分别为谱域带宽、波长下限和波长上限。

为讨论方便，设 $R_M(\lambda)$ 、 $T_f(\lambda)$ 、 $T_c(\lambda)$ 、 $R_s(\lambda)$ 、 $T_s(\lambda)$ 、 $\tau_a(\lambda)$ 、 $\tau_0(\lambda)$ 、 $\tau_f(\lambda)$ 、 $\rho(\lambda)$ 在整个谱段(400—1000 nm)上为常量，分别表示为 R_M 、 T_f 、 T_c 、 R_s 、 T_s 、 τ_a 、 τ_0 、 τ_f 和 ρ 。故有：

$$SNR = \frac{\lambda_H^2 \sqrt{2A_D} \tau_d \eta_k}{\Delta\lambda \lambda_L f^2 \sqrt{N}} \left(\frac{D}{2}\right)^2 R_M^2 T_f T_c (R_s + T_s)^2 \tau_0 \tau_a \tau_f \rho \times \int_{400}^{1000} E(\lambda) D^*(\lambda) d\lambda \quad (12)$$

下速度 $V = 6.62 \text{ km/s}$ 。前置光学系统焦距 $f = 70 \text{ mm}$ ，口径 $D = 30 \text{ mm}$ ，光学系统透过率 τ_0 设为 0.9，衰减滤光片透过率 τ_f 设为 0.05。天顶角 Z 取 30° 。地物反射率 ρ 设为 0.5。 τ_a 和 $E(\lambda)$ 采用中纬度夏季、能见度为 23 km 时的大气模型和太阳在地面的辐照度数据。傅里叶光学系统焦距 $f' = 100 \text{ mm}$ 。面阵探测器选用 EG&G RETICON 公司的 HS0512J^[5] 型 CCD (512×512)。 $D^*(\lambda)$ 采用产品给出的标称量子效率数据。其他参数设为： $R_M = 0.98$ ， $T_f = T_c = 0.98$ ， $R_s = T_s = 0.45$ 。再令 $x = pn$ (n 为探测器阵元序数，取值 $0 \sim (N-1)$ ， p 为探测器阵元间距)，则由公式(7)计算所得的干涉条纹信噪比 SNR_n 与阵元序数 n 的关系曲线如图 2(为清楚起见，只画出对应 $0 \sim 150$ 阵元的曲线)。

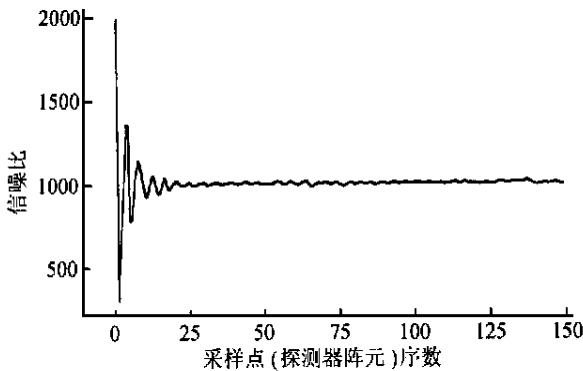


图 2 干涉条纹(单边)采样点处理论计算信噪比

Fig. 2 Signal-to-noise ratio at sample points of interferogram
由公式(12)计算所得的系统在谱域(400—1000 nm)的理论平均信噪比为：

$$SNR = 423$$

3 结果分析和结论

对公式(12)的分析可以得出如下结论：

(1)系统信噪比与单边干涉图采样点数的 $1/2$ 次方成反比。减少采样点数有利于系统信噪比的提

高，但却会使光谱分辨率降低，所以应合理选取。

(2)选用大面积的探测器可以提高系统的信噪比，但在确定的瞬时视场 $\left\{ \beta = \sqrt{A_d/f} \right\}$ 的情况下，探测器面积的增大就要增加系统的焦距，相应地光谱仪体积和重量也随之增加。此外，探测器的面积过大，其性能也会下降。

(3)当系统的探测器和瞬时视场确定后，在光学系统的设计中，在像质允许的情况下，光学系统的 F 数(= f/D)应尽量小，系统的信噪比随 F 数的减小以平方关系增加。

(4)增加像元的凝视时间，即积分时间，可以提高系统信噪比。这可通过提高光机扫描效率、多元并扫或面阵推扫的办法实现。

(5)系统信噪比与波长上限、波长下限及谱段宽度有关，这要根据应用要求和实现可能性来选定。

上述信噪比表达式及相应的结论是在所确定的系统参数和像元积分时间能够保证探测器各阵元的电子势阱充分添充，使探测器的暗电流、放大器噪声及读出噪声足够小，从而满足光子发射噪声受限响应的前提下得到的。据报道，现今的焦平面阵列探测器技术已能够提供这样的条件。

参 考 文 献 (References)

- [1] Richard R. Treffers. Signal-to-noise ratio in Fourier spectroscopy [J]. *APPLIED OPTICS*, 1997, **16**(12): 3103.
- [2] Yu Bing-Xi. Performance analyzing on Imaging Spectrometer [A]. *INFORMATION OF OPTICS AND MECHANICS*, Special volume on Imaging Spectrometer [C]. 1995. [禹秉熙. 成像光谱仪的性能分析[A]. 光机情报, 成像光谱仪专集[C], 1995.]
- [3] Charles L. Bennett. et al. Hyperspectral Imaging in the Infrared Using LIFTIRS [J]. *SPIE*, **2883**, 1996.
- [4] William L. Wolfe. Introduction to Imaging Spectrometers [M]. SPIE OPTICAL ENGINEERING PRESS, Bellingham, Washington USA, 1997.
- [5] Products direction of EG&G RETICON corporation. Image Sensing and Solid State Camera Products 1995/1996.

Analysis for Signal-to-noise Ratio of Imaging Fourier Transform Spectrometer

JIN Xi-zhe, XIANG Yang, YU Bing-xi

(State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022, China)

Abstract: The general expression about SNR of Spatially Modulated Imaging Fourier Transform Spectrometer is deduced in detail, and Sagnac type Imaging Fourier Transform Spectrometer is chosen as analysis model. The relationship between affection factors and SNR is analyzed and corresponding conclusion is obtained.

Key words: imaging Fourier transform spectrometer; SNR (signal-noise-ratio)