

# 激光与光电子学进展

## 色温可调星模拟器光源的研究现状

王凌云\*, 刘笑, 李光茜, 顾航硕, 麻跃

长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022

**摘要** 星敏感器是卫星姿态控制的重要部件,星模拟器作为星敏感器地面性能测试与精度标定设备,其模拟精度对星敏感器姿态控制精度起到了至关重要的作用。简要介绍了星模拟器的组成及工作原理,着重叙述了近 20 年内具有代表性的色温可调星模拟器的光源选取情况,其中最具代表性的光源为 LED、溴钨灯、氙灯、超连续谱激光。通过对光源模拟方案的比较分析,给出了色温可调星模拟器光源的发展趋势。

**关键词** 光学器件; 星模拟器; 色温; 光谱可调; 光源

中图分类号 V216.8

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.2100001

## Research Progress in Light Source of Colour Temperature Tunable Star Simulator

Wang Lingyun\*, Liu Xiao, Li Guangxi, Gu Hangshuo, Ma Yue

School of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

**Abstract** Star sensor is an important device of satellite attitude control. The star simulator is used as a ground performance test and precision calibration equipment of the star sensor, of which accuracy plays an important role in the precision of attitude control. The composition and working principle of the star simulator are briefly described in this paper. In the last 20 years, the selection of light source for the representative star simulator with adjustable colour temperature has been emphatically described. LED, tungsten bromide lamp, xenon lamp and supercontinuum laser are the most common light sources. The development trend of colour temperature tunable star simulator light source is provided through a comparative analysis of these light source simulation schemes.

**Key words** optical devices; star simulator; color temperature; tunable spectrum; light source

**OCIS codes** 230.2090; 300.6170; 350.1270; 220.2740

### 1 引 言

星模拟器是一种通过模拟真实恒星星图来实现星敏感器地面标定的精密仪器。星模拟器的发展趋势为高动态、高精度、多星和高真实度<sup>[1-6]</sup>。传统星模拟器的研制侧重于星等和星间角距等指标,其光源常选取标定过色温的标准光源,仅能模拟少

数特定色温的星点。如美国伊斯曼柯达公司研制的光纤导光星模拟器,它将 3 个不同色温的标准光源出射光线用光纤导出,形成 3 个模拟点光源。近二十年以来,星模拟技术得到了长足的发展,为实现高动态和高真实度,获得逼真的太空场景星图,需要对所模拟星点的真实物理特性进行模拟,色温就是真实恒星的重要物理特性。

收稿日期: 2021-01-08; 修回日期: 2021-01-27; 录用日期: 2021-03-08

基金项目: 吉林省科技发展计划(20180201018GX)

通信作者: \*15004318783@126.com

在可见光波段范围内,恒星辐射近似于某温度下的黑体辐射,恒星光谱曲线可用相应黑体色温曲线表示。物理学中,黑体是完全吸收和完全辐射体,其辐射的光谱功率分布与温度有确定的关系。即当黑体温度  $T$  一定时,其辐射的光谱功率分布就已确定,黑体所呈现的颜色也已确定。根据黑体的热力学温度  $T$  和其颜色间的确定关系,可用黑体温度表示光源的颜色,该热力学温度称为色温。某光源的色温即与光源具有相同色品的黑体温度,不同色温分别对应唯一的黑体辐射相对光谱分布。

恒星的光谱就是恒星的指纹,而其相对光谱分布就是指纹的形状,确定的色温与某个相对光谱分布一一对应。恒星的光谱由恒星的物理性质、化学性质和运动状态共同决定,通过研究恒星光谱可推测出恒星表面物质的化学组成;亦可根据多普勒效应引起的谱线位移和展宽推测恒星的运动状态;还可根据“原子中电子能量分布量子化”原理,通过分析光谱对恒星表面亮度进行计算。

早期的星模拟器为模拟不同色温的星点目标,常采用多滤光片调制的方法。这种方法因滤光片对不同波长光的透过率已确定,很难实现对色温的动态调节。随后科研人员尝试多光源组合的方案,这些方案包括:不同中心波长的 LED 混合光源、“溴钨灯基底光源+LED 补偿光源”、“氙灯基底光源+补偿光源”。使用混合光源虽然实现了色温动态调节,但是光谱匹配度较低。

随着科学技术的不断进步,尤其是空间光学调制器件和新型光源的应用,星模拟技术不断优化,对色温可调星模拟器光源的研究逐渐深入。基于空间光调制器件的色温可调星模拟器光源先后尝试了溴钨灯和氙灯,取得了不错的模拟效果。但超

连续谱激光的应用进一步提高了光谱匹配精度。色温可调光源除了应用于星模拟技术,还可以应用于固态照明器件研制、高精度光学仪器测试、生物化学相关测试、医疗器械、航天光学遥感器辐射定标、超光谱成像技术等领域<sup>[7-9]</sup>。

本文综述了近二十年来色温可调光源的进展。介绍了 4 种适用于星模拟器的基底光源的特点;结合实际案例从色温调制方式的角度做了总结;最后分析了制约色温模拟技术的因素,对色温可调光源在星模拟技术中的应用前景进行了展望。

## 2 常用的 4 种星模拟器光源

如表 1 所示,哈佛大学天文台根据恒星色温不同将恒星分为 7 种类型,该分类标准可作为星敏感器进行星图识别的判定依据。作为星敏感器的标定设备,星模拟器需模拟不同色温的目标星,由此需要选定合适的光源。如图 1 所示,对比不同光源的光谱,排除峰值较多和部分波段能量不足的光源,有 4 种光源适合用于星模拟器:LED、溴钨灯、氙灯、超连续谱激光。

表 1 哈佛大学天文台根据色温对恒星的分类表

Table 1 Classification of stars by color temperature at Harvard Observatory

Star class	Color temperature /K
O	30000-60000
B	10000-30000
A	7500-10000
F	6000-7500
G	5200-6000
K	3700-5200
M	2400-3700

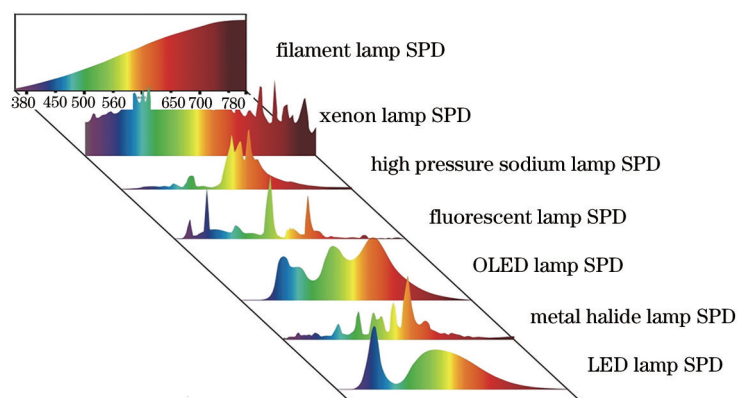


图 1 多种光源的光谱分布

Fig. 1 Spectral distribution of various light sources

LED 光源的光谱带宽多为 20~50 nm, 由多种 LED 组成的 LED 阵列的辐射光谱可覆盖可见光波段, 常见的中心波长的 LED 色温在 2800~6000 K 之间。LED 具有体积小、寿命长、发光效率高、发光强度稳定等优点, 常被光谱可调光源系统所使用。然而, LED 受限于发光介质, 即中心波长的种类有限, 使用 LED 阵列模拟特定色温的光谱时谱线会在某些波段凹陷, 导致光谱匹配误差增大。此外, 使用可变电流驱动 LED 会引起半峰半宽的变化和峰值波长的漂移, 导致匹配光谱抖动, 稳定性差<sup>[10]</sup>。

标准溴钨灯的色温为 2800~3000 K, 光谱范围为 300~2500 nm, 拥有较强的发光强度、宽的光谱范围和稳定的色温。然而, 作为一种热光源, 溴钨灯长时间工作于高温高压状态下时易发生熔断, 故障率偏高; 溴钨灯的短波波段能量偏低, 故溴钨灯不适合单独使用, 需要补偿光源。

氙灯光谱范围为 200~2600 nm, 色温为 5900~6000 K。氙灯光谱范围较宽, 工作寿命内光谱分布稳定, 工作状态受外界环境的影响较小。但工作电流易对氙灯寿命产生影响, 低电流时工作不稳定, 刚启动时容易产生弧飘, 这使得氙灯受热不均匀。

超连续激光是一种新型光源, 又称为白光激光, 其工作原理为激光在光子晶体光纤中产生非线性展宽以输出宽光谱波段的激光<sup>[11-15]</sup>。其被广泛应用于荧光测量、共聚焦显微、光学相干断层成像术等领域。如图 2 所示为 Fianium 公司生产的 SC400 系列白光激光光谱图, 其光谱范围达到 410~2350 nm。白光激光功率密度大, 可见光范围内功率密度远大于传统光源; 且其光束发散角较小, 常被认为是准直输出, 易耦合入光纤, 耦合能量利用率高。单台超连续谱激光器几乎可涵盖整个太阳反射波段, 且对实验室温湿度条件不敏感, 操作维

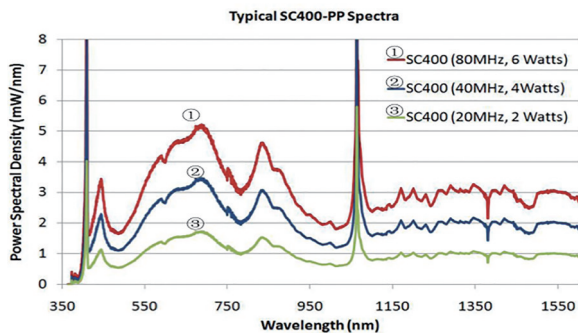


图 2 Fianium 公司 SC400 系列超连续谱激光光谱分布<sup>[12]</sup>  
Fig. 2 Spectrum distribution of SC400 series supercontinuum laser produced by Fianium company<sup>[12]</sup>

护简单。受限于超连续激光输出功率, 经光学系统进入积分球后的光谱辐亮度较弱; 使用的激光必须考虑消除其相干性和偏振性; 可见光波段能量占比小, 导致能量浪费; 白光激光成本较大, 国内对白光激光的研究还处于实验室阶段, 国外的超连续谱激光光源市场被丹麦 NKT Photonics 公司、英国 Fianium 公司和法国 Leukos 公司垄断, 设备价格昂贵。

综上所述, 选取这 4 种光源各有利弊, 为了弥补每种光源的缺陷, 实验室中常采用混合光源的方案来实现光谱可调星点模拟。

### 3 星模拟器光源工作模式分析

星模拟器的基本结构如图 3 所示, 上位机生成的模拟星空图像, 通过星模拟器显示系统, 转换成可见光辐射, 其经光谱调制后进入准直系统, 能够实现模拟星空中恒星可见光辐射的平行输出<sup>[16]</sup>。国外对星模拟器的研究较早, 由于星光模拟技术涉及航空航天和国防工业, 关于星光模拟技术的文献多为近三十年内国内科研人员的研究成果和早期国外的部分成果, 涉及色温可调星模拟器光源的文献屈指可数。国内相关研究起步较晚, 近十年间越来越多的科研人员对星模拟器如何模拟不同光谱分布的星点这一课题展开了探索和研究。

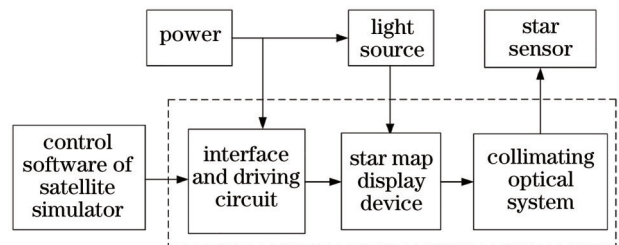


图 3 星模拟器基本结构示意图

Fig. 3 Basic structure diagram of star simulator

如图 4 所示为近二十年来具有代表性的色温可调星模拟器光源发展历程。21 世纪前星模拟器使用单一光源调制模拟星点的光谱。多峰值波长 LED 阵列作为星模拟器的光源标志着星模拟器光源由单光源模式进入混合光源模式, 随后还出现了 LED 与溴钨灯的混合光源、LED 与氙灯的混合光源等。随着空间光调制器件的发展, 星模拟器光源在混合光源技术的基础上, 通过数字微镜器件 (DMD) 实现了目标光谱的模拟。至此, 星光模拟技术的光源进入光谱调制模式, 并在该模式下不断优化。下文根据典型光源结构实例对混合光源模式和光谱调制模式进行了总结。

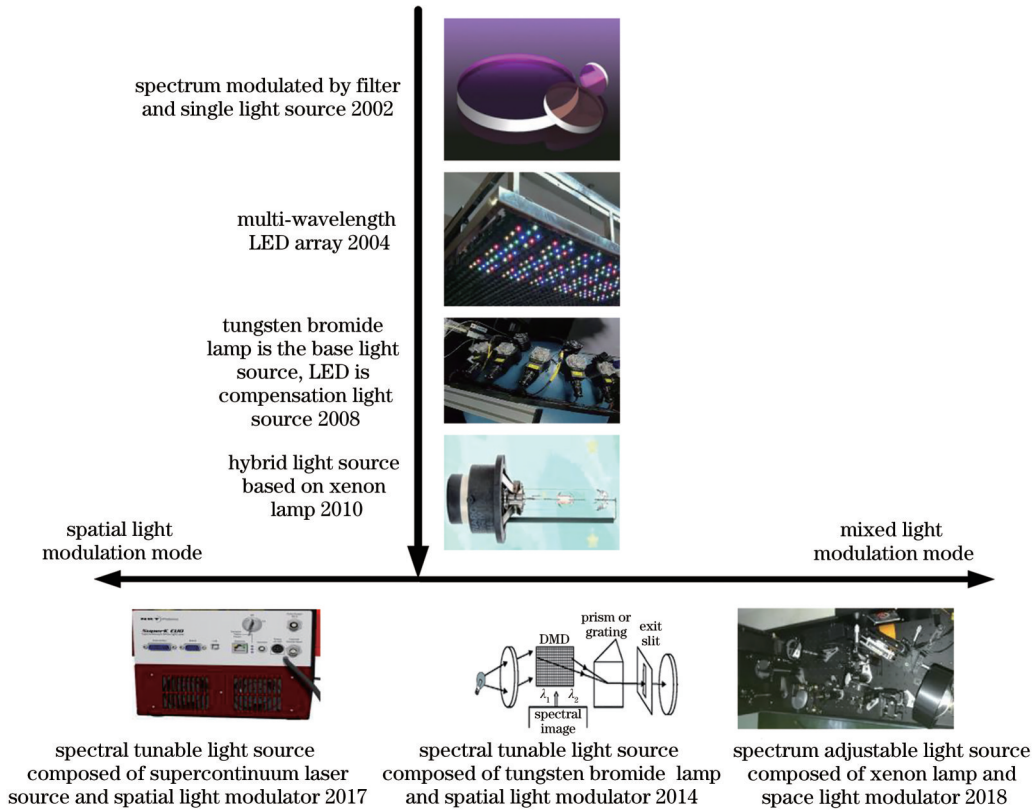


图 4 色温可调星模拟器光源演化历程

Fig. 4 Evolution of light source in color temperature adjustable star simulator

### 3.1 混合光源模式

混合光源模式即采用多种光源混合的方式发挥不同光源的优势,弥补其不足,典型的混合光源是LED、溴钨灯和氙灯间的排列组合。

2004年美国国家标准和技术研究院(NIST)和波兰比亚威斯托克大学合作开发出一种使用大量LED的光谱可调光源<sup>[17-18]</sup>。该光源可模拟CIE标准照明体D65光谱和9000 K色温谱线,且不同峰值波长的LED被镶嵌在积分球内壁,通过调节LED的驱动电流能够实现不同强度的LED输出。受限于LED的中心波长分布不均匀,在525~560 nm和

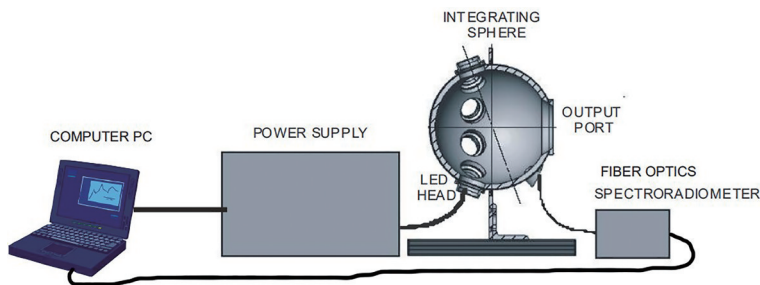
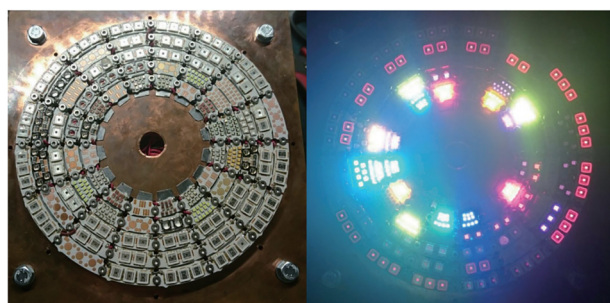
720~760 nm波段光谱出现凹陷,导致光谱匹配误差增大,其解决方案是用对应波段的荧光进行补偿。表2给出3种使用不同峰值波长LED实现色温可调的方法,并总结了每种混光方法的特点。2005年Fryc等<sup>[19]</sup>提出了基于LED光谱可调光源(STS)设计方案,如图5所示。STS系统在积分球上放置多峰值波长LED,对D65光谱和9000 K色温谱线的模拟误差优于5%。

2016年意大利帕瓦多大学的Trivellin等<sup>[20]</sup>设计了一个基于LED阵列的星模拟器以实现特定的光谱输出,如图6所示。LED阵列由25种不同中

表 2 几种实现色温可调的典型LED混光技术

Table 2 Several typical LED mixing technologies with adjustable color temperature

Dynamic color temperature technology	Principle	Characteristic
Cold and warm white LED mixed light	Adjust the mixing ratio of various LEDs to achieve color temperature matching	It has good color rendering and small color temperature adjustable range. It can only realize the mixed light at the line of two chromaticity coordinates.
RGB mixed light		It has good color temperature adjustable range and precise controllability.
White LED and Yellow LED mixed light		Narrow spectrum yellow LED will destroy the uniformity of mixed light spectrum.

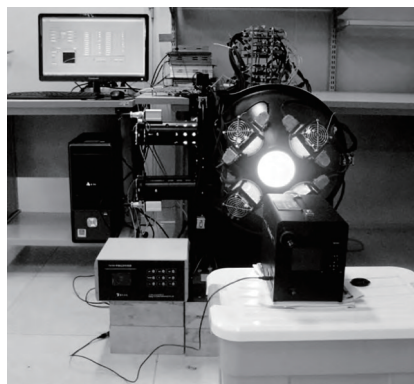
图 5 STS 结构图<sup>[19]</sup>Fig. 5 STS structure diagram<sup>[19]</sup>图 6 意大利帕瓦多大学研制的 LED 阵列<sup>[20]</sup>Fig. 6 LED array developed by University of Pavado in Italy<sup>[20]</sup>

心波长的 LED 组成,光谱范围覆盖 365~940 nm。2010 年,陈风和朱继亦等<sup>[21-22]</sup>都提出了基于 LED 的相对光谱分布可调光源的星模拟器设计方案。陈风等<sup>[21]</sup>将大量不同中心波长的 LED 内置于积分球中,设计电源控制器,精确控制 72 个通道上的 LED 电流,模拟不同色温的恒星光谱分布。以 5900 K 色温太阳光为例,当采用峰值波长间隔越小的 LED 作为光源时,光谱匹配效果越好。朱继亦<sup>[22]</sup>采用非对称高斯分布函数模型作为单个 LED 光谱分布,分别模拟了 D65、溴钨灯、5500 K 理想黑体等光源的光谱分布,平均相对误差均优于 4%。采用这种光源方案的不足之处在于电源控制系统的输出电流不稳定且受 LED 光谱的限制,可变电流驱动 LED 会引起半峰半宽的变化和峰值波长的漂移,导致光谱匹配的准确度降低。

2010 年中国科学院长春光学精密机械与物理研究所的胡宜宁<sup>[23]</sup>研究了小型动态星模拟器技术,使用白光 LED 作为星模拟器的光源。使用白光 LED 确实拓宽了光谱模拟范围,然而大部分白光 LED 光谱分布有两个峰值,双峰之间的谱线凹陷需用对应的单色 LED 弥补,否则匹配效果欠佳。此外,LED 中 PN 结温度的影响难以完全消除。

2011 年中国科学院长春光学精密机械与物理

研究所的刘洪兴等<sup>[24-25]</sup>设计了一种基于 LED 和溴钨灯的混合光源星模拟器。该星模拟器采用溴钨灯为基底光源,采用恒流驱动 LED 作为补偿光源,对 D65 和等能光谱的模拟平均相对误差优于 10%。刘洪兴等将混合光源与 LED 光源进行了对比,通过实验得出以下结论:采用溴钨灯与 LED 的混合光源可以大大减少 LED 的数量,且模拟星点的光谱曲线的平均相对误差有所提高。2014 年刘洪兴等<sup>[26]</sup>以溴钨灯做基底、LED 做补偿光源的方案为基础进行改进,模拟得到等能光谱和 6000 K 色温光谱的匹配误差分别为 6.37% 和 8.76%。2015 年刘洪兴等<sup>[27-28]</sup>又研制了一种多色温单星模拟器,如图 7 所示,其光源由 LED 模块、溴钨灯基底光源和附着升色温滤光片的溴钨灯基底光源组成。溴钨灯和“溴钨灯+升色温滤光片”的混合基底光源在可见光波段的光谱分布更连续平滑,对 0 等星 4000 K 和 3 等星 7000 K 星光的光谱匹配误差分别为 4.87% 和 7.83%。

图 7 多色温单星模拟器<sup>[26]</sup>Fig. 7 Multicolor temperature single star simulator<sup>[26]</sup>

2012 年四川大学的马强等<sup>[29-31]</sup>以 LED 和氙灯为混合光源,设计了多色温单星系统,该系统采用氙灯为光源,可实现对 9 种不同色温黑体的光谱模拟,相对光谱误差优于 10%。

2015年中国科学院西安光学精密机械研究所的李晓妮<sup>[32]</sup>提出一种以白光LED为基底,多种单色LED进行光谱补偿的星模拟器光源系统,在3900,4800,6500 K色温下光谱匹配误差优于15%。2013年浙江大学现代光学仪器国家重点实验室研究人员研制了包含1700颗LED的光谱可调光源<sup>[33]</sup>,如图8所示,通过脉冲宽度调制(PWM)精确控制流过每个LED的电流大小,实现了色温为5000 K的目标模拟。

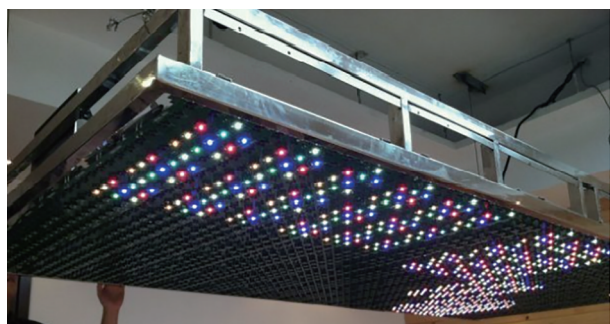


图8 浙江大学研制的LED阵列<sup>[33]</sup>

美国蓝菲光学公司研发了基于氙灯和溴钨灯的混合光源系统,光谱覆盖紫外到近红外,可以模拟3000~6000 K范围内任意色温的光谱曲线<sup>[34]</sup>。张晓娟等<sup>[35]</sup>在美国蓝菲公司的基础上提出了一种

基于氙灯和溴钨灯的混合光源的星模拟器光谱模拟方案,模拟出与特定色温3900,4800,6500 K相近的光谱曲线,光谱匹配误差优于10%。这种“氙灯+溴钨灯”的星模拟器光源方案选用的都是热光源,由于温度变化会对光谱形状产生影响,故必须考虑到散热和控温。

### 3.2 空间光调制模式

采用空间光调制模式的光源核心器件除了光源外还包括滤光片、光栅和数字微镜器件。国外科研人员常把基于数字微镜器件的空间光调制模式光源称为光谱可编程引擎或光谱可调光源。

英国国家物理实验室(NPL)的Levick等<sup>[36-37]</sup>基于超连续谱激光光源及光谱可调滤光片设计了一台可调谐绝对光谱辐照度标准光源(STAIRS)。STAIRS采用激光谱线可调谐滤光片(LLTF)对光谱进行调制,LLTF可对某一特定入射角入射的准直复色光进行特定波长的选取,其中不需要的波段将会透射LLTF,可有效减少系统输出的光谱杂散光,但是价格过于昂贵。NPL设计的以溴钨灯为发光介质的光谱可调光源系统<sup>[38]</sup>,如图9所示。该光源系统将溴钨灯出射光经光栅色散后,用特制的滤光片对色散后的光进行调制,然后在积分球中进行匀光。该光源系统的蓝绿光波段光谱能量偏低。

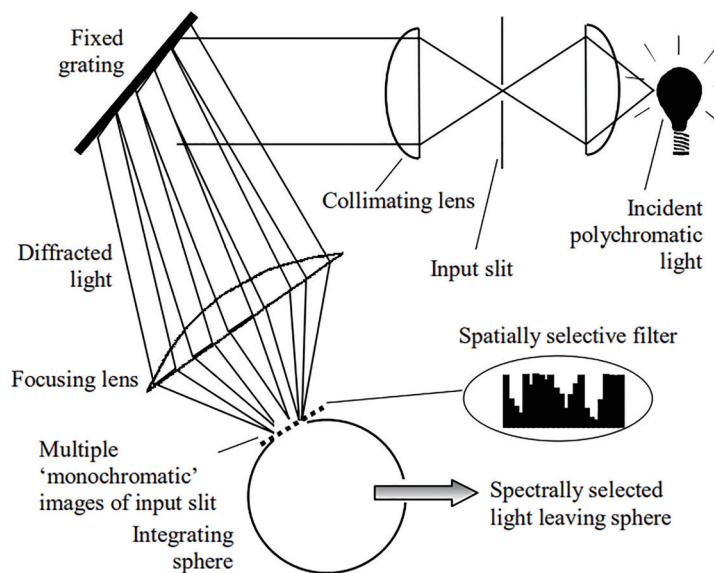


图9 基于溴钨灯基底光源的光谱可调光源<sup>[38]</sup>

Fig. 9 Spectrum adjustable light source based on tungsten bromide lamp<sup>[38]</sup>

NIST的Brown等<sup>[39]</sup>提出将光谱可调谐光源用于辐射定标领域,并基于数字微镜器件(DMD)开发了用于辐射度计量的光谱可调谐光源系统,该系统

被命名为先进辐射光源(ARS)。ARS系统覆盖400~700 nm可见光波段和1000~2500 nm短波红外波段,如图10和图11所示。可见光波段的ARS

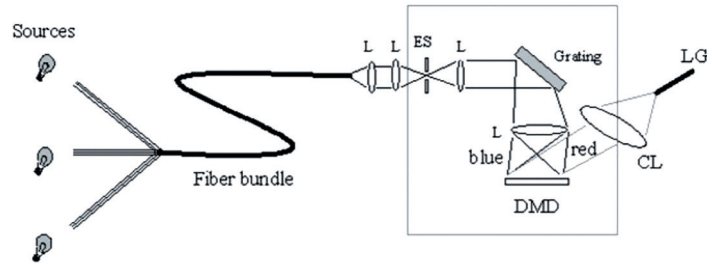


图 10 可见光 ARS 结构<sup>[39]</sup>

Fig. 10 Visible ARS structure<sup>[39]</sup>

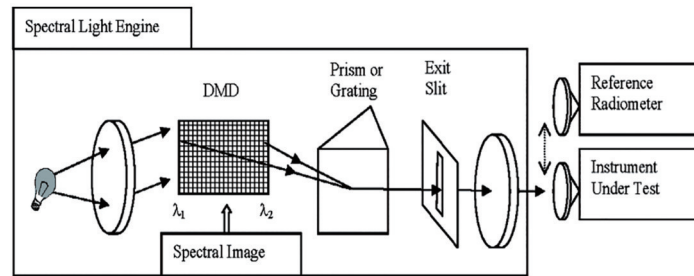


图 11 短波红外 ARS 结构<sup>[39]</sup>

Fig. 11 Short wave infrared ARS structure<sup>[39]</sup>

系统采用多头分叉光纤耦合输入光,将不同光谱分布的基础光源调制为不同光谱分布的目标光。调制后的目标光经准直透镜准直和柱面镜聚焦后,通过狭缝并经光栅分光成像于 DMD 表面,经 DMD 反射后导入积分球。可见光波段 ARS 系统的光谱模拟能力如图 12 所示。短波红外 ARS 系统则采用棱

镜作为分光元件,移除可见光波段 ARS 的入射狭缝,使 DMD 表面被完全照明。DMD 反射的竖条状光斑可以看作是虚拟的入射狭缝,DMD 的水平方向对应光的波长,竖直方向对应某一波长光的强度,由此实现了光谱的调制。

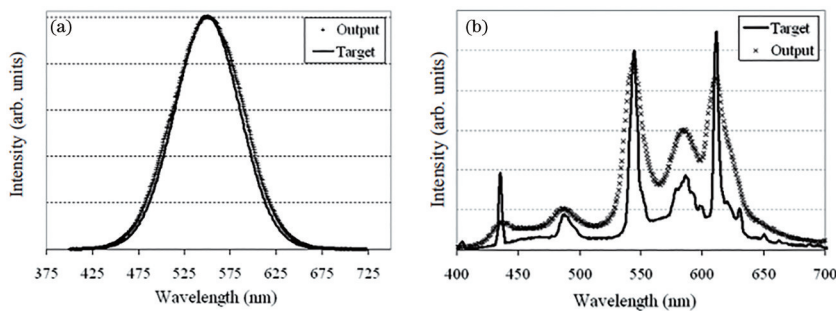


图 12 ARS 系统对两种目标光谱的模拟图<sup>[39]</sup>。(a)光谱高斯分布目标;(b)荧光灯光谱分布目标

Fig. 12 Simulation of two kinds of target spectrum by ARS system<sup>[39]</sup>. (a) Target detection based on spectral Gaussian distribution; (b) fluorescent lamp distribution

2010 年, NIST 的 Brown 等<sup>[40]</sup>搭建了光谱可调制辐亮度标准光源系统,该系统将氙灯、溴钨灯和 LED 的组合光源作为外部输入,经光引擎调制后输入到积分球内,如图 13 所示。

MacKinnon 等<sup>[41-43]</sup>为得到能产生不同光谱轮廓的光源,研制了光谱可编程引擎(SPLE),该 SPLE 系统可应用于生物化学与生物医学领域,如图 14 所示。

SPLE 系统的核心器件是由德州仪器公司生产的 DMD。以氙灯作为基础光源,白光 LED 作为补偿光源,采用球面反射镜作为聚光系统,出射光入射可调狭缝,经准直镜准直、分光、DMD 调制等操作,将所需波长和能量的光会聚于匀光器件,光谱匹配情况如图 15 所示。DMD 的微镜翻转状况由计算机控制,可选择性地反射所需要波长与能量的光。分

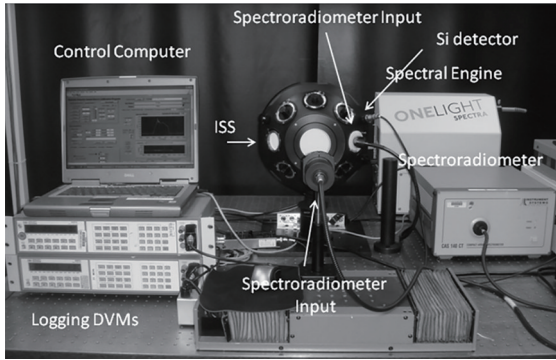


图 13 光谱可调谐辐亮度标准光源系统样机<sup>[40]</sup>

Fig. 13 System prototype of spectral tunable radiance standard light source<sup>[40]</sup>

光系统有两种核心器件选择方案:棱镜或光栅。分

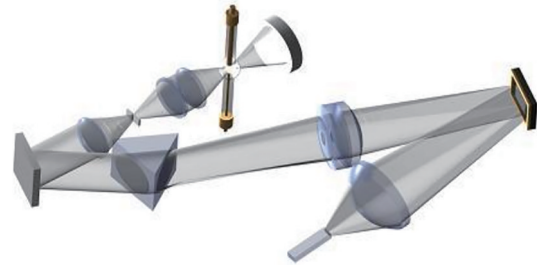


图 14 基于棱镜的 SPLE 系统图<sup>[41]</sup>

Fig. 14 SPLE system diagram based on prism<sup>[41]</sup>

光器件选用棱镜时,虽然系统输出光的能量较强,但 DMD 表面光谱呈非线性分布;选用光栅时, DMD 表面光谱呈线性分布,但受制于光栅衍射效率,输出光能量较弱。

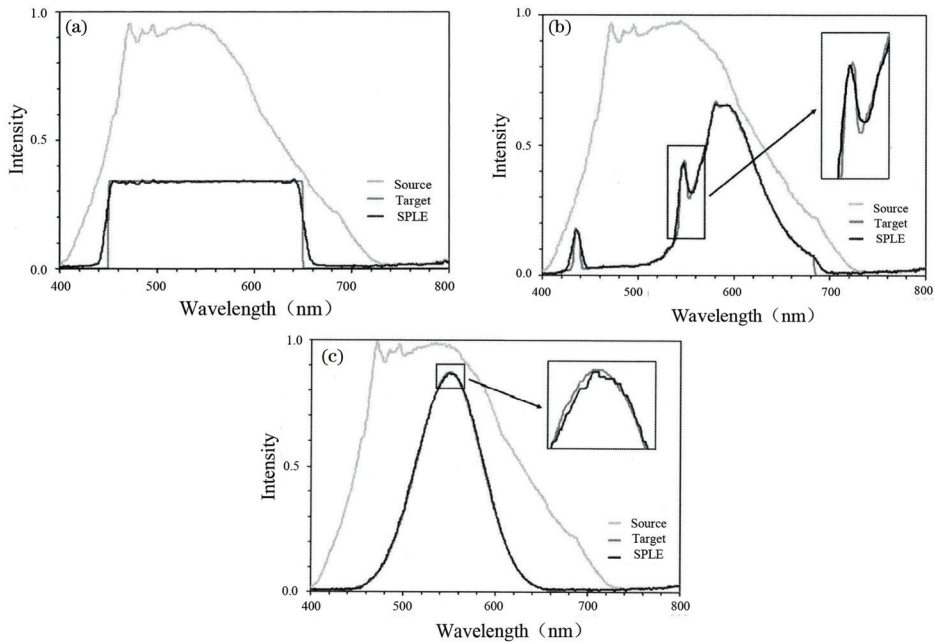


图 15 SPLE 系统光谱匹配图<sup>[43]</sup>。(a)模拟高斯分布光谱;(b)氙灯模拟光谱;(c)光谱平坦化

Fig.15 Spectra matching diagrams of SPLE system<sup>[43]</sup>。(a) Simulated Gaussian distribution spectrum; (b) spectrum of simulated xenon lamp; (c) spectral flattening

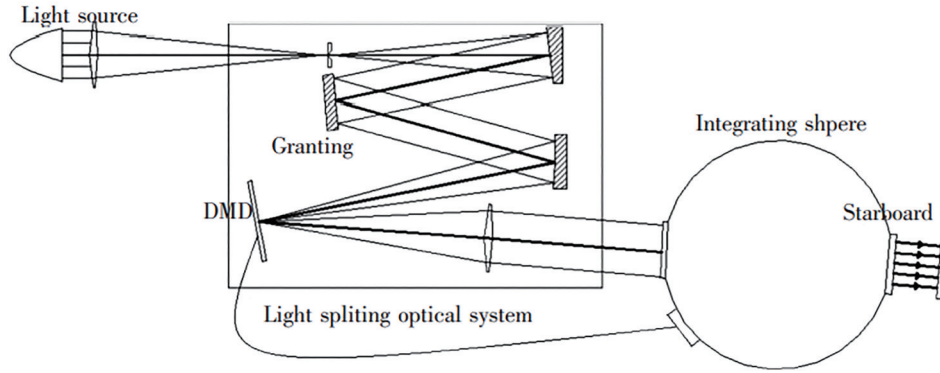
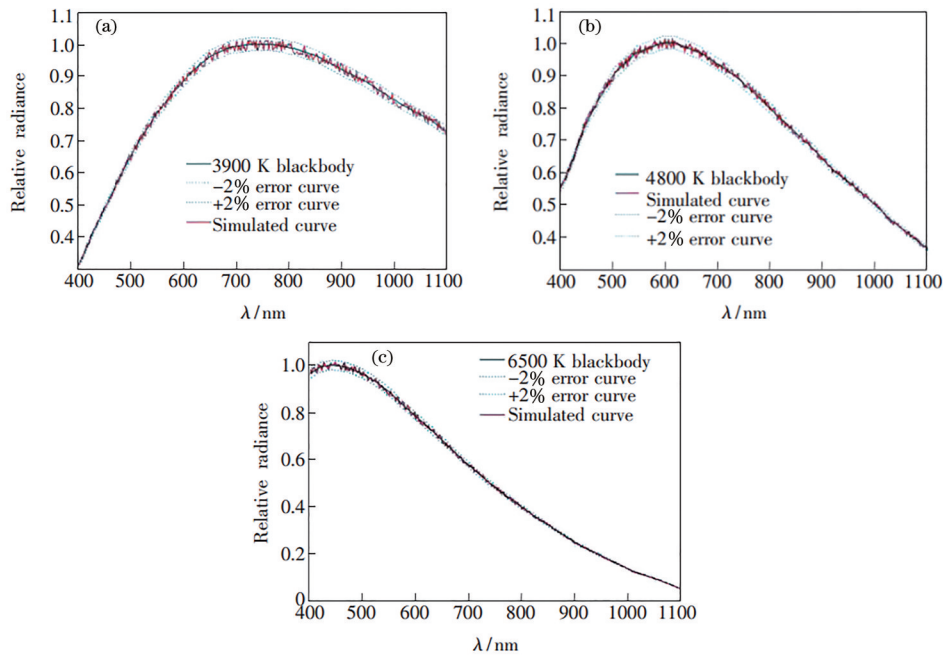
2014年中国科学院长春光学精密机械与物理研究所的李志刚<sup>[44]</sup>以 300 W 高稳定性氙灯、前置聚光镜、凹面光栅平场单色仪、DMD、后置聚光镜和积分球构建了光谱可调谐光源实验装置。所研制的光谱可调谐光源实验装置可根据需要,通过编程控制输出不同光谱分布的光辐射。

2019年长春理工大学的王文鹏<sup>[45]</sup>提出了基于 DMD 的星模拟器光谱模拟系统,采用氙灯作为光源,基于反射光栅的 Czerny-Turner 型分光系统和 DMD 作为光谱调制模块。实验结果表明,该系统对 3000, 5000, 9000 K 的色温曲线拟合误差仅为 4%。

2017年长春理工大学的徐达等<sup>[46-48]</sup>提出一种光谱连续可调的星模拟器设计方案,如图 16 所示。该方案使用宽波段超连续激光光源,激光经分光系统和 DMD 调制后送入积分球并导出,实现了对 3900, 4800, 6500 K 色温的拟合,且当分光系统光谱分辨率为 10 nm 时,光谱曲线的模拟精度优于 2%,如图 17 所示。使用积分球是为了获得高均匀度、无偏振度的准朗伯照明光源。

2018年中国科学院长春光学精密机械与物理研究所的王晓旭<sup>[49]</sup>设计了一种自校准型光谱辐亮度标准光源,旨在解决基于数字微镜阵列元件的可



图 16 基于 DMD 的光谱可调星模拟器光源系统<sup>[45]</sup>Fig. 16 Light source system of spectrum adjustable star simulator based on DMD<sup>[45]</sup>图 17 3900, 4800, 6500 K 的光谱分布模拟结果<sup>[45]</sup>。(a) 3900 K 黑体光谱模拟; (b) 4800 K 黑体光谱模拟; (c) 6500 K 黑体光谱模拟Fig. 17 Simulation results of spectral distribution at 3900, 4800, 6500 K<sup>[45]</sup>. (a) Simulation of blackbody spectra at 3900 K; (b) simulation of blackbody spectra at 4800 K; (c) simulation of blackbody spectra at 6500 K

调谐光谱技术。该光源系统有两种光谱调制模式和两种光源,采用了“滨松超稳定氙灯+单光栅结构光谱调制器”、“NKT 超连续谱激光光源+单光栅结构光谱调制器”和“氙灯+双光栅结构光谱调制器”三种光谱调制方案。其中光谱调制器的作用是改变光源输入的光谱分布,输出具有特定光谱分布的光。

2020 年徐达等<sup>[50-51]</sup>提出了基于 Offner 凸面光栅的辐射定标光源,实现了对宽光谱光束的细分,建立了 DMD 与其阵列面空间辐射光谱分布的映射关系。该系统实现了对三种典型色温 3000, 5000, 7000 K 的光谱匹配,匹配误差分别优于 5.2%,

3.1%, 4.2%。

## 4 结 论

表 3 对比了典型色温可调光源系统性能。综上所述,工作于光谱调制模式下的光源在光谱匹配方面要优于混合光源模式,其中基于超连续谱激光和数字微镜器件的色温可调星模拟器能达到最小的光谱匹配误差。该方案的光谱匹配误差由分光系统的分辨率、数字微镜器件分辨率和光谱匹配算法决定。如表 4 所示,常用的分光系统包括基于 Offner 凸面光栅分光系统、基于平面反射光栅的 C-T 系统和基于平场凹面全息光栅的分光系统<sup>[52]</sup>。

表 3 典型色温可调光源对比

Table 3 Comparison of typical light sources with adjustable color temperature

Color temperature adjustable system	Type	Advantage	Disadvantage	Spectral matching error
LED array developed by University of Pavado	Mixed light source type	Tunable output spectrum; high spectral stability	The spectral matching accuracy is slightly lower	16.67%
LED array developed by Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences	Mixed light source type	Small peak wavelength interval of LED; asymmetric Gaussian distribution function model	Instability of power control system	4%
LED array developed by Xi'an Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences	Mixed light source type	White LED & multi-wavelength monochrome LED; double integrating sphere	Poor at feedback output in real time	15%
ARS system by NIST	Spectral modulation type	Application of digital micro-mirror devices	The spectral matching accuracy is slightly lower	13%
Star Simulator by Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences	Spectral modulation type	Hybrid substrate light source; good smoothness of the simulated spectrum	Limited spectral matching accuracy	4.87%–7.83%
Spectrum simulation system of star simulator based on DMD	Spectral modulation type	Application of digital micro-mirror devices and xenon lamp	Poor spectral range; lower utilization of energy	4%
Star simulator with continuously adjustable spectrum	Spectral modulation type	Application of digital micro-mirror devices and supercontinuum laser	Lower utilization of energy	2%

表 4 三种色温可调光源分光系统对比

Table 4 Comparison of three kinds of light splitting systems with adjustable color temperature

Adjustable color temperature system	Grating	Spectroscopic system	Spectral matching error
Spectrally tunable light source based on DMD by Li	Concave holographic grating		Unknown
Star simulator with continuously adjustable spectrum by Xu	Plane reflection grating		2%
Offner convex grating radiate-on calibration light source by Xu	Offner convex grating		3.2%–5.2%

## 5 应用与展望

### 5.1 色温可调光源的应用

目前,色温可调星模拟器光源已经实现了对 2900~9000 K 色温的恒星目标模拟,光谱匹配误差可以控制在 10% 以内,但仍有技术问题亟待解决。首先,目前色温可调星模拟器光源还不能模拟全部的恒星光谱类型,对高色温恒星目标模拟的文献寥寥无几。其次,现有的星模拟器光源只能对若干特定离散色温值的光谱进行准确模拟,还不能实现光谱随目标色温变化而实时变化,即实时性较差。另外,星模拟器需要模拟星空中多星的场景,且要同时调制多星的不同光谱。目前实验室中采用的方案多为一颗模拟星配一套光谱调制系统,很显然这种方案若被用来模拟多星场景是不合适的,需要从光学系统的角度考虑如何实现对多星场景星图的色温模拟。最后,在模拟动态星图时还要考虑恒星目标位置变化引起的色温变化。中国科学院长春光学精密机械与物理研究所的伍雁雄提出不同色温的恒星在像面上质心的位置不完全一致会引起测量误差的观点<sup>[52]</sup>,并得出以下结论:1) 同一幅星图中星敏感器识别出的恒星色温不同,测量的不确定度增大;2) 当恒星在视场内移动时测量误差增大;3) 视场内有新的色温恒星进入模拟星图中时测量精度会发生变化。

色温可调光源的另一个重要应用领域是标准光谱辐射定标装置。随着空间遥感、航空航天、生物医学、定量光谱学和等粒子物理等研究的发展,对光谱辐射定标精度提出了越来越高的要求。辐射定标光电探测技术正朝着高/超光谱探测方向发展,探测器应具有更多分辨率更高的光谱通道,可对目标光谱进行精细特征探测。国际上,美国 NIST、英国 NPL、波兰比亚威斯托克大学、德国物理技术研究院、日本国家计量院、韩国标准科学研究院都在辐射定标光源方面投入大量人力物力进行研究。国内在该领域做出突出贡献的单位包括中国科学院长春光学精密机械与物理研究所、中国科学院安徽光学精密机械研究所和中国科学技术大学等。目前国内对光谱辐射定标光源的研究集中在基于“超连续谱激光-积分球”的光谱定标方式,虽然精度高,但操作维护极其复杂,国内没有制造超连续谱激光的企业,这些因素制约着其应用。

### 5.2 色温可调星模拟技术未来展望

随着光学调制器件的发展<sup>[53-54]</sup>和实验室光源的不断丰富,色温可调星模拟器的光源发展趋势归纳起来有以下特点:

#### 1) 光源选择更加多样化

使用不同光源之间的组合可弥补基底光源自身的不足,提高光谱匹配精度。超连续激光技术的发展标志着将会有越来越多的光谱可调光源系统采用白光激光作为基底光源,经数字调制后实现光谱可调。但是传统的 LED、溴钨灯、氙灯光源仍在某些光谱的模拟过程中有其独特的优势,因此光源需根据所要模拟的色温进行有针对性地选取。

#### 2) 光谱调制器件的应用

传统的光谱调制器件即定制滤光片,而空间调制器件 DMD 的应用使得光谱调制可编程化,极大地提高了光谱调制的效率。通过研究色温可调星模拟器技术的发展历程不难看出,当更高效的光谱调制器件出现时,色温可调光源的结构必将得到优化。

#### 3) 动态色温可调

随着新光源的出现和光谱调制技术的发展,星模拟器光源实现了从仅能模拟单一色温星点到能模拟多个色温星点,并且可模拟色温范围在不断扩展。目前星模拟技术可实现 2900~20000 K 色温范围内若干离散色温值的恒星光谱模拟,如何实现全恒星光谱类型的动态模拟是未来星模拟技术的重要发展方向。动态色温可调制技术的不断成熟必将在动态星模拟器的研制过程中发挥巨大作用。

## 参 考 文 献

- [1] Dai Y. Design and research of optical system for large field of view dynamic star simulator[D]. Beijing: Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2020.  
代雨. 大视场高动态星模拟器光学系统的设计与研究[D]. 北京:中国科学院光电技术研究所, 2020.
- [2] Li X. Research on star map display and testing method of high precision and high dynamics star simulator[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2020.  
李星. 高精度高动态星模拟器星图显示及测试方法研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2020.
- [3] Zhang X J, Zhang J, Yang J J, et al. Research on multiple star magnitude simulation of star simulator [J]. Laser & Infrared, 2018, 48(9): 1150-1155.

- 张晓娟, 张健, 杨俊杰, 等. 星模拟器多星等模拟方法研究[J]. 激光与红外, 2018, 48(9): 1150-1155.
- [4] Xu D, Zhang G Y, Sun G F. Design of star simulator with spatial background light[J]. Chinese Journal of Space Science, 2018, 38(4): 575-582.  
徐达, 张国玉, 孙高飞. 空间背景光星模拟器系统设计[J]. 空间科学学报, 2018, 38(4): 575-582.
- [5] Liu S, Zhang G Y, Sun G F, et al. Design of high-precision static star simulator with uniform sky background[J]. Acta Photonica Sinica, 2016, 45(12): 1222002.  
刘石, 张国玉, 孙高飞, 等. 具有均匀天空背景的高精度静态星模拟器设计[J]. 光子学报, 2016, 45(12): 1222002.
- [6] Li G X, Wang L Y, Zheng R, et al. Study on algorithm of high dynamic ground star map simulation detection system[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2019, 42(3): 24-27.  
李光茜, 王凌云, 郑茹, 等. 高动态地面星图模拟检测系统算法研究[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2019, 42(3): 24-27.
- [7] Wan X, Liu P X, Zhang T T. Research progress of supercontinuum laser spectroscopy in biomedical field [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2017, 37(2): 338-345.  
万雄, 刘鹏希, 章婷婷. 生物医学领域中超连续激光光谱技术的研究进展[J]. 光谱学与光谱分析, 2017, 37(2): 338-345.
- [8] Yang W Q, Song R, Han K, et al. Research progress of supercontinuum laser source[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2020, 42(1): 1-9.  
杨未强, 宋锐, 韩凯, 等. 超连续谱激光光源研究进展[J]. 国防科技大学学报, 2020, 42(1): 1-9.
- [9] Hyttinen J, Fält P, Jäsberg H, et al. Optical implementation of partially negative filters using a spectrally tunable light source, and its application to contrast enhanced oral and dental imaging[J]. Optics Express, 2019, 27(23): 34022-34037.
- [10] Xing K, Li M Y, Cao J. Development of GaN based blue green LEDs and solid state light sources[J]. Electronic Technology & Software Engineering, 2017(15): 104.  
邢琨, 李梦影, 曹洁. 氮化镓基蓝绿光 LED 和固态光源进展[J]. 电子技术与软件工程, 2017(15): 104.
- [11] Kaminski C F, Watt R S, Elder A D, et al. Supercontinuum radiation for applications in chemical sensing and microscopy[J]. Applied Physics B, 2008, 92(3): 367-378.
- [12] Xie C Y. Spectral radiometric calibration system and application using supercontinuum laser[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2020.  
谢臣瑜. 采用超连续谱激光光源的光谱辐射定标系统及应用[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2020.
- [13] Hu K Y. The preliminary study of the optical trap with supercontinuum[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2016.  
胡孔云. 超连续谱激光光阱的初步研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2016.
- [14] Jin A J. Study on fiber-amplifier-based supercontinuum source[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2015.  
靳爱军. 基于光纤放大器的超连续谱光源研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2015.
- [15] Zuo X X. Theoretical and experimental study of supercontinuum laser source in photonic crystal fiber [D]. Shijiazhuang: Hebei Normal University, 2007.  
左晓雪. 光子晶体光纤中超连续谱激光光源的理论和实验研究[D]. 石家庄: 河北师范大学, 2007.
- [16] Li G X. Study on key techniques of star map simulation in dynamic star simulator[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2019.  
李光茜. 动态星模拟器星图模拟关键技术研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2019.
- [17] Fryc I, Brown S W, Eppeldauer G P, et al. LED-based spectrally tunable source for radiometric, photometric, and colorimetric applications[J]. Optical Engineering, 2005, 44(11): 111309.
- [18] Brown S W, Santana C, Eppeldauer G P. Development of a tunable LED-based colorimetric source[J]. Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology, 2002, 107(4): 363-371.
- [19] Fryc I, Brown S W, Ohno Y. Spectral matching with an LED-based spectrally tunable light source[J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5941: 594111.
- [20] Trivellin N, Barbisan D, Ferretti M, et al. Adaptive multi-wavelength LED star simulator for space life studies[J]. Proceedings of SPIE, 2016, 9768: 976815.
- [21] Chen F, Yuan Y L, Zheng X B, et al. Design of spectral tunable LED light source[J]. Optics and Precision Engineering, 2008, 16(11): 2060-2064.  
陈风, 袁银麟, 郑小兵, 等. LED 的光谱分布可调光源的设计[J]. 光学精密工程, 2008, 16(11): 2060-2064.
- [22] Zhu J Y. The research of LED-based spectrally tunable source[D]. Changchun: Changchun Institute

- of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, 2010.
- 朱继亦. 基于 LED 的光谱可调光源的研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2010.
- [23] Hu Y N. Study on mini-dynamic star simulator technologies[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, 2010.
- 胡宜宁. 小型动态星模拟器技术研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2010.
- [24] Liu H X, Ren J W, Li B Y, et al. Spectrum-tunable distribution and spectral matching for integrating sphere light source based on bromine tungsten lamps and LEDs[J]. Chinese Journal of Luminescence, 2011, 32(10): 1074-1080.
- 刘洪兴, 任建伟, 李葆勇, 等. 基于溴钨灯和 LED 积分球光源的可调谐光谱分布及光谱匹配[J]. 发光学报, 2011, 32(10): 1074-1080.
- [25] Liu H X, Ren J W, Wan Z, et al. Measurement of relative spectral responsivity of photodetector by LED-based spectrum-tunable source[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2013, 33(1): 250-254.
- 刘洪兴, 任建伟, 万志, 等. 基于 LED 光谱可调谐光源的光电探测器相对光谱响应测量研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2013, 33(1): 250-254.
- [26] Liu H X, Liu Z X, Li B Y, et al. Spectrum-tunable light source based on multi-sources[J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(9): 2345-2351.
- 刘洪兴, 刘则洵, 李葆勇, 等. 基于多光源的光谱分布可调谐光源系统[J]. 光学精密工程, 2014, 22(9): 2345-2351.
- [27] Liu H X, Ren J W, Liu Z X, et al. LED-based single star simulator with multi-color-temperature and multi-star-magnitude output[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(2): 0212003.
- 刘洪兴, 任建伟, 刘则洵, 等. 基于 LED 的多色温多星等单星模拟器[J]. 光学学报, 2015, 35(2): 0212003.
- [28] Xiang J R, Ren J W, Li B Y, et al. Research on ground scenery spectral radiation source with tunable spectra[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2015, 35(2): 298-303.
- 项金蓉, 任建伟, 李葆勇, 等. 可调谐地物光谱辐射源研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2015, 35(2): 298-303.
- [29] Ma Q, Zhang T. Single star simulator with adjustable magnitude and spectrum for calibration[J]. Journal of Applied Optics, 2014, 35(1): 38-42.
- 马强, 张涛. 星等及光谱可调的标定用单星模拟器系统设计[J]. 应用光学, 2014, 35(1): 38-42.
- [30] Zhang J, Zhang T, Xiao P. Opto-mechanical system of single-star simulator with multi-color temperature and multi-magnitude output[J]. Journal of Applied Optics, 2012, 33(5): 949-953.
- 张杰, 张涛, 肖鹏. 多色温多星等输出的单星模拟器光机系统设计[J]. 应用光学, 2012, 33(5): 949-953.
- [31] Zhao C R, Zhang T, Lin X T. Design of single star simulator system with multi-color-temperature and multi-magnitude output[J]. China Measurement & Test, 2012, 38(3): 61-64.
- 赵成仁, 张涛, 林兴泰. 多色温多星等输出的单星模拟器系统设计[J]. 中国测试, 2012, 38(3): 61-64.
- [32] Li X N. The research for the star simulation with adjustable spectrum[D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics & Precision Mechanics, Chinese Academy of Science, 2015.
- 李晓妮. 光谱可调星模拟器技术研究[D]. 西安: 中国科学院西安光学精密机械研究所, 2015.
- [33] Jia N, Zheng Z R, Yang Y, et al. Spectrum measurement for LED-based spectrum-tunable source [J]. Proceedings of SPIE, 2013, 8916: 89162Z.
- [34] Wang W Z, Liu B B. Lab sphere optics in China's big market: interview with Xiao Dong, Asia Pacific marketing director of lab sphere optics Co., Ltd[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2009, 46(1): 76-78.
- 王伟之, 刘兵斌. 中国大市场下的蓝菲光学: 访蓝菲光学有限公司亚太区市场总监肖冬[J]. 激光与光电子学进展, 2009, 46(1): 76-78.
- [35] Zhang X J, Zhang G Y, Sun G F, et al. Spectral study for star simulator on hybrid light source[J]. Acta Photonica Sinica, 2014, 43(2): 0222001.
- 张晓娟, 张国玉, 孙高飞, 等. 基于混合光源的星模拟器光谱研究[J]. 光子学报, 2014, 43(2): 0222001.
- [36] Levick A P, Dury M, Ireland J, et al. The use of the Allan deviation for noise and drift measurements in radiometry applications [C]// Proceedings of the 11st International Conference on New Developments and Applicants in Optical Radiometry-NEWRAD, 2011: 19-23.
- [37] Levick A P, Greenwell C L, Ireland J, et al. Spectral radiance source based on supercontinuum laser and wavelength tunable bandpass filter: the spectrally tunable absolute irradiance and radiance source[J]. Applied Optics, 2014, 53(16): 3508-3519.
- [38] Dowling K J, Kolsky B. The design of a spectrally tunable light source[J]. Proceedings of SPIE, 2009, 7422: 742206.

- [39] Brown S W, Rice J P, Neira J E, et al. Spectrally tunable sources for advanced radiometric applications [J]. Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology, 2006, 111(5): 401-410.
- [40] Brown S W, Saunders R D, Li Z G, et al. An absolute detector-based spectral radiance source[J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7807: 78070A.
- [41] MacKinnon N, Stange U, Lane P M, et al. Multispectral endoscopy and microscopy imaging system using a spectrally programmable light engine [J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5694: 120-125.
- [42] MacKinnon N B, Khojasteh M, Lane P M, et al. Hyperspectral imaging and spectral unmixing of stained tissue sections using a spectrally programmable light engine[J]. Proceedings of SPIE, 2007, 6441: 64410A.
- [43] MacKinnon N B, Stange U, Lane P, et al. Spectrally programmable light engine for *in vitro* or *in vivo* molecular imaging and spectroscopy[J]. Applied Optics, 2005, 44(11): 2033-2040.
- [44] Li Z G. Spectrally tunable light source based on digital micromirror device[J]. Chinese Journal of Luminescence, 2014, 35(9): 1120-1123.  
李志刚. 基于数字微镜器件的光谱可调谐光源[J]. 发光学报, 2014, 35(9): 1120-1123.
- [45] Wang W P. Study on technique of star spectral simulator based on digital micromirror device[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2019.  
王文鹏. 基于 DMD 的星模拟器光谱模拟技术研究 [D]. 长春: 长春理工大学, 2019.
- [46] Xu D, Zhang G Y, Sun G F, et al. Spectrally tunable star simulator light source based on digital micro-mirror device[J]. Chinese Journal of Luminescence, 2017, 38(10): 1384-1390.  
徐达, 张国玉, 孙高飞, 等. 基于数字微镜的光谱可调星模拟器光源系统[J]. 发光学报, 2017, 38(10): 1384-1390.
- [47] Xu D, Zhang G Y, Sun G F. Design of spectral continuous adjustable star sensor's ground calibration system[J]. Chinese Journal of Space Science, 2017, 37(5): 608-615.  
徐达, 张国玉, 孙高飞. 光谱连续可调星敏器地面标定系统设计[J]. 空间科学学报, 2017, 37(5): 608-615.
- [48] Xu D, Zhang G Y, Sun G F, et al. Optical system design of star simulator light source with spectrum adjustable based on DMD[J]. Acta Photonica Sinica, 2017, 46(7): 0722002.  
徐达, 张国玉, 孙高飞, 等. 基于 DMD 光谱可调的星模拟器光源光学系统设计[J]. 光子学报, 2017, 46(7): 0722002.
- [49] Wang X X. Study on new types of spectral radiance calibration source[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2018.  
王晓旭. 新型光谱辐亮度定标光源研究[D]. 北京: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2018.
- [50] Xu D, Yue S X, Zhang G Y, et al. Design of an Offner convex grating radiation calibration light source with a wide dynamic range[J]. Chinese Optics, 2020, 13(5): 1085-1093.  
徐达, 岳世新, 张国玉, 等. Offner 型凸面光栅宽动态范围辐射定标光源设计[J]. 中国光学, 2020, 13(5): 1085-1093.
- [51] Xu D, Zhang G Y, Sun G F. Design of advanced Offner-type convex grating spectral radiation calibration optical system[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(8): 0822002.  
徐达, 张国玉, 孙高飞. 改进 Offner 型凸面光栅光谱辐射定标光学系统设计[J]. 光学学报, 2020, 40(8): 0822002.
- [52] Wu Y X. Study on several key technologies for high-accuracy star sensor[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2015.  
伍雁雄. 高精度星敏器若干关键技术研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2015.
- [53] Liu F, Zhang F, Bian H, et al. Development and preparation of refractive infrared microlens array device[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(7): 071607.  
刘丰, 张帆, 边浩, 等. 折射型红外微透镜阵列器件的发展及制备[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(7): 071607.
- [54] Liu S Y, Zhang J Y. Principles and applications of ultrafast laser processing based on spatial light modulators[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(11): 111431.  
刘思垣, 张静宇. 基于空间光调制器的超快激光加工原理及应用[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(11): 111431.