

基于相推法的空间光载射频链路绝对延时测量

孙修远^{1,2}, 王 辉¹, 徐忠扬², 冯利鹏¹, 王祥传², 潘时龙²

(1. 上海卫星工程研究所, 上海 201109; 2. 南京航空航天大学 电子信息工程学院 雷达成像与微波光子技术教育部重点实验室, 江苏 南京 211106)

摘 要: 空间光载射频链路利用空间光链路实现射频信号的传输。由于采用大气信道传输光载射频信号, 链路绝对延时受到大气湍流和温度等因素影响, 产生延时抖动。本文采用相推法对 1 km 空间光载射频链路的绝对延时进行了高精度测量, 测量结果与理论模型吻合, 测量精度优于 0.1 ps。该测量方法采用电光调制和射频鉴相实现了链路绝对延时测量, 与光载射频链路具有良好的技术兼容性, 同时较高的测量精度可以满足构建稳定光载射频传输链路的要求。

关键词: 相推法; 空间光载射频链路; 大气信道; 绝对延时; 精密测量

中图分类号: TN 929.12

文献标志码: A

DOI: 10.19328/j.cnki.2096-8655.2022.02.009

Absolute Time Delay Measurement for Radio over Free-Space-Optical Links Based on Phase-Derived Method

SUN Xiuyuan^{1,2}, WANG Hui¹, XU Zhongyang², FENG Lipeng¹,
WANG Xiangchuan², PAN Shilong²

(1. Shanghai Institute of Satellite Engineering, Shanghai 201109, China; 2. Key Laboratory of Radar Imaging and Microwave Photonics of Ministry of Education, College of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, Jiangsu, China)

Abstract: The radio over free-space-optical (RoFSO) link uses a free-space-optical link to transmit radio-frequency (RF) signals through atmospheric channels. Owing to the effects of atmosphere turbulence and temperature, the time delay of the free-space-optical link suffers from timing jitter, which may degrade the performance of the RoFSO link. In this paper, the absolute time delay of a 1 km RoFSO link is precisely measured with a phase-derived method. The results are accord with the theoretical model, and the measured accuracy is higher than 0.1 ps. Owing to the use of electro-optic modulation and radio frequency (RF) phase discrimination, the measurement method is compatible with the RoFSO link, and the high accuracy can meet the requirements for a stable RoFSO link.

Key words: phase-derived method; radio over free-space-optical (RoFSO) link; atmospheric channel; absolute time delay; precise measurement

0 引言

微波光子射频链路具有传输带宽大、损耗低、抗电磁干扰等优点^[1], 在现代通信网络中发挥着重要作用。然而, 基于光纤的光载射频系统(Radio over Fi-

ber, RoF)受限于光纤等基础设施的铺设。在偏远山区、海上、移动终端等未铺设或无法铺设光纤的场景, 更加灵活的空间光载射频传输(Radio over Free-Space-Optical, RoFSO)系统具有更广的应用前景^[2]。

收稿日期: 2021-01-27; 修回日期: 2021-05-02

基金项目: 上海航天科技创新基金(SAST2018054); 雷达成像与微波光子技术教育部重点实验室开放课题(RIMP2020001); 国家自然科学基金(61527820, 62075095)

作者简介: 孙修远(1997—), 男, 硕士生, 主要研究方向为面向空间微波光子链路的绝对延时测量技术。

通信作者: 徐忠扬(1988—), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为空间光载射频技术、调频连续波激光雷达技术。

空间光载射频传输系统直接利用大气信道构建微波光子射频链路,实现收发两端的光载射频互联。除了微波光子链路自身的优点以外,该技术还具有搭建速度快、维护方便、保密性好、无需申请频谱等优点^[3]。

然而,在实际应用中大气信道是开放信道,相较于光纤来说具有较高的不稳定性。大气中微小的热运动、温度、压强、湿度变化等将导致折射率随机变化,被称作大气湍流,也叫大气扰动。大气扰动严重限制了空间光载射频链路的传输性能,具体表现为强度抖动与到达时间抖动。对于强度抖动来说,可分为波前畸变、光斑漂移、到达角起伏^[4]等现象。强度抖动可以通过自适应光学技术^[5]以及高精度的捕获、跟踪和瞄准(ATP)技术^[6]抑制,以增强空间光链路的可靠性。到达时间抖动会引入额外的延时误差,前人已经对此展开丰富研究,并提出了适用于不同条件下的大气湍流模型,如柯尔莫哥洛夫(Kolmogorov)模型、塔塔尔斯基(Tatarski)模型^[7]等。时间抖动的补偿方式主要有被动补偿与主动补偿2种形式:被动补偿用2次传输产生的相位共轭项来对传输信号进行预失真处理,使接收端信号稳定^[8-9],但此方法仅适用于传输单频信号,宽带射频传输系统无法适用;主动补偿通过精确测量链路绝对延时,反馈至电控延时线、压电陶瓷等真延时产生装置,改变其延时量,使整个传输链路的延时保持稳定^[10]。因此,主动补偿需要精确的绝对延时测量。

针对大气光链路绝对延时的测量,已有许多学者展开相关研究。2010年,韩国科学技术院的研究人员基于飞行时间测量法,进行了空间光链路的距离测量。他们使用PPKTP晶体来获取光学平衡互相关信号(BOC),通过改变锁模激光器重复频率使BOC信号落在锁定点来获取距离信息,实现了纳米级精度的距离测量系统。最终在80 s测量时间内测得,695 m平均长度下有约20 μm的抖动^[11],也就是70 fs的绝对延时抖动。2014年,美国国家标准与技术研究院的学者基于双光频梳的线性采样原理,测量了2 km水平空间光链路对激光时频传输系统的影响。实验中,通过使用稳定的光频梳实现对另一个重复频率略有差别的光频梳的线性采样,实现了飞秒级精度的绝对延时测量系统。最终测得从上午至中午的6 h内,延时改变量为27 ps,其时间抖动功率谱密度符合傅里叶频率的-2.3次幂律,低频处无明显衰减^[12]。然而上述2种测量方法主要依靠高

度稳定的光频梳,系统较为复杂,成本较高,且与光载射频链路不兼容。针对上述问题,我们搭建了一种基于相推法的空间光链路绝对延时测量系统,实现了长时间的绝对延时测量。该方法采用连续激光作为光源,通过射频信号调制激光信号,并利用射频鉴相获得目标延时信息。因此,该方法与光载射频链路具有良好的技术兼容性。

1 绝对延时抖动的产生与测量原理

1.1 绝对延时抖动来源

在空间光链路中,光学绝对延时正比于大气折射率与链路长度,而大气折射率与局部温度、压强有关。在光频范围内,折射率可按照如下公式计算^[13]:

$$n = 1 + 77.6(1 + 7.52 \times 10^{-3} \lambda^{-2}) \frac{P}{T} \times 10^{-5} \quad (1)$$

式中: λ 为光波波长(μm); P 为气压(kPa); T 为热力学温度(K)。

由式(1)可知,大气折射率随着温度的升高而降低,空间光链路的绝对延时也随着温度的升高而减小。以1 km长度空间光链路为例进行仿真,仿真结果如图1所示。其中光波波长为通信波段1.55 μm,气压取标准大气压101.325 kPa,为了使绘图更简洁,横坐标绝对延时量减去3 334 200 ps。由图可知,大气温度由20 °C升高到30 °C,绝对延时减小34 ps。

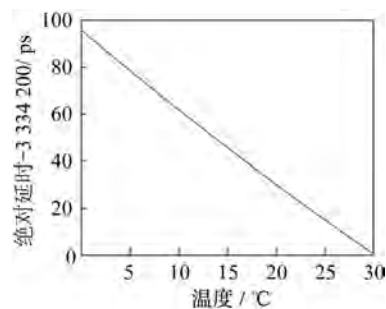


图1 绝对延时仿真结果

Fig.1 Simulation result of the absolute time delay

同时由于太阳辐射与水平风的存在,空间光链路传输路径上的温度、气压变化,导致折射率随机改变。因此,绝对延时抖动也是一个随机过程,需要用统计的方法对绝对延时抖动进行分析。1941年,柯尔莫哥洛夫在局部均匀各向同性湍流等假设条件下,提出了空间折射率抖动谱^[7]:

$$\Phi_n(k) = 0.033 C_n^2 k^{-11/3}, 2\pi/L_0 < k < 2\pi/l_0 \quad (2)$$

式中: C_n^2 为大气折射率结构常数, 表征了大气湍流的强度, 与垂直于传输路径的风速、链路高度有关, 一般落在 $10^{-12} \sim 10^{-17} \text{ m}^{-2/3}$; k 为空间波数; l_0 为内尺寸, 一般为毫米量级; L_0 为外尺寸, 与空间光路的高度有关, 一般为米量级。在垂直于传输路径的风速不变时, 三维的柯尔莫哥洛夫折射率抖动谱可以被转换为一维的延时抖动功率谱密度^[12]:

$$S_{\text{inter}}(f) = (2\pi v_0)^{-2} 0.016 k^2 C_n^2 \cdot L V^{5/3} f^{-8/3} \quad (3)$$

$$V/L_0 < f < V/l_0$$

式中: v_0 为光载波频率; L 为空间光链路长度; V 为垂直于传输路径的风速; f 为相位噪声频率。

综上所述, 绝对延时抖动与大气折射率结构常数、光载波频率、空间光链路总长度、垂直于传输路径的风速有关。

1.2 基于相推法的绝对延时测量原理

基于相推法的绝对延时测量系统通过恢复加载在光波上的微波信号的相位变化得到延时信息。假定微波信号是理想单音信号, 忽略掉额外相噪情况, 相位变化 φ 与延时 τ 有如下关系:

$$\tau = \frac{\varphi}{\omega} \quad (4)$$

式中: ω 为微波信号的角频率。

因此, 可以通过测量某一频点上的相位变化来得到链路延时信息, 而相位测量的精度与射频信号的稳定度就决定了延时测量的精度。基于相推法的光载射频链路绝对延时测量系统如图 2 所示。

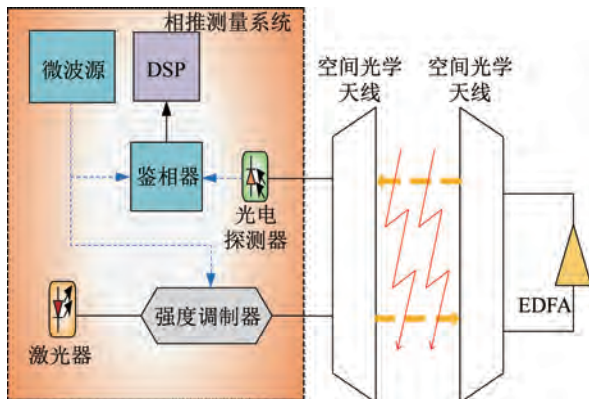


图 2 绝对延时测量原理图

Fig.2 Schematic diagram of the absolute time delay measurement

激光器发出激光作为载波, 进入电光调制器中, 由一个单音射频信号对激光进行强度调制。载

有射频信号的光信号经大气链路传输后, 用光电探测器恢复出射频信号, 由鉴相器得出该信号与发射端的相位差, 送入数字信号处理单元(DSP)中获得延时信息。在远端的掺铒光纤放大器(EDFA)用于光信号放大以补偿空间光链路的功率损耗问题。由于鉴相器得到的相位存在 2π 模糊, 基于单音信号调制的相位测量技术无法得出绝对的相位延迟。为了解决这一问题, 可以采用扫频的方式得到一系列相位变化, 再由相位展开算法恢复出实际的相位延迟, 最终获取链路的延时信息, 该方法即为相推法。

调制器输出的光信号可表示为

$$E_i \propto (1 + m \cos(\omega_{\text{RF}} t + \varphi_i)) \exp(j\omega_c t) \quad (5)$$

式中: m 为调制系数; ω_{RF} 为射频信号角频率; φ_i 为射频信号的初相位; ω_c 为光载波的角频率。

经大气链路传输后, 光信号表示为

$$E_o \propto (1 + m \cos(\omega_{\text{RF}}(t - \tau) + \varphi_i)) \exp(j\omega_c(t - \tau)) \quad (6)$$

式中: τ 为链路延时, 受大气湍流影响, 延时 τ 随时间变换。

接收到的光信号通入光电探测器中进行光电转换, 其中光电探测器输出的光电流的交流部分为

$$i_p \propto m \cos(\omega_{\text{RF}}(t - \tau) + \varphi_i) \quad (7)$$

该信号与调制信号的相位差为 $\omega_{\text{RF}}\tau$ 。因鉴相器存在 2π 模糊, 得到的只是折叠后的相位, 即包裹相位值。而绝对相位差可写成

$$\varphi = 2N\pi + \theta \quad (8)$$

式中: N 为非负整数; θ 为包裹相位值。

为了得到 N 的具体值, 需要用多个频点进行扫频, 得到一系列相位值后, 运用相位展开算法对包裹相位进行展开。

根据测量系统的最大量程, 确定频率间隔, 使两点之间的相位跳变始终小于 2π 。即最大延时与频率间隔的乘积小于 1, 以保证相位展开算法的有效性。得到所有展开相位值后, 为了使精度最高, 一般根据最高频的相位值计算出待测的延时量。其中, 最高频的选取与鉴相器精度和目标测量精度有关, 扫频的范围大小由鉴相器精度决定^[14]。

具体的相位展开算法如下: 在算法有效的前提下, 将测量所得相位按照频点从低到高的顺序排列, 如果第 $n+1$ 个相位值小于第 n 个相位值, 则

$n+1$ 之后的点都加 2π 。假定扫频时间内链路长度不变的情况下,频率越高,则相位值越大。同时,两个频点间的相位跳变始终小于 2π ,因此,第 $n+1$ 个点之后的相位都应加 2π 进行修正。当所有相邻两点间的相位差都小于 2π 后,便恢复出了修正后的相位值。根据频率与相位间的线性关系,即可恢复出未包裹的相位值,即绝对相位值。所有相位展开后,根据式(1),得到链路的绝对延时信息。

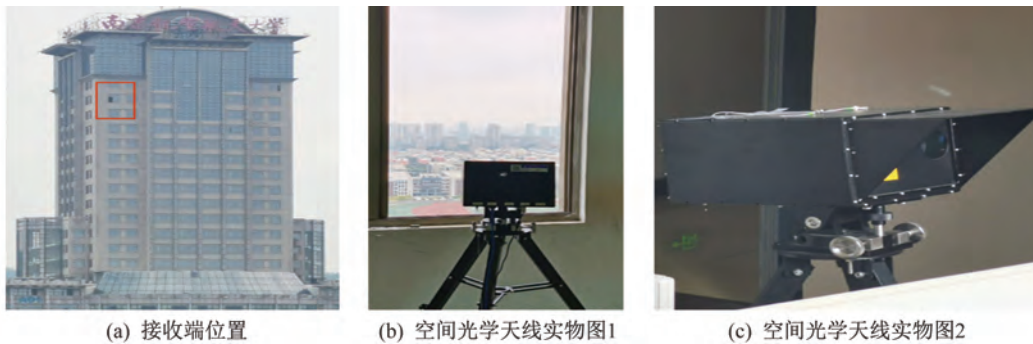


图 3 实验实物图

Fig.3 Images of the experimental setup

测试场景的卫星图像如图 4 所示,由图中可知,远端与本地端单向距离约为 500 m。同时由于两端水平高度落差约为 50 m,可以近似认为光线传输路径上,大气湍流强度处于同一水平分层上。实际测量中在远端采用掺铒光纤放大器将接收信号放大后,再反向传输回到本地端,双向传输的光链路总距离约为 1 km。基于相推法的绝对延时测量系统采用的是自研高精度测长仪,前期的测量结果表明测长仪在光纤内的绝对延时测量精度可达 ± 0.05 ps^[15]。



图 4 测试场景的卫星图像

Fig.4 Satellite image of the test scenario

测量结果如图 5 所示。图 5 分别为 8:30—11:30、13:30—17:30、18:30—21:45 的绝对延时测

2 实验结果与分析

根据以上测量原理和系统结构,搭建了空间光载射频链路实验系统。测试中,在天气情况相似的几天内进行数个长时间的绝对延时测量。图 3(a) 中建筑物所示为本地端视角下的远端位置,其中红框内所示窗户即为远端所处位置。本次实验所使用的空间光学天线采用收发分离的结构,具有精跟踪功能,发射口径为 25 mm,接收口径 60 mm。其外观如图 3(b)、图 3(c) 所示。

量。由于 3 次测量所采用的系统总光纤长度不同,3 幅图中的绝对延时值略有差别。对比 3 次测量结果可知:日间的延时抖动强度明显高于夜间。相较于图 5(c),图 5(a)、图 5(b) 中的延时抖动更为剧烈。这是由于日间有太阳直射,大气中的热运动比较剧烈,折射率改变速度较快,而夜晚延时的抖动主要源于整体气温变化,延时变化较为平稳。同时,图 5(a) 8:30—11:30,温度升高,绝对延时减小,延时漂移约为 16 ps;图 5(b) 13:00—17:00,温度稳定,绝对延时在一定范围内抖动;图 5(c) 18:30—21:50,温度降低,绝对延时增大。这一结果说明温度升高将导致空气折射率降低,与式(1)结论相符。

由于空间光载射频链路的延时时刻在抖动,为验证本系统的绝对延时测量精度,取图 5 所示绝对延时测量结果中的 3 段进行分析。测试时间从上至下分别为 21:09:00—21:09:30、19:32:30—19:33:00、15:31:10—15:31:40。测量速度为 15 次/s,每段测量时间 30 s,共有 450 个测量点,测试结果如图 6 所示。由于测量时间较短(30 s),可以认为此段时间内的温度变化对绝对延时的影响较小,此时测量值的波动即可认为是本系统的绝对延时的测量误差与大气扰动的共同作用结果。由此

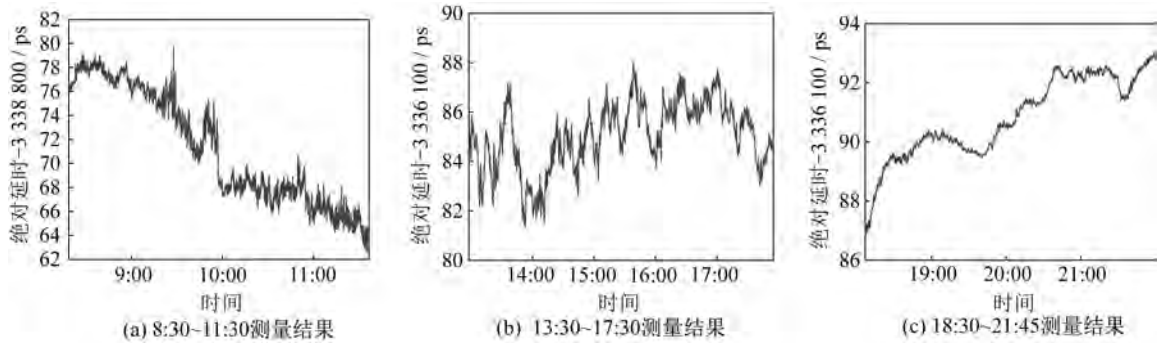


图 5 不同时间段的绝对延时测量结果

Fig.5 Measurement results of the absolute time delay

可以认为测量误差应小于波动范围,如图 6 所示。图中测试结果显示的延时波动范围分别为 0.05、0.04、0.08 ps,均小于 0.1 ps,由此推测本系统延时测量精度优于 0.1 ps。在实际应用中,以射频信号频率为 10 GHz 的光载射频链路为例,0.1 ps 的绝对延时误差对应的相位误差为 0.36° ,高于普通的鉴相器精度,因此该系统的测量精度可以满足构建稳定空间光载射频链路的应用需求。

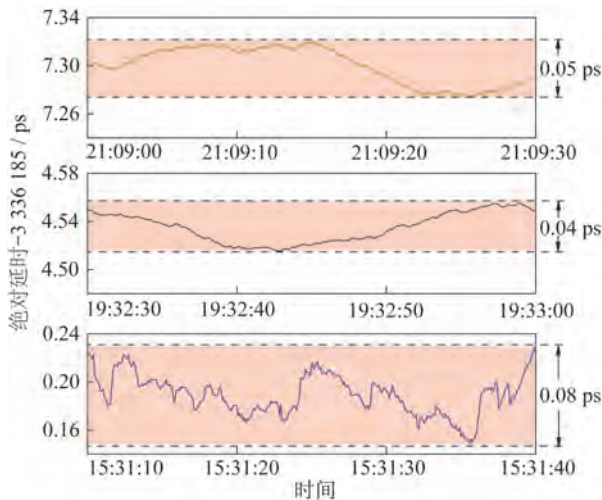


图 6 30 s 内测量结果

Fig.6 Measurement results within 30 s

3 结束语

针对空间光载射频链路的到达时间抖动问题,我们研究了基于相推法的绝对延时测量系统。本文介绍了相推法的工作原理,并搭建了总长约 1 km 的双向空间光链路,分别在不同时间对光链路的绝对延时进行了连续测量。测量数据表明,该系统的测量精度优于 0.1 ps。通过对比不同时刻测量结果发现:上午抖动较为剧烈,4 h 延时漂移约为 16 ps,下午温度稳定,

绝对延时无明显漂移,夜晚抖动主要源于环境温度的变化。本文实验验证了基于相推法的空间光链路绝对延时测量系统的可行性,为构建稳定的空间光载射频链路,实现绝对延时补偿系统奠定基础。

参考文献

- [1] 潘时龙,田义,刘世锋,等.基于微波光子学的射频制导半实物仿真方法研究[J].上海航天,2019,36(4):98-109.
- [2] KAZAURA K, WAKAMORI K, MATSUMOTO M, et al. RoFSO: a universal platform for convergence of fiber and free-space optical communication networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2010, 48(2): 130-137.
- [3] 韩立强.大气湍流下空间光通信的性能及补偿方法研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2011.
- [4] 陈纯毅,杨华民,姜会林,等.大气光通信中大气湍流影响抑制技术研究进展[J].兵工学报,2009,30(6):779-791.
- [5] 刘超,陈善球,廖周,等.自适应光学技术在通信波段对大气湍流的校正[J].光学精密工程,2014,22(10):2605-2610.
- [6] 温涛.无线激光通信中ATP关键技术研究[D].长沙:国防科学技术大学,2006.
- [7] ISHIMARU A. Wave propagation and scattering in random media [M]. New York: Academic Press, 1978: 58-80.
- [8] SUN F Y, HOU D, ZHANG D N, et al. Femtosecond-level timing fluctuation suppression in atmospheric frequency transfer with passive phase conjunction correction [J]. Optics Express, 2017, 25(18): 21312-21320.
- [9] CHEN S J, SUN F Y, BAI Q S, et al. Sub-picosecond timing fluctuation suppression in laser-based atmospheric transfer of microwave signal using electronic phase compensation [J]. Optics Communications, 2017, 401(15): 18-22.
- [10] 高超,王波,白钰,等.基于光纤链路的高精度时间频率

- 传输与同步[J]. 科技导报, 2014, 32(34): 41-46.
- [11] LEE J, KIM Y J, LEE K, et al. Time-of-flight measurement with femtosecond light pulses[J]. *Nature Photonics*, 2010, 4(10): 716-720.
- [12] SINCLAIR L C, GIORGETTA F R, SWANN W C, et al. Optical phase noise from atmospheric fluctuations and its impact on optical time-frequency transfer[J]. *Physical Review A*, 2014, 89(2): 023805.
- [13] SUNILKUMAR K, ANAND N, SATHEESH S K, et al. Radiative effects of atmospheric aerosols on optical pulse propagation: implications to high data rate free space optical (FSO) communication systems[C]// *Laser Communication and Propagation through the Atmosphere and Oceans VIII*. California: International Society for Optics and Photonics, 2019: 1113310.
- [14] LI S P, WANG X C, QING T, et al. Optical fiber transfer delay measurement based on phase-derived ranging [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2019, 31(16): 1351-1354.
- [15] LI S P, QING T, FU J B, et al. High-accuracy and fast measurement of optical transfer delay [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2021, 70: 1-4.

(上接第 59 页)

- [13] 钟炜楠, 吴允平, 苏伟达, 等. 基于嵌入式系统的红外通讯解码应用[J]. *计算机系统应用*, 2019, 28(8): 246-250.
- [14] 吴守霞, 彭琳茹. 红外光通信装置的设计[J]. *工业仪表与自动化装置*, 2015, 1(6): 97-99, 104.
- [15] ZHANG S Q, YE L, ZHAO W C, et al. Realizing over 10% efficiency in polymer solar cell by device optimization [J]. *Science China Chemistry*, 2015, 58(2): 248-256.
- [16] 向梅, 贾振红, 涂楚辙. $\text{TiO}_2/\text{n-Si}/\text{p-Si}$ 及 $\text{n-PS}/\text{p-PS}/\text{Si}$ 的光伏特性[J]. *半导体光电*, 2007, 1(2): 218-220.
- [17] 赵太飞, 马壮, 李星善, 等. 近距离 LED 光通信直视信道模型研究[J]. *光子学报*, 2020, 49(1): 34-44.
- [18] 杨小雨. 基于室内光能采集的低功耗无线网络技术及应用[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2018.
- [19] 范瑞祥, 尹国明, 苗洁蓉, 等. 基于参数辨识的光伏组件快速 MPPT 方法 [J]. *太阳能学报*, 2020, 41(2): 296-302.
- [20] 李帅, 聂慧饶, 马浩, 等. 基于嵌入式系统的 X-MODEM 协议下的文件传送 [J]. *计算机应用*, 2010, 30(增刊 1): 198-199, 208.