

文章编号: 0253-2239(2006)12-1792-5

星-地下行传输孔径接收闪烁频谱的理论和实验研究

潘 锋 马 晶 谭立英 于思源

(哈尔滨工业大学可调谐气体激光器国家重点实验室, 哈尔滨 150001)

摘要: 基于孔径接收的对数振幅相关函数, 结合星-地激光下行链路的实际情况, 推导了星-地下行孔径接收的闪烁频谱表达式。分析了天线孔径和天顶角对闪烁频谱的影响。通过恒星观测实验, 对下行孔径接收的闪烁频谱进行了实际测量。实验结果验证了理论计算。研究表明, 下行孔径接收的闪烁频谱分为低频段和高频段两部分。低频谱为常量, 高频谱呈指数关系变化, 指数下降因子为 $(-11/3)$ 。随着接收孔径尺度增加或天顶角减小, 频谱幅值逐渐减小, 但闪烁频谱的形状保持不变。

关键词: 光通信; 星-地激光通信; 闪烁频谱; 孔径接收; 下行链路

中图分类号: TN929.1 文献标识码: A

Theoretical and Experimental Study on Power Spectrum of Atmospheric Scintillation with Large-Aperture Receiver for Satellite-to-Ground Downlink

Pan Feng Ma Jing Tan Liying Yu Siyuan

(State Key Laboratory of Tunable Laser Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

Abstract: Based on the temporal covariance of logarithmic amplitude and the practical conditions, the analytical expression is obtained for aperture receiving power spectrum of atmospheric scintillation of satellite-to-ground downlink. The effect of the receiving aperture and zenith angle on the power spectrum of atmospheric scintillation is analyzed. The experiment of detecting stellar intensity is accomplished with a large antenna. The real power spectrum of atmospheric scintillation is obtained. The results of experiment accord well with these of theoretical analysis. The results show that the power spectrum of atmospheric scintillation includes low-frequency and high-frequency spectrum. The amplitude of low-frequency spectrum is constant. The high-frequency spectrum obeys the power law and the value of power-law is $-11/3$. The amplitude of power spectrum gradually reduces with the aperture scale adding or the zenith decreasing, and the shape of power spectrum is unvariable.

Key words: optical communication; satellite-to-ground laser communication; power spectrum of atmospheric scintillation; aperture receiving; downlink

1 引 言

卫星激光通信具有大通信容量、较小的终端体积、较轻的终端重量和抗干扰性高等优点, 因此成为卫星通信技术的一个重要发展方向。星-地激光通信是卫星激光通信的关键环节之一, 只有实现星-地激光通信才能真正实现高数据率的卫星激光通信。在星-地激光链路中, 光信号通过大气信道传输, 大气湍流效应严重影响了通信质量和链路可靠性。因

此, 激光在大气中的传输成为星-地激光通信领域的一个重要研究课题。大气闪烁频谱是倍受人们关注的重要参量之一, 它反映了接收光强振幅起伏的频率范围和起伏功率的分布特性。Tatarski、Clifford、Andrews 等人对此进行了深入研究, 得到了点接收下平面波、球面波和束状波的闪烁频谱表达式^[1~4]。饶瑞中等人运用数值方法, 分析了孔径接收的闪烁频谱特征^[5], 并进行水平大气传输实验, 对孔径接收

作者简介: 潘 锋(1979~), 男, 广西人, 哈尔滨工业大学博士研究生, 主要从事大气对星-地激光通信链路影响的研究。
E-mail: akai@hit.edu.cn

导师简介: 马 晶(1956~), 男, 黑龙江人, 哈尔滨工业大学教授, 博士生导师, 主要从事卫星光通信、光信息处理的研究。
E-mail: majing@hit.edu.cn

收稿日期: 2006-02-17; 收到修改稿日期: 2006-05-24

下的闪烁频谱进行了实验研究^[6,7]。日本、欧洲等国已成功实现了星-地激光链路,对下行孔径接收的闪烁频谱进行了实际测量^[8,9]。但是,目前仍缺乏对下行传输大孔径接收闪烁频谱的理论研究。为此,利用孔径接收的对数振幅相关函数,推导了适用于星-地激光下行链路的大气闪烁频谱表达式;并进行恒星观测实验,实际测量了下行孔径接收的闪烁频谱;将理论计算与实验结果进行了比较和验证。

2 理论分析

对于星-地激光通信系统,卫星上的光源远离大气层,下行光波到达大气湍流层时可近似为平面波。光学地面站通常采用大口径接收天线。此时,由“泰勒冻结湍流假设”和 Yura 等的研究结果^[10]可知,对数振幅相关函数为

$$B_x(v_{\perp} \tau, D_r) = 4\pi^2 \int_{h_0}^H dz \cdot [(z - h_0) \sec \zeta]^2 \int_0^{\infty} d\kappa \cdot \kappa^5 \Phi_n(\kappa, z) \text{sinc}^2 \left[\frac{\kappa^2 (z - h_0) \sec \zeta}{2k} \right] \left[\frac{2J_1(\kappa D_r)}{\kappa D_r} \right] J_0(\kappa v_{\perp} \tau), \quad (1)$$

式中, H 是大气湍流层的有效厚度, h_0 是光学地面站的高度, ζ 是光束传输的天顶角, $k = 2\pi/\lambda$ 是光波波数, λ 是光波长, κ 是湍流空间波数, v_{\perp} 是垂于传输方向的平均风速, τ 是两次测量的时间间隔, $J_0(x)$ 是零阶贝塞尔函数, $J_1(x)$ 是一阶贝塞尔函数, $\Phi_n(\kappa, z)$ 是湍流谱密度, $\text{sinc}(x) = \sin(x)/x$ 。

在星-地激光链路中,卫星轨道高度在 10^6 m 量级以上,大气湍流层的有效厚度仅为 10^4 m 的量级,因此大部分湍流旋涡位于接收望远镜的近场。此时,接收光场的菲涅耳半径远小于湍流内尺度,满足几何光学近似条件^[7],即

$$\text{sinc}^2[\kappa^2 (z - h_0) \sec \zeta / (2k)] \approx 1, \quad (2)$$

由(2)式,(1)式可化简为

$$B_x(v_{\perp} \tau, D_r) = 4\pi^2 \int_{h_0}^H dz \cdot [(z - h_0) \sec \zeta]^2 \int_0^{\infty} d\kappa \cdot \kappa^5 \Phi_n(\kappa, z) \left[\frac{2J_1(\kappa D_r)}{\kappa D_r} \right]^2 J_0(\kappa v_{\perp} \tau). \quad (3)$$

采用科尔莫戈罗夫湍流谱,即 $\Phi_n(\kappa, z) = 0.033 C_n^2(z) \kappa^{-11/3}$,将(3)式进行傅里叶变换,得到星-地下行孔径接收的闪烁频谱

$$W_x(\omega, D_r) = 0.132\pi^2 \int_{h_0}^H dz \cdot [(z - h_0) \sec \zeta]^2 C_n^2(z) \int_0^{\infty} d\kappa \cdot \kappa^{4/3} \left[\frac{2J_1(\kappa D_r)}{\kappa D_r} \right]^2 \int_0^{\infty} d\tau \cdot J_0(\kappa v_{\perp} \tau) \cos(\tau\omega) = \\ 0.132\pi^2 \mu \int_{\omega/v_{\perp}}^{\infty} d\kappa \cdot \kappa^{4/3} \left[\frac{2J_1(\kappa D_r)}{\kappa D_r} \right]^2 \frac{1}{\sqrt{\kappa^2 v_{\perp}^2 - \omega^2}}, \quad (4)$$

式中, $\omega = 2\pi f$ 是圆频率, f 是闪烁频率, $\mu = \int_{h_0}^H C_n^2(z) [(z - h_0) \sec \zeta]^2 dz$ 。

为了得到(4)式的解析表达式,用近似函数 $\exp(-b^2 \kappa^2 D_r^2)$ 替换 $\left[\frac{2J_1(\kappa D_r)}{\kappa D_r} \right]^2$,并作变量变换, $t = \frac{\kappa^2 v_{\perp}^2}{\omega^2} - 1$,

即 $\kappa = \left(\frac{\omega}{v_{\perp}} \right) \sqrt{1+t}$, $d\kappa = \frac{\omega}{2v_{\perp}} \frac{dt}{\sqrt{1+t}}$, $t \in [0, \infty)$ 。对变量 t 积分,得

$$W_x(\omega, D_r) = 0.066\pi^2 \mu \omega^{4/3} v_{\perp}^{-7/3} \exp\left[-\left(\frac{\omega}{\omega_s}\right)^2\right] U\left[\frac{1}{2}, \frac{5}{3}, \left(\frac{\omega}{\omega_s}\right)^2\right], \quad (5)$$

式中 $\omega_s = \frac{v_{\perp}}{b \cdot D_r}$, $U(a, b, z)$ 是第二类合流超几何函数。

3 数值计算与分析

根据(5)式,分析接收孔径尺度和传输天顶角对闪烁频谱的影响。为了便于与实验结果对比分析,计算参数为实验地点数据。湍流层的有效厚度为 20 km,地面观测站的高度为 150 m,横向平均风速 $v_{\perp} = 5$ m/s,折射率结构常量采用 Hufnagel-Valley 模型^[10]

$C_n^2(h) = 0.0059(\nu/27)^2(10^{-5}h)^{10} \exp(-h/1000) + 2.7 \times 10^{-16} \exp(-h/1500) + A \exp(-h/100)$, (6)
 式中 h 是高度,单位为 km, $A = 1.5 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ 是地面折射率结构常量, $\nu = 10 \text{ m/s}$ 是高空的均方根风速。

图 1 给出在天顶角为 0° ,不同接收天线口径下的大气闪烁频谱。图 2 反映了在接收天线直径为 0.5 m 的条件下,传输天顶角对大气闪烁频谱的影响。

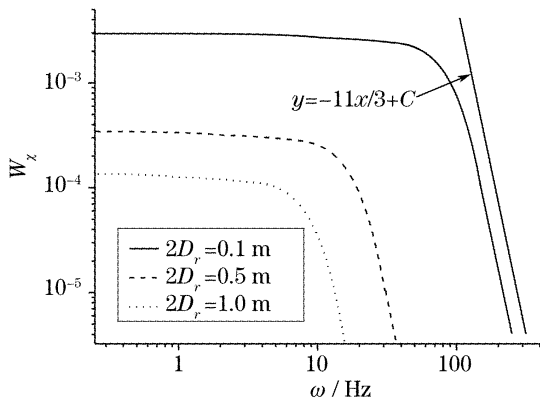


图 1 不同接收孔径下的大气闪烁频谱

Fig. 1 Power spectrum of atmospheric scintillation with different receiving apertures

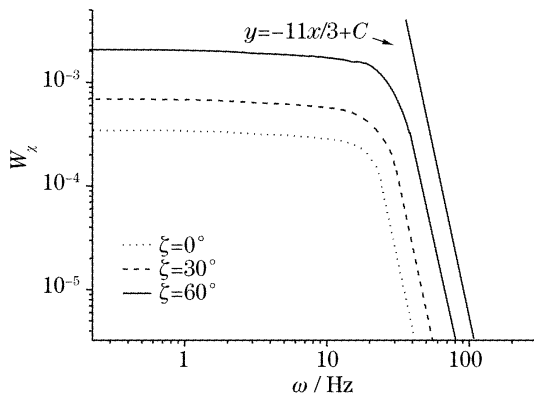


图 2 不同天顶角下的大气闪烁频谱

Fig. 2 Power spectrum of atmospheric scintillation at different zenith angles

从图 1 中可以看出,孔径接收下的闪烁频谱分为低频段和高频段两部分,低频段为常量,高频段呈指数关系变化,指数因子为 $(-11/3)$ 。从图 1 和图 2 可以看出,随着接收天线的孔径增大或者天顶角减小,闪烁频谱的形状均保持不变,但闪烁频谱在各频率点上的幅值逐渐减小。这是因为接收孔径增大时,接收天线孔径内散斑元的数目增加,它们之间的非相干叠加减小了闪烁强度。而当天顶角减小时,下行光束在大气湍流层中的传输距离减小,因此闪烁频谱的各频率分量的幅值减小。

4 实验结果与分析

恒星星光与星-地下行光束的传输情况相比较,相同之处有:①光源都远离大气层,光波到达大气湍流层时都为平面波;②随着卫星轨道运动或者地球转动,光波以不同的天顶角穿过大气层到达地面接收端。因此,探测恒星星光能够充分地研究星-地激光链路下行光束的闪烁特性。为此,进行了恒星观测实验,对下行孔径接收的闪烁频谱进行了实际测量。

接收系统如图 3 所示。接收系统包括接收望远镜、控制伺服系统和信号探测系统。接收望远镜的孔径为 0.6 m,焦距为 5.5 m,放大倍数为 60 倍,主镜和副镜的反射中心波长和带宽分别为 532 nm 和 25 nm。伺服系统包括力矩电机和光电码盘,其功能是控制望远镜在赤经、赤纬两维方向上进行搜索和跟踪恒星。望远镜的瞄准精度为 $5 \mu\text{rad}$ 。信号探测系统包括 CMOS 探测器、信号采集卡和计算机,其中 CMOS 探测器型号为 BASLER-A600f,像素数目为 $659(H) \times 493(V)$,像素尺寸为 $9.99 \mu\text{m}(H) \times 9.99 \mu\text{m}(V)$ 。在实验过程中,CMOS 探测器的窗口选取为 $50 \text{ pixel} \times 50 \text{ pixel}$,采样频率为 800 Hz,每次采样点数目为 10^5 。实验选择在晴朗夜间进行,观测大角星、织女星等视星等小于 1 的恒星。实验

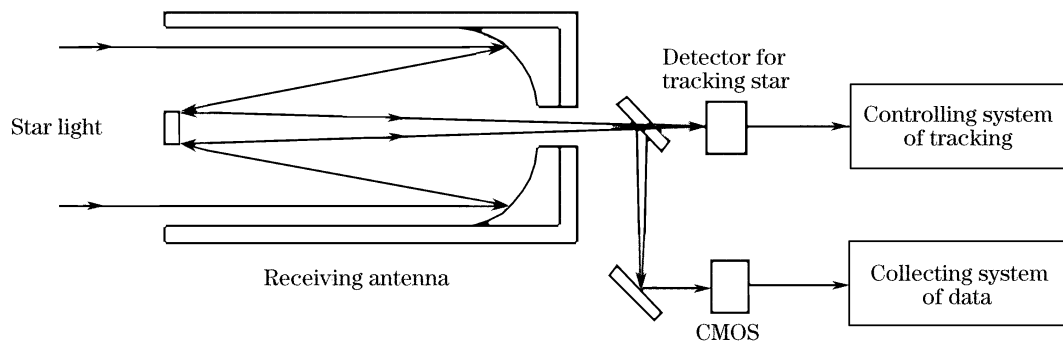


图 3 接收系统的结构示意图

Fig. 3 Configuration of the receiver

中的平均风速 5~8 m/s, 温度 5~10 °C。

CMOS 光敏面上形成了直径约为 50 μm 恒星像斑, 即 5×5 的像素矩阵。将各像素的灰度值进行累加获得总灰度值。利用灰度值与光强的换算关系得到接收的恒星光强。进而将光强的时间序列进行离散傅里叶变换, 并且做五点平滑处理, 得到如图 4 所示的在两种天顶角下观测大角星的闪烁频谱。可以看出, 不同天顶角下闪烁频谱的形状相同, 但小天顶角的闪烁频谱幅值小于大天顶角的幅值。从图 4 还可以看出, 孔径接收下闪烁频谱包括低频和低频两段。直线 1 反映了低频谱为常量, 直线 2 反映了高频谱呈指数关系变化, 指数因子为 $(-11/3)$ 。高频谱末端的平坦部分是探测噪声区。

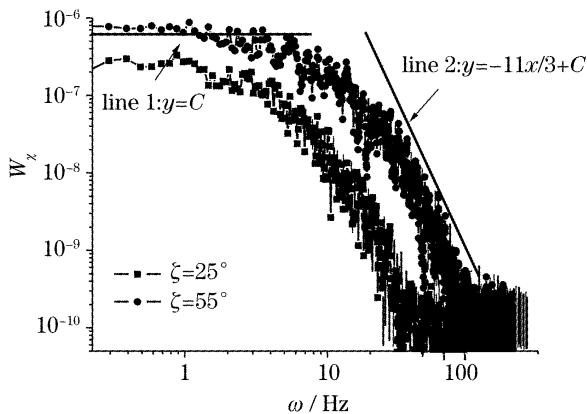


图 4 天顶角 $\zeta=25^\circ$ 和 55° 时的实测大气闪烁频谱
Fig. 4 Measured power spectrum of atmospheric scintillation at zenith $\zeta=25^\circ$ and 55°

由图 4 可知, 大气闪烁频谱的实测结果验证了理论计算。但是在实验数据分析中, 发现在望远镜的指向变化较快或地面能见度较低的情况下, 高频谱的指数因子偏离 $(-11/3)$ 的现象, 即高频谱以较慢的速度下降。主要原因包括:

(1) (5) 式的物理基础是科尔莫戈罗夫湍流统计理论, 即科尔莫戈罗夫湍流谱, 它是在大气湍流满足局地均匀各向同性的条件下得到。因此大气湍流状态决定了高频谱的斜率。由实验结果可知, 当平均风速较小 ($0 \sim 1$ m/s) 时, 高频谱的幂指数为 $(-5/3)$, 偏离理论值。当平均风速较大 ($5 \sim 8$ m/s) 时, 高频段的幂指数为 $(-11/3)$, 实验结果与理论一致。这是因为入夜后地面净辐射变成负数, 下垫表面冷却, 导致大气湍流层从下往上降温, 从而逐渐发展成逆温层结构的稳定状态。湍流漩涡在运动中要克服重力做功, 消耗动能, 从而抑制了湍流能量交换。此时, 大气湍流未得到充分的发展, 不能满足局地均匀各向同性条件, 大气折射率谱较平缓^[11], 从

而导致闪烁高频谱以慢于理论值的速度下降。当风速较大时, 由于风速切变以及下垫表面对气流的阻挡和切应力的作用, 使得大气湍流得到充分的发展, 满足局地均匀各向同性的条件, 因此理论计算与实验结果一致。

(2) 在利用伺服系统控制望远镜进行搜索和跟踪恒星的过程中, 由于力矩电机引起的机械振动、码盘在测角精度内的随机误差、闭环控制系统反馈频率的随机性等因素, 造成接收望远镜的瞄准方向随机抖动。瞄准抖动引起的光强起伏相当于在测量中引入随机噪声, 从而增加了实测闪烁频谱中的高频成分。

(3) 从实验的地形条件来看, 实验地点位于山顶, 地表覆盖物为灌木和沙土, 山脚处有宽阔的湖面。复杂的地表环境引起复杂的大气湍流状态^[12], 同时大气中含有灰尘、雾等悬浮微粒。空间随机分布的微粒散射造成的光强起伏与湍流旋涡引起的相互迭加, 从而减缓了高频谱的下降速度。

因此, 在实际工程中应考虑接收系统的机械振动、大气湍流状态、周围环境等因素对闪烁频谱的影响。同时, 由于卫星的定位及姿态控制误差、卫星平台微振动和大气湍流效应, 使得在星-地链路中同时存在跟瞄抖动和大气闪烁。相比于恒星星光, 星-地下行闪烁频谱还包含跟瞄抖动引起的起伏频谱分量, 它与实际卫星平台动力学环境有关。

5 结 论

结合星-地激光通信下行链路的实际情况, 利用孔径接收下的对数振幅相关函数, 导出了下行大孔径接收闪烁频谱的表达式。进而分析了接收天线孔径和传输天顶角对闪烁频谱的影响。通过恒星观测实验, 实际测量了下行大孔径接收的闪烁频谱, 比较分析了理论计算和实验结果。研究表明, 下行孔径接收下的闪烁频谱分为低频段和高频段两部分, 低频谱为常量, 高频谱呈指数关系变化, 指数下降因子为 $(-11/3)$ 。随着接收孔径增加或天顶角减小, 闪烁频谱的形状保持不变, 但频谱幅值逐渐减小。

参 考 文 献

- 1 Tatarski V. I.. *Wave Propagation in a Turbulent Medium* [M]. Wen Jingsong, Song Zhenfang, Zeng Zongyong et al.. Transl.. Beijing: Science Press, 1978 (in Chinese)
塔塔尔斯基著. 湍流大气中波的传播理论 [M]. 温景嵩, 宋正方, 曾宗泳等译. 北京: 科学出版社, 1978
- 2 S. F. Clifford. Temporal-frequency spectra for a spherical wave propagating through atmospheric turbulence [J]. *J. Opt. Soc.*

- Am. A*, 1971, **61**(10): 1285~1292
- 3 Larry C. Andrews, Ronald L. Phillips. *Laser Beam Propagation through Random Media* [M]. Bellingham: SPIE Optical Engineering Press, 1998, Chap. 7: 189~192
- 4 J. W. Strohben. *Laser Beam Propagation in the Atmosphere* [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1978. 129~170
- 5 Rao Ruizhong, Gong Zhiben. High-frequency fluctuation behaviour of laser beam propagating through a turbulent atmosphere[J]. *Chin. J. Lasers*, 2001, **A29**(Suppl.): 281~284 (in Chinese)
饶瑞中, 龚知本. 激光在湍流大气中传播的高频起伏特征[J]. *中国激光*, 2001, **A29**(增刊): 281~284
- 6 Rao Ruizhong, Gong Zhiben, Wang Shipeng *et al.*. Aperture averaging of saturated scintillation of laser propagation in the atmosphere[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(1): 36~40 (in Chinese)
饶瑞中, 龚知本, 王世鹏 等. 激光大气闪烁饱和的孔径平均效应[J]. *光学学报*, 2002, **22**(1): 36~40
- 7 H. T. Yura, W. G. McKinley. Aperture averaging of scintillation for space-to-ground optical communication applications[J]. *Appl. Opt.*, 1983, **22**(11): 1608~1609
- 8 Morio Toyoshima, Shiro Yamakawa, Toshihiko Yamawaki *et al.*. Ground-to-satellite optical link tests between Japanese laser communications terminal and European geostationary satellite ARTEMIS[C]. *Proc. SPIE*, 2004, **5338**: 1~15
- 9 Masahiro Toyoda, Morio Toyoshima, Tetsuo Takahashi *et al.*. Ground to ETS-VI narrow laser beam transmission[C]. *Proc. SPIE*, 1997, **2699**: 71~77
- 10 Frederick G. Smith. *The Infrared and Electro-Optical Systems Handbook* [M]. Bellingham: SPIE Optical Engineering Press, 1993, 2. Chap. 2
- 11 A. Zilberman, E. Golbraikh, N. S. Kopeika. Validity of Kolmogorov turbulence at higher elevations[C]. *Proc. SPIE*, 2004, **5338**: 298~305
- 12 Wang Shipeng, Rao Ruizhong, Liu Xiaochun. Observation of statistical properties of laser irradiance scintillation over complex terrain[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(7): 783~786 (in Chinese)
王世鹏, 饶瑞中, 刘晓春. 复杂传播路径条件下激光光强起伏特性研究[J]. *光学学报*, 2001, **21**(7): 783~786



中国科学院上海光学精密机械研究所光学设计高级讲习班教材征订

中国科学院上海光学精密机械研究所光学设计高级讲习班于2006年10月27日胜利闭幕。现有少量讲习班辅导教材征订,数量有限,欲购从速。四本教材主要内容包括:

1) 王之江院士、徐文东研究员主讲光学系统设计

光学设计中的基本概念和问题:光学系统的基本要求及指标、高斯光学、像差理论、成像质量和发展各种不同结构的光学系统的意义等的阐述,结合现在流行的光学软件设计的基本功能进行介绍,立足于当前具有代表性的产品设计进行实例的分析和讲解。

2) 朱健强研究员主讲光机系统设计和光学加工

本课程的内容涵盖了光机设计的原理、设计方法及常规内容。介绍各类光学元件加工的各个工艺环节及其相关测控技术,培养光学工程师所需掌握的必要光学加工工艺知识。平面、球面、透镜、棱镜等光学加工技术、非球面加工技术,特种光学元件加工技术,光学检测技术。

3) 范正修研究员主讲光学薄膜

从光学薄膜的一般性质出发,讲述光学薄膜在激光系统,光通信系统,显示系统中的应用,介绍极紫外和软X射线薄膜,功能性光学薄膜。分析激光对光学薄膜的破坏过程。

教材目录:

《光学加工与检测技术》、《光学机械设计》、《光学设计》、《光学薄膜及其应用》。

征订形式:

- 1) 全套教材或电子版: 400 元
- 2) 全套教材+电子版: 500 元
- 3) 单本教材+电子版: 150 元

优惠办法:

中国光学期刊网会员购买全套教材赠送价值100元的期刊阅读卡一张。

征订办法:

联系人: 高老师 电话: 021-69918253 邮箱: gfhai@siom.ac.cn

邮购方法:

请直接汇款到以下地址:

邮编: 201800 地址: 上海市嘉定区清河路390号 收款人: 光学期刊联合编辑部