

# 双通道剪切干涉高光谱成像方法的信噪比分析

刘成淼<sup>1,2</sup>, 李建欣<sup>1,2</sup>, 朱日宏<sup>1,2</sup>, 崔向群<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>南京理工大学电子工程与光电技术学院, 江苏南京 210094;

<sup>2</sup>南京理工大学先进固体激光工业和信息化部重点实验室, 江苏南京 210094;

<sup>3</sup>中国科学院国家天文台南京天文光学技术研究所, 江苏南京 210042

**摘要** 提出一种基于双通道剪切干涉的高光谱成像方法, 并对其进行了信噪比(SNR)分析。介绍了干涉光谱成像系统的光谱复原 SNR, 对双矩形剪切干涉原理及双通道差分探测 SNR 进行了论述及仿真。搭建了实验装置, 对实际场景目标进行了光谱成像 SNR 对比实验, 获得了双通道差分探测系统的光谱探测 SNR, 并与非差分探测系统 SNR 进行了对比分析。结果表明所提差分干涉高光谱成像系统的光谱 SNR 为单通道系统的 $\sqrt{2}$ 倍。

**关键词** 成像系统; 光谱学; 干涉光谱成像; 双通道剪切; 信噪比

中图分类号 O433

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0511001

## Signal-to-Noise Ratio Analysis of Dual-Channel Shearing Interferometry Hyperspectral Imaging Method

Liu Chengmiao<sup>1,2</sup>, Li Jianxin<sup>1,2</sup>, Zhu Rihong<sup>1,2</sup>, Cui Xiangqun<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science and Technology,  
Nanjing, Jiangsu 210094, China;

<sup>2</sup> MIIT Key Laboratory of Advanced Solid Laser, Nanjing University of Science and Technology,  
Nanjing, Jiangsu 210094, China;

<sup>3</sup> Nanjing Institute of Astronomical Optics and Technology, National Astronomical Observatories,  
Chinese Academy of Sciences, Nanjing, Jiangsu 210042, China

**Abstract** A hyperspectral imaging method based on dual-channel shearing interferometry is proposed and its signal-to-noise ratio (SNR) is analyzed. The spectral restoration SNR of interferometry spectral imaging system is introduced. The principle of dual-rectangle shearing interferometry and SNR of dual-channel differential detection are discussed and simulated. The experimental apparatus is built, and the SNR contrast experiment of the actual scene target is carried out. The spectral detection SNR of dual-channel differential detection system is obtained, which is compared and analyzed with SNR of non-differential detection system. Results show that the spectral SNR of the proposed differential interferometry hyperspectral imaging system is  $\sqrt{2}$  times as that of the single-channel system.

**Key words** imaging systems; spectroscopy; interference spectral imaging; dual-channel shearing; signal-to-noise ratio

**OCIS codes** 110.3175; 110.4234; 300.6300

## 1 引言

干涉光谱成像是结合光谱处理和成像的多维信

息获取处理技术, 可以获得二维空间及一维光谱信息, 得到目标的三维数据立方体。该技术通过分析多维信息可以更好地对目标进行识别和鉴定, 具有

收稿日期: 2017-09-05; 收到修改稿日期: 2017-11-18

基金项目: 国家自然科学基金(61475072)、国家重大科学仪器设备开发专项(2013YQ150829)、中央高校基本科研业务费专项(30916014112-010)

作者简介: 刘成淼(1989—), 男, 博士研究生, 主要从事成像光谱偏振技术方面的研究。

E-mail: liuchengmiao10@aliyun.com

导师简介: 李建欣(1977—), 男, 博士, 副教授, 博士生导师, 主要从事精密光学测试与干涉成像光谱技术等方面的研究。

E-mail: ljjx@vip.163.com(通信联系人)

高通量和多通道的优点<sup>[1-4]</sup>,基于该光学探测技术已发展形成多种干涉光谱成像方法,在天文物理研究、地球资源普查和生物医学等领域具有巨大的发展潜力<sup>[5-12]</sup>。信噪比(SNR)是表征多光谱成像的一项重要指标,在图像质量评价、数据处理等方面都有重要作用。

与传统色散型光谱成像仪相比,干涉成像光谱仪在获取目标的二维图像以及一维光谱数据立方体时,需要经过分束、干涉、傅里叶逆变换等一系列更为复杂的物理与数学过程<sup>[13-18]</sup>,涉及的技术环节更多。近年来,国内外研究人员对此类仪器的信噪比进行了深入研究,Fujimoto等<sup>[19]</sup>采用方差法对干涉光谱成像仪进行信噪比评估,将图像中选定的均匀区域作为计算输入,区域内全部像元的平均灰度值作为信号,全部像元的标准差作为噪声,计算的平均灰度值和标准差的比值作为信噪比。Gao等<sup>[20]</sup>提出了局部方差法,该方法将选取区域划分为多个子区域,对全部子区域信噪比取平均;Curran等<sup>[21]</sup>通过计算图像中几条均匀窄条带区域半方差函数来估算图像噪声值;Roger等<sup>[22]</sup>提出通过多元线性回归的方法去除高相关性信号,把残差图像作为计算噪声的数据;陈琦等<sup>[23]</sup>也给出了干涉图信噪比的计算方法。以上对干涉光谱成像仪信噪比的研究主要针对干涉图信噪比,无法准确反映光谱复原的信噪比。针对光谱信息,Bennett等<sup>[24]</sup>给出干涉图零光程差处信噪比与平均光谱信噪比的关系式,但式中未关联光谱复原方法等对光谱信噪比具有重要影响的因素,因此计算结果仅具有定性分析作用<sup>[25]</sup>。Pritt等<sup>[26]</sup>利用离散求解方法推导了时间调制型和空间调制型干涉成像光谱仪的光谱信噪比公式。张淳民等<sup>[27]</sup>提出了新型偏振干涉成像光谱仪信噪比分析方法。王爽等<sup>[28]</sup>基于光谱能量的调制、采样、光谱复原的传输过程建立了时空联合调制干涉成像光谱仪光谱信噪比评估模型,以上信噪比评估方法仅对单通道干涉光谱成像系统进行分析,未涉及双通道系统整体信噪比的研究。

本文提出一种基于双通道剪切干涉的光谱成像方法,并进行光谱信噪比分析,通过双通道差分同步干涉信息探测提高系统信噪比。对干涉光谱成像系统的信噪比进行分析,对双通道剪切及差分干涉测量原理进行了论述与理论仿真。搭建了实验装置,对实际场景目标进行光谱成像信噪比对比实验,获得了双通道差分探测系统的光谱探测信噪比,并与非差分探测系统信噪比进行了对比分析。

## 2 干涉型成像光谱仪信噪比理论

### 2.1 光谱复原与信噪比定义

干涉型成像光谱仪通过在成像系统中加入干涉调制装置,使入射光经过调制后在像面上形成叠加干涉条纹的目标图像。像面上的光强分布为

$$I(\Delta) = \int_0^{+\infty} B(\nu) [1 + \cos(2\pi\nu\Delta)] d\nu, \quad (1)$$

式中: $\nu$ 为波数; $B(\nu)$ 为目标在波数为 $\nu$ 谱段处的光谱分量信号; $\Delta$ 为像面上相应位置对应的光程差。根据干涉信号与光谱信息所对应的傅里叶变换关系,对干涉信号进行傅里叶变换,即可得到所对应的物点光谱信息。在光程差双边对称采样的情况下,对干涉信号进行离散傅里叶变换再取实部,得到每个谱段信号强度为

$$B(\nu) = \frac{2\Delta_{\max}}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \{[I(\Delta_n) - \bar{I}_0] \cos(2\pi\nu\Delta_n)\}, \quad (2)$$

式中: $\bar{I}_0 = \int_0^{+\infty} B(\nu) d\nu$ ; $N$ 为离散傅里叶变换采样点数; $\Delta_n$ 为干涉信号采样点对应的光程差; $\Delta_{\max}$ 为双边对称采样可获得的最大光程差。

干涉型成像光谱仪信噪比包括干涉图的信噪比及复原光谱的信噪比。干涉图信噪比反映的是干涉光谱成像仪获得的原始图像质量。由于从原始图像变换到光谱图像需要进行光谱复原,原始图像信噪比尽管能在一定程度上反映仪器的成像质量,仍无法评价成像光谱仪的光谱响应性能,因此需要对重构光谱图像进行信噪比分析评价。

光谱仪在特定波段处的光谱信噪比可定义为

$$R_{SN}(\nu) = \frac{B(\nu)}{\sigma(\nu)}, \quad (3)$$

式中 $\sigma(\nu)$ 为复原光谱信号的噪声标准差。

### 2.2 光谱信噪比理论

在光谱仪的成像过程中,各个环节都会引入噪声,噪声主要来源于成像系统引入的系统读出噪声及辐射信号自身带来的光子噪声。因此叠加了噪声的干涉图强度经探测器采样后,可以表示为

$$I'(\Delta_n) = I(\Delta_n) + e(\Delta_n) + p(\Delta_n), \quad (4)$$

式中 $e(\Delta_n)$ 、 $p(\Delta_n)$ 分别表示因电路噪声、光子噪声引起的光强采样随机变化,是与相邻空间位置不相关的随机变量,其数学期望为0,方差分别为 $\sigma_e^2$ 、 $\sigma_p^2$ ,即

$$E[p(\Delta_n)] = E[e(\Delta_n)] = 0, \quad (5)$$

$$E[p(\Delta_i)p(\Delta_j)]|_{i \neq j} = E[e(\Delta_i)e(\Delta_j)]|_{i \neq j} = 0. \quad (6)$$

系统读出噪声分为来自传感器芯片内部的片上噪声和来自外部成像电路的噪声。片上噪声是指由芯片内部工艺或其他因素引起的噪声。以CCD器件为例,片上噪声主要来源于暗电流、寄生电荷、胖零电荷、转移噪声、读出放大器等<sup>[29]</sup>;片外噪声即来自传感器外部的噪声,指传感器外围成像电路中可能带来的噪声,主要来源于放大器噪声、模数(AD)量化噪声、时钟抖动噪声、电磁干扰、图像串扰、光泄漏等。

理论上,电子系统的总噪声方差为各项噪声电子数的平方和。考虑到目前器件工艺水平及选用标准,由晶振、电压变换器、时序驱动器等带来的干扰可以压制在一个较低的量值,则图像信号链路上的电路噪声主要由探测器读出噪声 $\sigma_e$ 、暗电流噪声 $\sigma_{\text{dark}}$ 、放大器噪声 $\sigma_{\text{AM}}$ 和AD器件噪声 $\sigma_{\text{AD}}$ 构成<sup>[30]</sup>。假定各项噪声相互独立,则电路噪声的方差可简化为

$$\sigma_e^2 = \sigma_e^2 + \sigma_{\text{dark}}^2 + \sigma_{\text{AM}}^2 + \sigma_{\text{AD}}^2。 \quad (7)$$

光子噪声源于辐射源光子数的起伏。辐射源的光子数服从玻色-爱因斯坦统计,在某个均值附近起伏,这种起伏产生光子噪声。光子噪声起伏是一种随机过程,服从泊松分布<sup>[31]</sup>,即期望值与方差相等。在可见光近红外波段,一般可认为光子噪声的方差与探测器光电转换生成的信号电子数相等<sup>[29]</sup>,即 $\sigma_p^2 = I(\Delta_n)$ 。带有噪声的复原光谱可以表示为

$$B'(\nu) = B(\nu) + P(\nu) + E(\nu)。 \quad (8)$$

基于第2.1节的光谱复原方法和随机过程理论,可得电路噪声在光谱域中的噪声方差为

$$\sigma_E^2(\nu) = E[E^2(\nu)] = \frac{2\Delta_{\max}^2\sigma_e^2}{N} + \frac{2\Delta_{\max}^2}{N^2} \times \sum_0^{N-1} E[e^2(\Delta_n)\cos(4\pi\nu\Delta_n)], \quad (9)$$

式中 $\frac{2\Delta_{\max}^2}{N^2} \sum_0^{N-1} E[e^2(\Delta_n)\cos(4\pi\nu\Delta_n)]$ 相当于对余弦函数求和,当N足够大时此项近似为0,最终系统的复原光谱噪声方差为

$$\sigma_E^2(\nu) = E[E^2(\nu)] \approx \frac{2\Delta_{\max}^2}{N}\sigma_e^2。 \quad (10)$$

与之类似,可以推导出光子噪声在光谱域中的噪声方差为

$$\sigma_P^2(\nu) = E[P^2(\nu)] = \frac{2\Delta_{\max}^2}{N^2} \sum_0^{N-1} E\{\bar{I} + \tilde{I}(\Delta_n)[1 + \cos^2(4\pi\nu\Delta_n)]\}, \quad (11)$$

式中: $\bar{I}$ 为干涉直流信号; $\tilde{I}(\Delta_n)$ 为干涉图交流分量。

将(11)式进一步展开简化,得到

$$\sigma_P^2(\nu) = E[P^2(\nu)] \approx \frac{2\Delta_{\max}^2\bar{I}}{N}, \quad (12)$$

则总的噪声方差为

$$\sigma^2(\nu) = \sigma_P^2(\nu) + \sigma_E^2(\nu) = \frac{2\Delta_{\max}^2(\sigma_e^2 + \bar{I})}{N}。 \quad (13)$$

根据以上分析,干涉成像光谱仪每个谱段的信噪比可表示为

$$R_{\text{SN}}(\nu) = \frac{B(\nu)\sqrt{N}}{\sqrt{2}\Delta_{\max}\sqrt{\sigma_e^2 + \bar{I}}}。 \quad (14)$$

### 3 双通道剪切干涉光谱成像方法信噪比分析

#### 3.1 双通道剪切干涉光谱成像方法

双通道干涉成像系统在无限远成像系统中加入双矩形横向剪切分束器,此分束器的两个通道分别对入射光线进行横向剪切,从而引入光程差信息。每个通道的出射光通过成像镜分别在像面上形成探测目标的自相关调制干涉图像,基于光谱信息与干涉信息之间的傅里叶变换关系获得目标光谱信息。如图1所示,双通道横向剪切干涉光谱成像系统主要由无限远成像系统、双通道横向剪切分束器、图像采集系统组成。

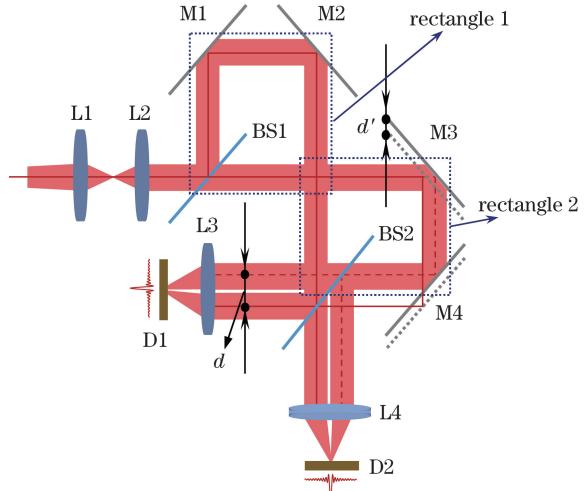


图1 双通道横向剪切干涉光谱成像系统原理示意图

Fig. 1 Schematic of dual-channel lateral shearing interferometric spectral imaging system

成像物镜L1的后焦面与成像物镜L2的前焦面重合,目标光线经过由L1和L2组成的前置光学系统后准直为平行光进入横向剪切系统。双通道剪切干涉装置由2个分束镜(BS1、BS2)与4个反射镜

(M<sub>1</sub>、M<sub>2</sub>、M<sub>3</sub>、M<sub>4</sub>)组成,光线在双通道剪切器中的传播路径为两个矩形,如图1所示,所以该结构被命名为双矩形横向剪切分束器。光线进入剪切干涉装置后被分束镜BS1分为两路,一路经反射镜M<sub>1</sub>、M<sub>2</sub>两次反射,另一路经反射镜M<sub>3</sub>、M<sub>4</sub>两次反射,两路光分别通过分束镜BS2出射,其中M<sub>1</sub>、M<sub>2</sub>及M<sub>3</sub>、M<sub>4</sub>分别相互垂直,M<sub>1</sub>、BS1、BS2和M<sub>4</sub>相互平行,如图1所示。当M<sub>3</sub>与M<sub>4</sub>处于图1中虚线位

置时,M<sub>2</sub>、M<sub>3</sub>处于同一平面,M<sub>1</sub>、M<sub>2</sub>、BS1与M<sub>3</sub>、M<sub>4</sub>、BS2位置呈镜面对称时,两路光线经BS2出射后完全重合。当M<sub>3</sub>、M<sub>4</sub>同时向上方平移一段距离d'至实线位置时,光线经M<sub>4</sub>反射后会向上平移距离d,光路展开如图2所示,即最后由BS2透射的两条光线与由BS2反射的两条光线分别被横向剪开来,形成双通道横向剪切。两个通道的出射光分别由成像镜L<sub>3</sub>、L<sub>4</sub>在探测器D<sub>1</sub>、D<sub>2</sub>上进行成像。

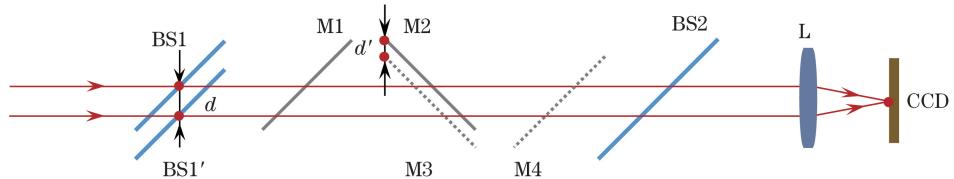


图2 双矩形横向剪切分束器光路示意图

Fig. 2 Schematic of optical path of dual-rectangle lateral shearing beam splitter

这种结构的横向剪切仪的优点是产生横向剪切方向光束的同时将光路分开,光线在同一分束膜处只通过一次,因此不会产生回溯光,能够充分利用光能。

目标上不同物点对应不同入射角 $\theta$ 的平行光束进入干涉成像系统,光束剪切方向的入射角为 $\theta_x$ ,垂直于光束剪切方向的入射角为 $\theta_y$ 。当平行光束进入系统并经过横向剪切分束器后,在x方向被横向剪切成两束光。这两束光的等光程面与横向剪切分束器的光束出射面平行,而对于后面的成像系统而言,入射平行光束的等光程面垂直于入射光束。当横向剪切分束器的出射面垂直于系统光轴时,对于 $\theta_x$ 不为0的光束,两个等光程面不重合,则入射平行光束通过成像系统到达像面同一点时,光程差(OPD)的存在会导致干涉的形成,y方向无剪切量,所以 $\theta_y$ 的不同不会在像面上产生光程差,像面上形成叠加着y方向竖直干涉条纹的目标图像。

双矩形剪切干涉器中,两路光线在经过分束镜BS2后形成双通道横向剪切光束,一路光线由空气介质入射到分束镜介质,光线在由光疏介质射到光密介质的反射过程中存在 $\pi$ 相位变化,导致两个通道的干涉数据具有相位相反的特点,即两个通道获得的图像干涉条纹明暗分布相反,如图3所示。图3(a)、图3(c)分别为两个通道获取的目标干涉图像,分别放大两个通道获取的目标干涉图像,同位置区域如图3(b)所示,可以看出两个通道干涉图像的条纹明暗位置分布相反。

### 3.2 系统信噪比分析

两个通道像面位置上探测器获得的干涉光强分

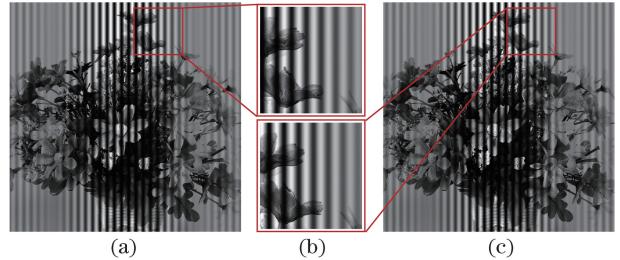


图3 叠加干涉条纹的目标图像。(a)通道1获得的干涉图像;(b)两个通道图像干涉条纹相位对比;(c)通道2获得的干涉图像

Fig. 3 Target images superimposed with fringe pattern.

(a) Interference image from channel 1;

(b) comparison of interference images from two channels;

(c) interference image from channel 2

布为

$$I_1(\Delta) = \bar{I}_1 + e_1(\Delta) + p_1(\Delta) + \int_{\nu_{\min}}^{\nu_{\max}} B(\nu) \cos(2\pi\nu\Delta) d\nu, \quad (15)$$

$$I_2(\Delta) = \bar{I}_2 + e_2(\Delta) + p_2(\Delta) - \int_{\nu_{\min}}^{\nu_{\max}} B(\nu) \cos(2\pi\nu\Delta) d\nu. \quad (16)$$

根据干涉信号的反相特性,取两信号之差可得

$$I(\Delta) = \bar{I}_1 - \bar{I}_2 + e_1(\Delta) - e_2(\Delta) + p_1(\Delta) - p_2(\Delta) + 2 \int_{\nu_{\min}}^{\nu_{\max}} B(\nu) \cos(2\pi\nu\Delta) d\nu. \quad (17)$$

将差分信号作为干涉信息,作光谱复原运算可得

$$B'(\nu) = \frac{2\Delta_{\max}}{N} \sum_{n=0}^{N-1} [I(\Delta_n) - \bar{I}_1 + \bar{I}_2] \cos(2\pi\nu\Delta) = B_1(\nu) + B_2(\nu) + P(\nu) + E(\nu), \quad (18)$$

式中 $B_1(\nu)$ 与 $B_2(\nu)$ 分别为通道1和通道2的复原

光谱。复原光谱中系统读出的噪声方差为

$$\begin{aligned}\sigma_E^2(\nu) = & E[E^2(\nu)] = E\left\{\left(\frac{2\Delta_{\max}}{N} \sum_{n=0}^{N-1} [e_1(\Delta_n) - e_2(\Delta_n)] \cos(2\pi\nu\Delta_n)\right)^2\right\} = \\ & \frac{2\Delta_{\max}^2 \sigma_{e1}^2}{N} + \frac{2\Delta_{\max}^2 \sigma_{e2}^2}{N} + \frac{2\Delta_{\max}^2}{N^2} \sum_{n=0}^{N-1} E[e_1^2(\Delta_n) \cos(4\pi\nu\Delta_n)] + \frac{2\Delta_{\max}^2}{N^2} \sum_{n=0}^{N-1} E[e_2^2(\Delta_n) \cos(4\pi\nu\Delta_n)],\end{aligned}\quad (19)$$

式中  $\frac{2\Delta_{\max}^2}{N^2} \sum_{n=0}^{N-1} E[e_1^2(\Delta_n) \cos(4\pi\nu\Delta_n)] + \frac{2\Delta_{\max}^2}{N^2} \times$

$\sum_{n=0}^{N-1} E[e_2^2(\Delta_n) \cos(4\pi\nu\Delta_n)]$  相当于对余弦函数求和,

当  $N$  足够大时此项近似为 0, 最终系统读出噪声带来的复原光谱噪声方差为

$$\sigma_E^2(\nu) \approx \frac{2\Delta_{\max}^2 \sigma_{e1}^2}{N} + \frac{2\Delta_{\max}^2 \sigma_{e2}^2}{N} = \sigma_{E1}^2(\nu) + \sigma_{E2}^2(\nu).\quad (20)$$

$$\begin{aligned}\sigma_P^2(\nu) = & \frac{2\Delta_{\max}^2 \bar{I}_1}{N} + \frac{2\Delta_{\max}^2}{N^2} \sum_{n=0}^{N-1} I'_1(\Delta_n) + \frac{2\Delta_{\max}^2}{N^2} \sum_{n=0}^{N-1} [\bar{I}_1 \cos(4\pi\nu\Delta_n)] + \frac{2\Delta_{\max}^2}{N^2} \sum_{n=0}^{N-1} [I'_1(\Delta_n) \cos(4\pi\nu\Delta_n)] + \\ & \frac{2\Delta_{\max}^2 \bar{I}_2}{N} + \frac{2\Delta_{\max}^2}{N^2} \sum_{n=0}^{N-1} I'_2(\Delta_n) + \frac{2\Delta_{\max}^2}{N^2} \sum_{n=0}^{N-1} [\bar{I}_2 \cos(4\pi\nu\Delta_n)] + \frac{2\Delta_{\max}^2}{N^2} \sum_{n=0}^{N-1} [I'_2(\Delta_n) \cos(4\pi\nu\Delta_n)].\end{aligned}\quad (22)$$

当  $N$  足够大时, 干涉图交流分量和余弦函数的平均值均近似为 0。对于宽光谱入射的情况, 有  $\bar{I} \gg B'(\nu)$ , 将(22)式化简得到由光子噪声带来的复原光谱噪声方差为

$$\sigma_P^2(\nu) \approx \frac{2\Delta_{\max}^2 (\bar{I}_1 + \bar{I}_2)}{N} = \sigma_{p1}^2(\nu) + \sigma_{p2}^2(\nu).\quad (23)$$

由以上分析可得, 利用双通道系统获得的光谱、噪声方差与单通道系统获得的光谱及噪声方差的关系可表示为

$$B(\nu) = B_1(\nu) + B_2(\nu),\quad (24)$$

$$\sigma^2(\nu) = \sigma_1^2(\nu) + \sigma_2^2(\nu).\quad (25)$$

式中  $\sigma_1(\nu)$  与  $\sigma_2(\nu)$  分别为通道 1 和通道 2 的光谱噪声方差。双通道剪切干涉系统中, 当分束镜的分束比均为 1:1 时, 两个通道的读出噪声及光子噪声方差相等, 即

$$B(\nu) = 2B_1(\nu) = 2B_2(\nu),\quad (26)$$

$$\sigma^2(\nu) = 2\sigma_1^2(\nu) = 2\sigma_2^2(\nu),\quad (27)$$

$$R_{SN}(\nu) = \frac{B(\nu)}{\sigma(\nu)} = \sqrt{2} \frac{B_1(\nu)}{\sigma_1(\nu)} = \sqrt{2} \frac{B_2(\nu)}{\sigma_2(\nu)}.\quad (28)$$

可见, 双通道系统的最终光谱信号获取强度为单通道的 2 倍, 双通道系统的噪声标准差为单通道的  $\sqrt{2}$  倍, 即双通道光谱探测信噪比为单通道的  $\sqrt{2}$  倍。

与之类似, 可以推导出光子噪声带来的复原光谱噪声方差为

$$\begin{aligned}\sigma_P^2(\nu_i) = & \frac{2\Delta_{\max}^2}{N^2} \sum_{n=0}^{N-1} P\{\bar{I}_1 + I'_1(\Delta_n)\}[1 + \cos(4\pi\nu\Delta_n)] + \\ & \frac{2\Delta_{\max}^2}{N^2} \sum_{n=0}^{N-1} P\{\bar{I}_2 + I'_2(\Delta_n)\}[1 + \cos(4\pi\nu\Delta_n)],\end{aligned}\quad (21)$$

式中  $\bar{I}_1, \bar{I}_2$  为两个通道的干涉直流信号,  $I'_1, I'_2$  为干涉图交流分量。将(21)式进一步展开得

## 4 仿真与实验分析

### 4.1 信噪比仿真

针对第 3 节的分析进行光谱复原信噪比仿真, 分别计算出双通道干涉光谱成像系统单通道及双通道光谱探测模式的信噪比。图 4(a)给出了仿真计算的理想光谱曲线; 两个通道的探测器分别获得包含噪声的光谱干涉曲线, 如图 4(b)与图 4(c)所示; 将两个通道的干涉信号相减得到差分干涉信号, 如图 4(d)所示。两个通道分别取 200 条干涉曲线, 计算获得 200 条差分干涉曲线, 分别对单通道及双通道模式进行光谱复原信噪比计算。将理想光谱曲线作为信号, 200 条光谱复原曲线对应谱段的均方根差作为噪声, 两个通道单独获得的光谱信噪比  $R_{SN1}, R_{SN2}$  及差分计算获得的光谱信噪比  $R_{SNd}$  的归一化曲线如图 4(e)所示。图 4(f)给出了  $R_{SNd}$  与  $R_{SN1}$  的比值, 由图可见, 通过对干涉信号进行差分处理, 双模式通道的干涉光谱成像系统可将复原光谱信噪比提高至单通道模式的  $\sqrt{2}$  倍。

### 4.2 信噪比测试实验

搭建了如图 5 所示的双通道干涉成像光谱系统实验装置, 器件的光谱镀膜范围为 450~700 nm, 其中 M1、M2、M3、M4 的反射率均为 99.9%。BS1 与

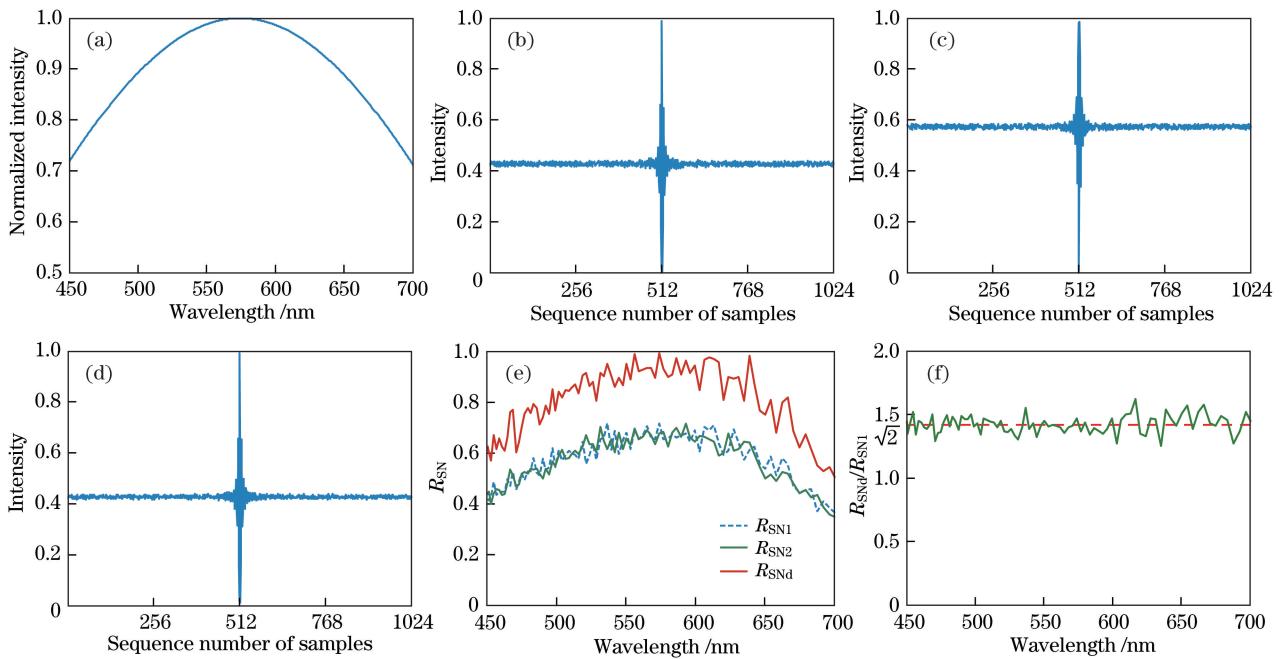


图 4 仿真结果。(a)理想光谱曲线;(b)通道 1 获得的干涉信息;(c)通道 2 获得的干涉信息;(d)双通道差分干涉信息;(e)通道 1、通道 2 以及双通道差分干涉信号复原光谱曲线;(f)双通道差分干涉信号复原光谱信噪比与通道 1 的光谱信噪比之比

Fig. 4 Simulation results. (a) Ideal spectrum; (b) interferogram acquired by channel 1; (c) interferogram acquired by channel 2; (d) dual-channel differential interferogram; (e) spectra reconstructed from interferograms of channel 1, channel 2 and dual-channel differential detection; (f) ratio between spectral SNR of dual-channel differential detection and that of channel 1

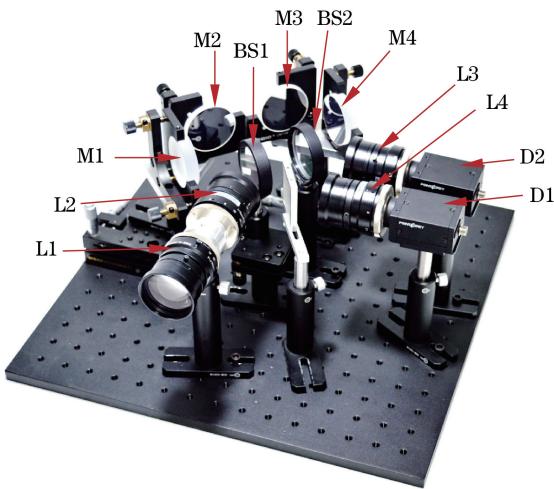


图 5 实验装置图

Fig. 5 Experimental setup

BS2 为分光比为 1:1 的非偏振分束镜。中继镜系统为 1:1 成像, 成像物镜焦距为 75 mm。探测器 D1、D2 均为 PointGreyGS3-U3-23S6M, 像素数为  $1920 \times 1200$ , 像素尺寸为  $5.86 \mu\text{m} \times 5.86 \mu\text{m}$ , 两个探测器通过同步触发进行数据采集。用此系统对 LED 白光灯照明场景进行光谱探测实验, 两个通道获得的场景干涉图像如图 6 所示。

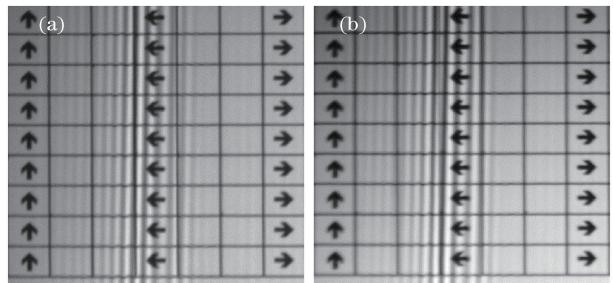


图 6 两个通道分别获得的干涉图像。(a)通道 1;(b)通道 2

Fig. 6 Interference images obtained by two channels.

(a) Channel 1; (b) channel 2

由图 6 可见, 两个通道分别获得的场景干涉图像具有在场景的同一位置处干涉条纹明暗分布相反的特点, 验证了双通道横向剪切干涉系统的双通道反相特性。在此基础上, 两个通道分别对灯光照明的纯白色场景进行光谱探测, 采集干涉图, 每个通道提取干涉图同一空间位置的干涉信息, 获取干涉曲线, 如图 7(a)、(b) 所示; 将两个通道的干涉数据相减, 获取差分干涉信息, 如图 7(c) 所示; 对三组干涉信号分别进行光谱复原, 获得的光谱曲线如图 7(d) 所示, 图 7(d) 同时给出了海洋光学 Ocean Optics USB4000 光谱仪对白光场景光谱信息的测量结果。

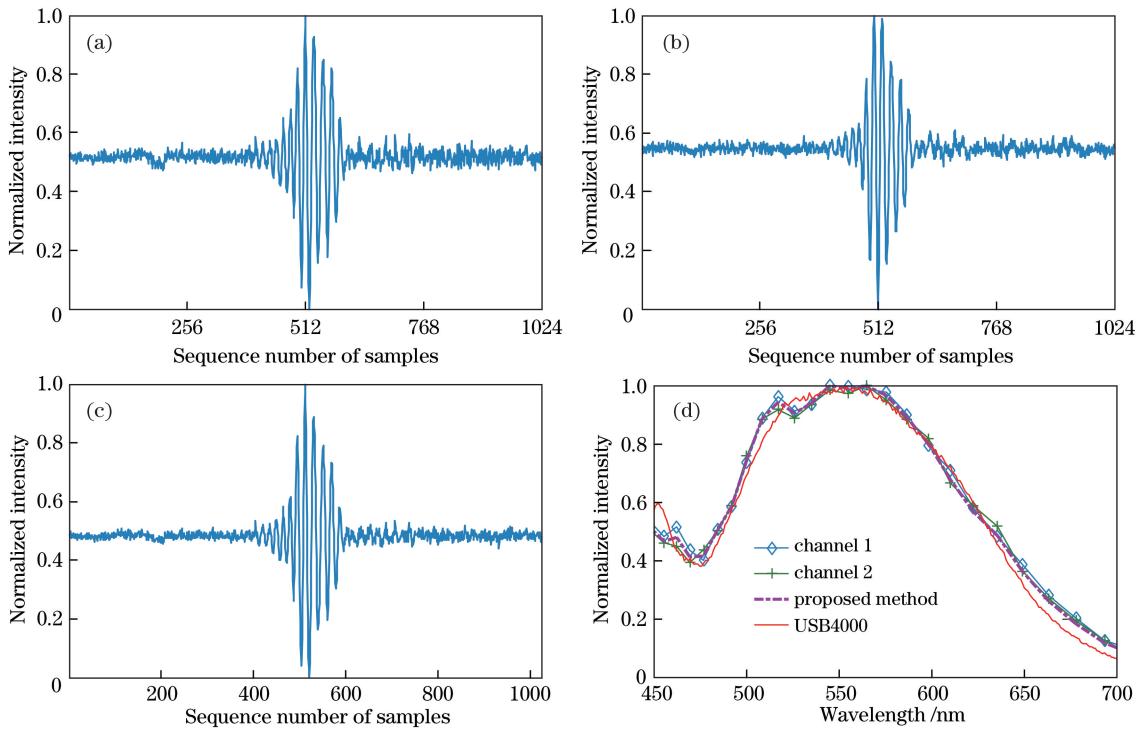


图 7 实验系统获取的干涉曲线与光谱复原曲线。(a)通道 1 获得的干涉曲线;(b)通道 2 获得的干涉曲线;(c)双通道差分干涉曲线;(d)用所提方法及海洋光学 USB4000 分别获取的目标光谱曲线

Fig. 7 Interferograms and spectral recovery curves acquired by experimental system. (a) Interferogram acquired by channel 1; (b) interferogram acquired by channel 2; (c) dual-channel differential interferogram; (d) target spectral curves reconstructed by proposed method and ocean optics SB4000

对比可得,差分干涉信号的光谱复原结果与单通道光谱复原结果一致,且本实验系统的光谱探测结果与 Ocean Optics USB4000 光谱仪的基本一致。

两个通道分别同步获取 200 幅有效干涉图,进而提取 200 组干涉曲线,并计算获取 200 条差分干涉曲线。分别利用离散傅里叶逆变换对干涉数据进行光谱复原,并取实部得到两个通道以及差分信号的 200 组相对光谱信息。每一个谱段的 200 组数据

的平均值作为信号,均方差作为噪声,得出各谱段的光谱信噪比,信噪比归一化曲线如图 8(a)所示。对比可得,两个通道单独获得的光谱信噪比基本一致,由差分信号复原获得的光谱信息信噪比单通道信号有明显提升。图 8(b)给出差分信号复原光谱的各谱段信噪比  $R_{SN_p}$  与单通道复原光谱信噪比  $R_{SN_1}$  的比值,由图可得,实验获得的双通道差分干涉信号复原光谱信噪比约为单通道复原光谱信噪比的  $\sqrt{2}$  倍。

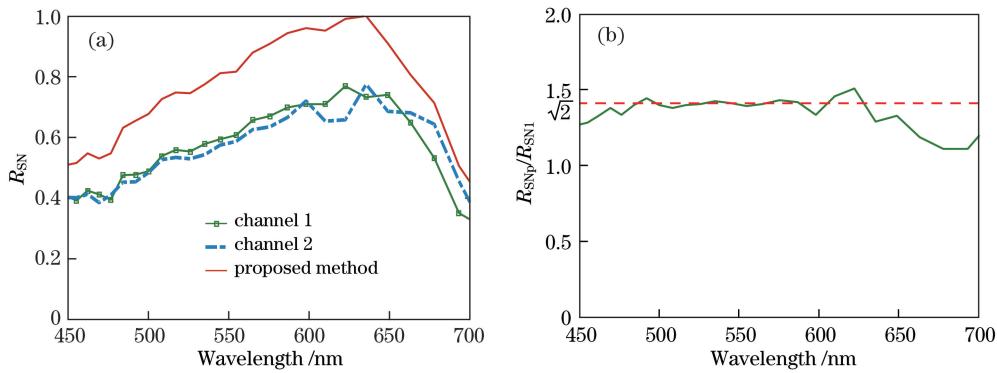


图 8 实验系统的光谱信噪比。(a)通道 1、通道 2 与双通道差分干涉信号获取的复原光谱信噪比曲线;(b)双通道差分信号复原光谱信噪比与通道 1 复原光谱信噪比的比值

Fig. 8 Spectral SNR of experimental system. (a) Spectral SNR of channel 1, channel 2 and dual-channel differential detection; (b) ratio of spectral SNR of dual-channel differential detection and that of channel 1

## 5 结 论

干涉型光谱成像仪的信噪比评价不仅要针对原始干涉图像数据,更应该针对仪器的光谱信噪比。介绍了一种双通道剪切干涉光谱成像方法,并对其光谱信噪比进行了系统分析。基于剪切干涉光谱成像方法,提出利用双矩形干涉器实现双通道剪切干涉的方法,详细介绍了双通道横向剪切干涉器的原理以及设计方法,对基于双通道剪切干涉的差分探测原理进行了论述。两个通道可分别对目标进行同步干涉成像,且两个通道的干涉数据具有相位相反的特点。对干涉光谱成像探测系统的信噪比评估模型进行了论述与分析,针对双通道剪切干涉系统给出了双通道光谱成像信噪比计算方法,并进行理论仿真,搭建了实验装置。对实际场景目标进行光谱成像信噪比对比实验,获得了双通道差分探测系统的光谱探测信噪比,并与非差分探测系统进行了系统信噪比对比分析。结果表明所提双通道差分干涉光谱成像方法的信噪比为传统干涉光谱成像方法的 $\sqrt{2}$ 倍。

## 参 考 文 献

- [1] Malik Z, Cabib D, Buckwald R A, et al. A novel spectral imaging system combining spectroscopy with imaging applications for biology[C]. Proceedings of SPIE, 1995, 2329: 180-184.
- [2] Sellar R G, Boreman G D. Comparison of relative signal-to-noise ratios of different classes of imaging spectrometer[J]. Applied Optics, 2005, 44(9): 1614-1624.
- [3] Korb A R, Dybwad P, Wadsworth W, et al. Portable Fourier transform infrared spectroradiometer for field measurements of radiance and emissivity[J]. Applied Optics, 1996, 35(10): 1679-1692.
- [4] Liu C M, Li J X, Zhu R H, et al. Large field-of-view Fourier transform imaging spectrometer using dual-channel stitching[J]. Optics Express, 2016, 24(25): 28473-28490.
- [5] Goetz A F, Vane G, Solomon J E, et al. Imaging spectrometry for earth remote sensing[J]. Science, 1985, 228(4704): 1147-1153.
- [6] Diner D J, Chipman R A, Beaudry N A, et al. An integrated multiangle, multispectral, and polarimetric imaging concept for aerosol remote sensing from space[C]. Proceedings of SPIE, 2005, 5659: 88-96.
- [7] Stenflo J O, Twerenbold D, Harvey J W, et al. Coherent scattering in the solar spectrum: survey of linear polarization in the range 4200-9950 Å[J]. Astronomy & Astrophysics Supplement Series, 1983, 54: 505-514.
- [8] Gurjar R S, Backman V, Perelman L T, et al. Imaging human epithelial properties with polarized light-scattering spectroscopy[J]. Nature Medicine, 2001, 7(11): 1245-1248.
- [9] Lucke R L, Corson M, McGlothlin N R, et al. Hyperspectral imager for the coastal ocean: instrument description and first images[J]. Applied Optics, 2011, 50(11): 1501-1516.
- [10] Lucey P G, Horton K, Williams T, et al. SMIFTS: a cryogenically-cooled spatially-modulated imaging infrared interferometer spectrometer[C]. Proceedings of SPIE, 1993, 1937: 130-141.
- [11] Meng X, Li J X, Xu T T, et al. High throughput full Stokes Fourier transform imaging spectropolarimetry[J]. Optics Express, 2013, 21(26): 32071-32085.
- [12] Li J X, Meng X, Zhou W, et al. Image plane interferometric hyperspectral imaging based on reimaging[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(12): 1230001.
- [13] Wolfe W L. Introduction to imaging spectrometers[M]. Bellingham: SPIE Press, 1997.
- [14] Schowengerdt R A. Remote sensing: models and methods for image processing[M]. Salt Lake City: Academic Press, 2006.
- [15] Ferrec Y, Ayari-Matallah N, Chavel P, et al. Noise sources in imaging static Fourier transform spectrometers[J]. Optical Engineering, 2012, 51(11): 1716-1726.
- [16] Fu Q, Xiang L B, Jing J J. System signal-to-noise ratio analysis based on imaging chain model in multispectral remote sensing[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(2): 0211001.
- [17] 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.
- [18] Luo H Y, Xiong W, Shi H L, et al. Study for signal-to-noise ratio of spatial heterodyne spectrometer[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(6): 0612001.
- [19] 罗海燕, 熊伟, 施海亮, 等. 空间外差干涉光谱仪信噪比研究[J]. 光学学报, 2017, 37(6): 0612001.
- [20] Liu C M, Li J X, Zhu R H, et al. Interferometric imaging spectropolarimeter using dual-channel lateral shearing beam splitter[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(10): 1011002.
- [21] 刘成森, 李建欣, 朱日宏, 等. 基于双通道剪切干涉的高光谱偏振成像方法[J]. 光学学报, 2017, 37(10): 1011002.

1011002.

- [19] Fujimoto N, Takahashi Y, Moriyama T, *et al.*. Evaluation of spot Hrv image data received in Japan[C]// 12th Canadian Symposium on Remote Sensing, International Geoscience and Remote Sensing Symposium, July 10-14, 1989, Vancouver, Canada, Canada, IEEE, 2: 463-466.
- [20] Gao B C. An operational method for estimating signal to noise ratios from data acquired with imaging spectrometers[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1993, 43(1): 23-33.
- [21] Curran P J, Dungan J L. Estimation of signal-to-noise: a new procedure applied to AVIRIS data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1989, 27(5): 620-628.
- [22] Roger R E, Arnold J F. Reliably estimating the noise in AVIRIS hyperspectral images[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1996, 17(10): 1951-1962.
- [23] Chen Q, Yang J F, Qiao W D, *et al.*. Analysis for signal-to-noise ratio of large aperture static imaging spectroscopy[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, 36(10): 1889-1892.  
陈琦, 杨建峰, 乔卫东, 等. 大孔径静态干涉成像光谱仪的信噪比分析[J]. 光子学报, 2007, 36(10): 1889-1892.
- [24] Bennett C L, Carter M R, Fields D J. Hyperspectral imaging in the infrared using LIFTIRS[C]. *Proceedings of SPIE*, 1995, 2552: 274-283.
- [25] Jin X Z, Xiang Y, Yu B X. Analysis for signal-to-noise ratio of imaging Fourier transform spectrometer[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2000, 4(3): 194-196.
- 金锡哲, 向阳, 禹秉熙. 成像干涉光谱仪信噪比分析[J]. 遥感学报, 2000, 4(3): 194-196.
- [26] Pritt A T, Kupferman P N, Young S J, *et al.*. Imaging LWIR spectrometers for remote sensing applications[C]. *Proceedings of SPIE*, 1997, 3063: 138-149.
- [27] Zhang C M, Huang W J, Zhao B C. Analysis and evaluation on the noise of novel polarization interference imaging spectrometer[J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, 59(8): 5479-5486.  
张淳民, 黄伟健, 赵葆常. 新型偏振干涉成像光谱仪噪声分析与评价[J]. 物理学报, 2010, 59(8): 5479-5486.
- [28] Wang S, Xiangli B, Li L B, *et al.*. Research of spectrum signal-to-noise ratio of large aperture static imaging spectrometer[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2014, 34(3): 851-856.  
王爽, 相里斌, 李立波, 等. 大孔径静态干涉成像光谱仪光谱信噪比研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(3): 851-856.
- [29] Janesick J R. *Scientific charge-coupled devices*[M]. Bellingham: SPIE Press, 2001.
- [30] Wang S. Research on the signal-to-noise ratio of large aperture static imaging spectrometer[D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics & Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2013.  
王爽. 大孔径静态干涉光谱成像仪信噪比研究[D]. 西安: 中国科学院西安光学精密机械研究所, 2013.
- [31] Wang Z H, Zhang G Y. *Physics basic of photons*[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1998.  
王忠和, 张光寅. 光子学物理基础[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998.