

激光与光电子学进展

医疗无线光通信技术:进展、原型及展望

丁举鹏^{1*}, 易芝玲², 王劲涛³, 阳辉³, 王丽丽⁴, 郑旻¹, 赵楷¹, 张琳琳¹

¹新疆大学信息科学与工程学院信号检测与处理新疆维吾尔自治区重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830046;

²中国移动通信有限公司研究院, 北京 100053;

³清华大学电子工程系北京信息科学与技术国家研究中心, 北京 100084;

⁴鲁东大学信息与电气工程学院通信工程系, 山东 烟台 264025

摘要 目前,绝大部分应用于各类医疗场景的无线解决方案是基于传统射频的技术范式,因而必须要面对电磁干扰及医疗数据泄露等诸多潜在风险。另一方面,无线光技术具有频谱资源丰富、保密性强、抗电磁干扰、免频谱授权等诸多天然优势。因此,为充分发挥上述技术潜能,学术界和产业界正积极地从多个维度将多样的无线光技术引入到电磁敏感医疗场景。为清晰地阐述无线光技术在医疗场景应用的研究进展,分别从医疗无线光有源链路、医疗无线光无源链路、医疗无线光中继链路、医疗无线光原型实验等方面进行了梳理。此外,初步提出了医疗无线光技术进一步发展所要应对的主要技术挑战,给出了潜在解决方案。

关键词 光纤光学; 无线光通信; 智慧医疗; 无线光技术; 医疗监测系统

中图分类号 TN929.12

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202259.0700002

Healthcare Wireless Optical Communications Technology: Advances, Prototypes and Prospects

Ding Jupeng^{1*}, Yi Zhiling², Wang Jintao³, Yang Hui³, Wang Lili⁴, Zheng Jiong¹, Zhao Kai¹, Zhang Linlin¹

¹Key Laboratory of Signal Detection and Processing in Xinjiang Uygur Autonomous Region, College of Information Science and Engineering, Xinjiang University, Urumqi, Xinjiang 830046, China;

²China Mobile Research Institute, Beijing 100053, China;

³Beijing National Research Center for Information Science and Technology, Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

⁴School of Information and Electrical Engineering, Ludong University, Yantai, Shandong 264025, China

Abstract At present, most of the wireless solutions applied in various medical scenarios are based on the conventional radio frequency technology paradigm, which have to face several potential risks, such as electromagnetic interference and medical data leakage. On the other hand, wireless optical technology has many inherent advantages, such as abundant spectrum resources, high security, anti-electromagnetic interference, and no spectrum regulation. Therefore, for sufficiently illustrating the potentialities of this technology, the academia and industry are actively incorporating various wireless optical schemes into electromagnetic sensitive medical scenarios from multiple dimensions. In order to clearly present the state of art of the wireless optical application in medical

收稿日期: 2021-04-23; 修回日期: 2021-06-16; 录用日期: 2021-06-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 62061043);新疆维吾尔自治区自然科学基金面上项目(No. 2019D01C020);新疆维吾尔自治区全职引进高层次人才项目(No. 042419004);新疆维吾尔自治区天山雪松计划项目(No. 2020XS27)

通信作者: *jupeng7778@163.com

scenarios, this paper sorted out the medical wireless optical active links, the passive links, the relay links, and the relevant experimental prototypes. In addition, the main technical challenges and potential solutions for the further development of healthcare wireless optical technology are presented.

Key words fiber optics; wireless optical communications; smart healthcare; wireless optical technology; health monitoring system

1 引 言

随着人口规模的持续增长,传统医疗领域正面临患者规模过大、医疗设施紧张以及成本投入过高等诸多挑战。当前,伴随着物联网技术的快速发展,信息产业界正积极探索将此类信息技术与传统医疗领域结合起来,进而明确地提出智慧医疗这一新概念,以期通过提升医疗领域的信息化水平来提高医疗服务的满意度。必须指出的是,现有的智慧医疗范式绝大多数是基于射频技术,主要包括混合射频标识(RFID)、紫蜂无线局域网(ZigBee)、窄带物联网(NB-IOT)等^[1-2],此类技术必须面对功耗、干扰、可靠性等诸多问题,例如在电磁敏感的医疗环境,射频电磁辐射对医疗设备及仪器的潜在电磁干扰易造成新的医疗风险。与此同时,射频电波固有的穿透性传播特性造成了安全性上的不足,客观上为敏感医疗数据留下了泄露隐患。此外,由于长期暴露于射频信号对人体的影响尚未明确,用户友好度也制约了此类智慧医疗技术的进一步发展^[1-2]。

针对上述问题,无线光技术作为一类互补性解决方案受到了广泛的关注和讨论^[3-4]。通过利用红外或可见光波来承载无线数据,从根本上避免了其对医疗电子设备的干扰。目前,发光二极管(LED)光源已经广泛安装于城市(包括多样医疗场所)的各个角落,主要用于提供基础照明。相对于传统白炽灯和荧光灯,LED光源在使用寿命、能耗水平、显色指数等方面都有更为出色的表现,正逐步主导整个通用照明领域。其自身具备加载信息的特性,使其有潜力成为天然的光接入点(或者叫光发射器),为用户提供无线接入和位置信息服务^[5-7]。

与此同时,基于泛在LED基础设施的无线光通信及定位技术获得持续地关注和研究。不同于射频类技术,无线光链路不会被多径衰落效应所影响。这一类无线光通信及定位技术可以利用已有的LED基础设施,对改造的成本以及能耗水平要求相对较低;其使用光波作为信息载波,仅在高速传输时会受到多径弥散的影响,不会与传统基于射频的一系列技术产生干扰;光域频谱资源丰富,有利

于实现高速业务传输;无需频谱注册,客观上降低了技术推广的成本^[6-7]。

目前,国际上对无线光通信及定位技术的研究与其产业化、标准化的工作正在活跃地进行当中。众多研究团队结合各自观点分别论述了实现无线光通信,特别是可见光通信(VLC)的关键使能技术,主要包括均衡技术、离散多音频调制技术、光多输入多输出技术、波分复用等,其中,均衡技术又可以细分为接收端后均衡技术、发射端预均衡技术,光多输入多输出技术则可以依据是否使用成像技术分为非成像多输入多输出系统、成像多输入多输出系统。与此同时,无线光定位特别是可见光定位技术,按照定位原理的基础性差异主要分为基于接收光信号强度定位方案、基于接收信号角度定位方案、基于接收信号时间差定位方案、基于信号指纹定位方案等。不同于上述研究工作关注通用无线光技术,本文则聚焦无线光技术在医疗领域、医疗场景的特色进展、原型及展望。对于上文提及的已被广泛讨论的通用无线光通信及定位技术不再进行重复性阐述。近几年,国际上针对医疗领域无线光技术的研究也逐步深入^[8-20]。传统基于视频的医疗无线技术必须面对来自射频频谱拥挤、潜在干扰、数据安全及隐私保护等诸多方面的挑战。已有研究显示,射频类技术可能对医院敏感装置造成潜在干扰,人体特别是患者长期暴露于射频电磁场中也会有一定的风险,因而应该控制其使用的范围和强度。医疗无线光则聚焦探索使用红外光、可见光等潜在频谱资源,并从丰富的免注册频谱资源中获益。由于光线无法穿过墙壁或不透明的物体,因而医疗无线光技术可以增强室内通信的保密性和安全性。在医疗体域网领域,增加无线光链路的使用可以减小甚至消除传统射频干扰的强度和范围。具体地,包括法国里默斯大学、美国普林斯顿大学、韩国釜庆国立大学、清华大学在内的高校提出了诸多针对性的方案设计。在已构想的未来医疗场景中,患者的康复数据和生物医学信号借助上行无线光链路上传至医疗有线网络,并最终被保存于医疗服务器的数据库中,而医务人员可以不受空间位置

的约束,通过无线光下行链路获取患者的实时医疗信息,如图 1 所示。结合医疗领域无线光技术研究态势,本文将从医疗无线光有源链路、医疗无线光

无源链路、医疗无线光中继链路、医疗无线光原型实验这些方面进行了梳理。进而阐述当前的主要技术挑战与潜在解决方案。

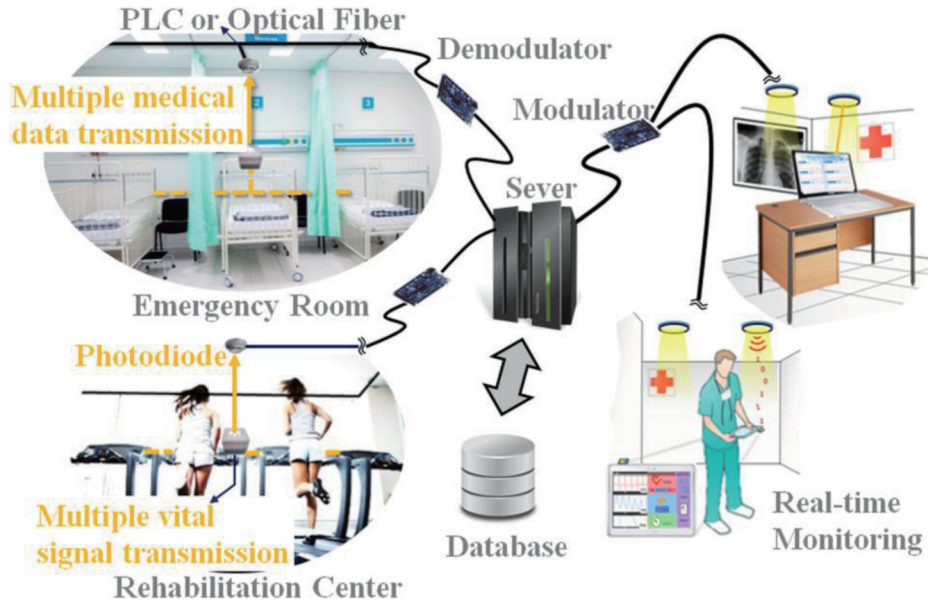


图 1 无线光技术在医疗保健领域多样化潜在应用^[8]

Fig. 1 Diverse potential applications of wireless optical techniques in healthcare domain^[8]

2 医疗无线光技术主要研究进展

2.1 医疗无线光有源链路

对医疗无线光链路特性研究是设计改进医疗无线光技术方案的基础性工作。通常来说,无线光传输链路可以分为两大类,分别是有源链路和无源链路。对于医疗无线光有源链路来说,经常需要借助光发射将人体传感器检测到的测量信号发送到光接收端^[9-16];而无源链路则不受上述发端配置约束^[17-20]。基于有源无线光链路医疗系统的典型配置为配有医学传感器的无线光发射器被固定于患者身体的某一适宜部位,一般选择头部、上臂等受链路遮挡影响更小的部位(图 2)^[10];在接收端,光接收器通常被固定于医疗场景的高处,一般选取天花板的中心位置,同时将光接收器的法向设定为朝下指向地面。不同于传统的无线光链路,医疗无线光链路主要用于传输患者的血压、心率、体温等生理信号,业务速率一般 kb/s 至几 Mb/s 数量级,因而对传输带宽要求并不高,但是要实现对患者生理数据的实时监测,同时最大限度地支持患者的移动性,这就对链路的强壮性提出了很高的要求。

法国利摩日大学的研究人员长期致力于将医疗无线光链路特性的探索性工作。研究人员对体域网

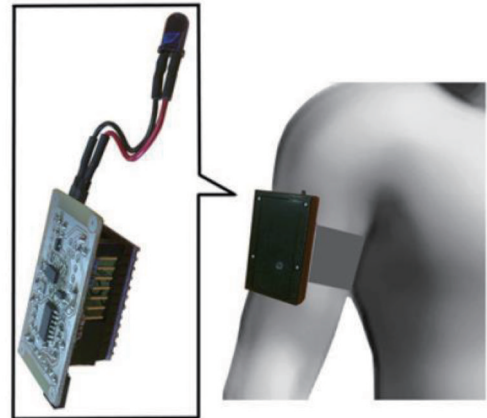


图 2 典型的穿戴式无线光技术医疗监测装置^[10]

Fig. 2 Typical wearable wireless optical healthcare monitoring device^[10]

(BAN)场景无线光有源链路表现进行评估,考虑了 BAN 发射器节点及患者自身移动性对方案性能的影响,构建了考虑室内环境反射路径的漫射光传输方案。量化研究结果显示在低速率(低于 1 Mb/s)医疗 BAN 场景下,即便障碍物的尺寸与患者身体相当,单一障碍物的存在对链路表现不会产生显著影响。然而,随着障碍物尺寸的增加以及进一步考虑障碍物的移动性,链路中断概率表现将会发生明显变化。此类变化可能提高也可能劣化链路的传输表

现,这意味着对房间环境因素光学特性的充分了解,应成为方案设计的重要组成。此项研究展示了借助漫射无线光有源链路构建BAN的潜力。

为了进一步地评估房间的物理及几何参数对下行无线光链路的影响,研究人员分析了移动用户在限定环境下的下行无线光有源链路的特性。具体讨论了环境表面光学特性、不同人体尺寸、房间陈设尺寸以及建模细节精细化程度对建模结果的

影响,如图3所示。通过替换墙体、地面及天花板表面材料特性,并对不同墙面设定下对1089个随机接收位置处的无线光信道增益进行统计分析,数值分析显示材料反射率越高,所引入的链路增益越高,并且胶木或涂漆木质墙面所引入的链路增益水平比深色漆木墙面的链路增益高达8 dB。然而,不同地面材质配置下最大链路增益之差仅为3 dB,不同天花板材料对链路增益的影响则极为有限。

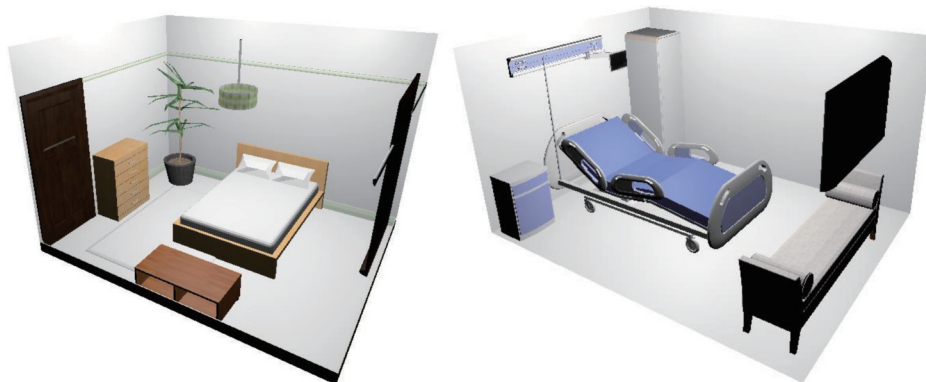


图3 有源无线光链路场景展示^[16]

Fig. 3 Illustration of scenes with active wireless optical link^[16]

为进一步评估医疗场景几何细节对链路增益的影响,研究人员分别通过二维基本模型和三维完全模型对无线光体域链路条件下的人体进行模拟,

如图4^[16]所示。结果显示,空置场景以及非空场景下链路增益差别主要归因于人体的影响。此外,借助三维完全模型对人体进行模拟对分析结果的准

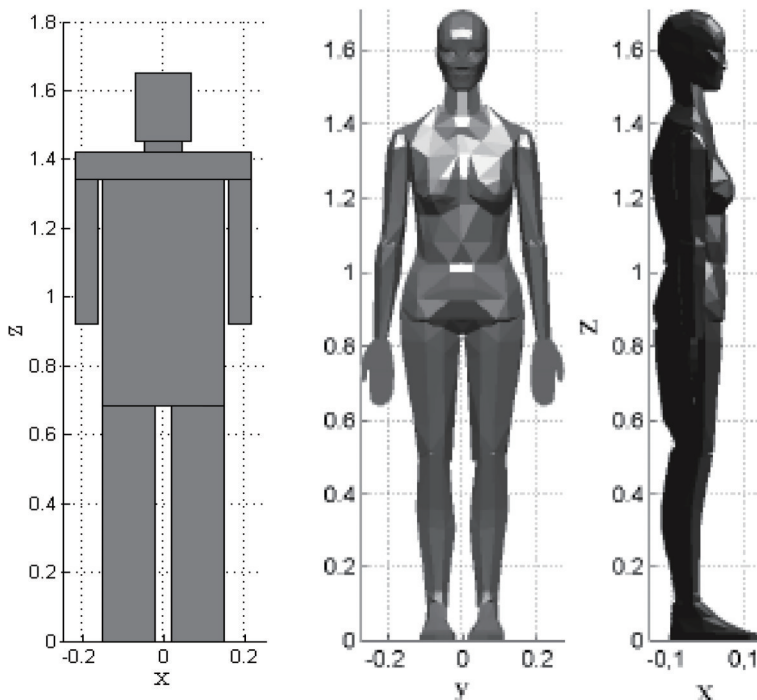


图4 无线光体域链路人体模型。(a)二维基本模型(8个面);(b)三维完全模型(1796个面)^[16]

Fig. 4 Human body models in wireless optical body area link. (a) Two-dimensional basic model (8 faces); (b) three-dimensional full model (1796 faces)^[16]

确性有重要影响,借助二维简化建模将会高估传输的表现。因此,当场景中包含大尺寸物体时,基础几何建模方法不足以支撑信道行为的充分估计。

2.2 医疗无线光无源链路

不同于无线光有源链路,无源链路需要借助调制逆反射器将数据信息加载到外来光信号里,并将

光信号按照原路径反射回去。研究人员提出了一种 RFID 及无线光无源链路的传输方案^[19]。在该方案中,根据所传送信息的保密性及重要性水平,RFID 标签通过无线光无源链路传输高保密信息,而将剩余信息通过传统 RFID 链路进行传输,如图 5 所示。

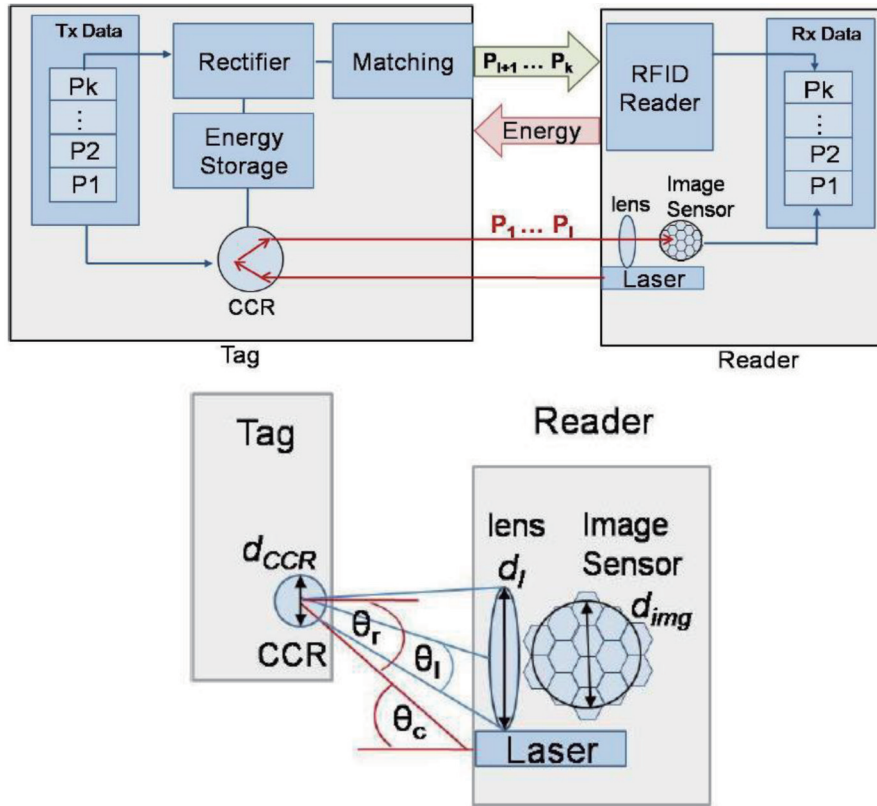


图 5 RFID 及无线光无源链路的传输方案。(a)混合 RFID-OWC 系统模型;(b)标签及阅读器的位置关系^[19]
Fig. 5 RFID and wireless optical passive link transmission scheme. (a) Hybrid RFID-OWC system model; (b) position relationship of tag and reader^[19]

上述方案中的调制逆反射类型为角锥逆反射器(CCR)。分析结果显示,借助应用射频(RF)能量获取及 CCR 可以显著改善 RFID 系统的整体能耗。此外,借助无线光无源链路传输保密信息可以切实增强系统的安全性,适于传输敏感或重要的个人信息。

通过借鉴上述方案,泰国国立法政大学的研究人员进一步提出了一种利用室内无线光及薄膜 CCR 的健康监测系统。在该方案中,患者所配传感器首先测得健康监测数据,由薄膜 CCR 完成对该数据的调制,并将调制后的光信号反射到接收端的图像传感器,进而通过有线网络传递至健康监测系统的中心节点及医疗中心。该系统架构的整体架构由三部分构成,包括健康监测部分、中心节点部分

以及医疗服务部分,如图 6 所示。上述方案适用于多种健康监测应用并保证高级别的医疗服务保密性与安全性。此外,通过上述无源链路配置可以在低功耗水平下满足信噪比(SNR)需求。

2.3 医疗无线光中继链路

为了解决医疗场景下室外宏基站的弱覆盖问题,必须提出针对性方案延伸室外信号覆盖,同时避免对已有医疗设备引入干扰。日本早稻田大学的研究团队提出了一种适用于医疗通信的无线光中继方案^[21-23]。不同于传统中继方案,该中继方案在中继站与移动终端之间通过无线光链路进行信号传递。对于配有众多敏感医疗仪表的医疗机构来说,该中继方案在保持通信便利性的同时,提供了更加安全的信号传播环境,如图 7 所示。由于使用强度调制直接

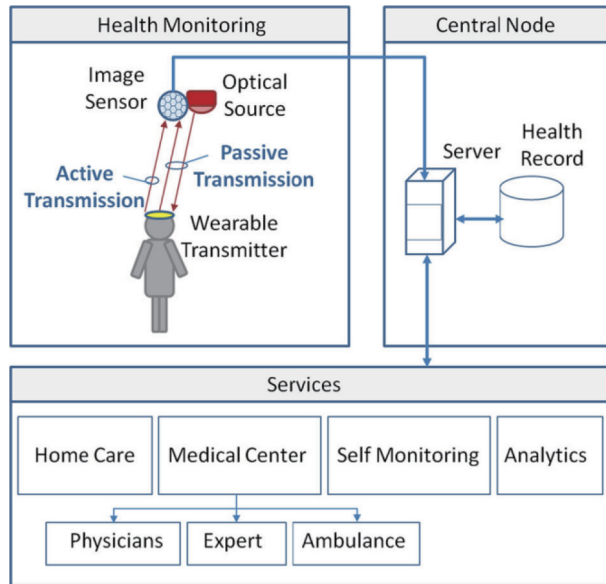


图 6 混合无源与有源无线光健康监测系统架构^[17]
 Fig. 6 Hybrid passive-active wireless optical health monitoring system architecture^[17]

检测的光调制设计,获得了尽可能低的系统造价。仿真结果显示,平均光接收功率高于 -25 dBm ,可作为面向未来普惠式医疗通信系统的候选方案。

作为上述工作的延伸,研究人员进一步提出了多重分布式无线光中继链路,从而确保在无线光收

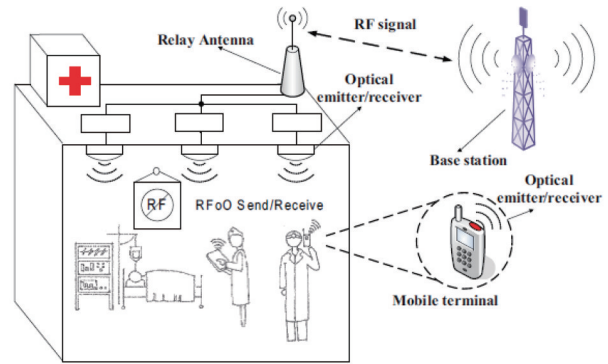


图 7 无线光中继链路在 RF 敏感环境的应用^[23]
 Fig. 7 Applications of wireless optical relay link in RF sensitive environment^[23]

发器之间至少有一条可用链^[21-23]。不同于传统中继方案,此方案借助最大比传输(MRT)技术对中继器捕获的射频信号进行相移预调整,进而实现信号功率增强、空间分集,最大限度地避免潜在视线(LOS)路径遮挡。

此外,考虑到需要面对射频及无线光两部分链路的复杂传播特性,印度的研究人员在上述无线光中继通信系统中在中继节点引入了放大转发机制,如图 8 所示。仿真结果显示,上述方案可以显著提高无线光中继系统的中断概率。

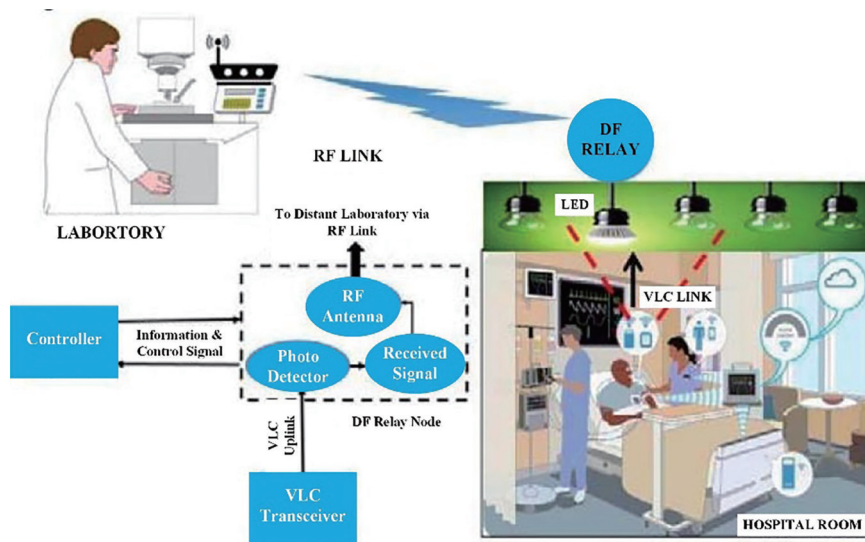


图 8 基于放大转发中继链路的医疗无线光通信系统^[21-23]
 Fig. 8 Healthcare wireless optical communication system based on amplification and forward relay link^[21-23]

2.4 医疗无线光原型实验

在性能验证方面,国内外的研究人员积极开展了医疗无线光原型实验的相关工作^[24-38]。韩国釜庆国立大学的研究人员成功展示借助白光 LED 光源传输心电图(ECG)信号。通过佩戴在衬衫上的

ECG 传感器结合导电织物来获取 ECG 信号,具体的采样率为 100 Hz 。然后,ECG 信号被传送到微控制器的模数转换模块,进而被调制馈送到发送模块的 LED,如图 9 所示。实验结果显示,在不使用聚光透镜下,传输距离可达 0.5 m ,传输速率为 56 kb/s ,

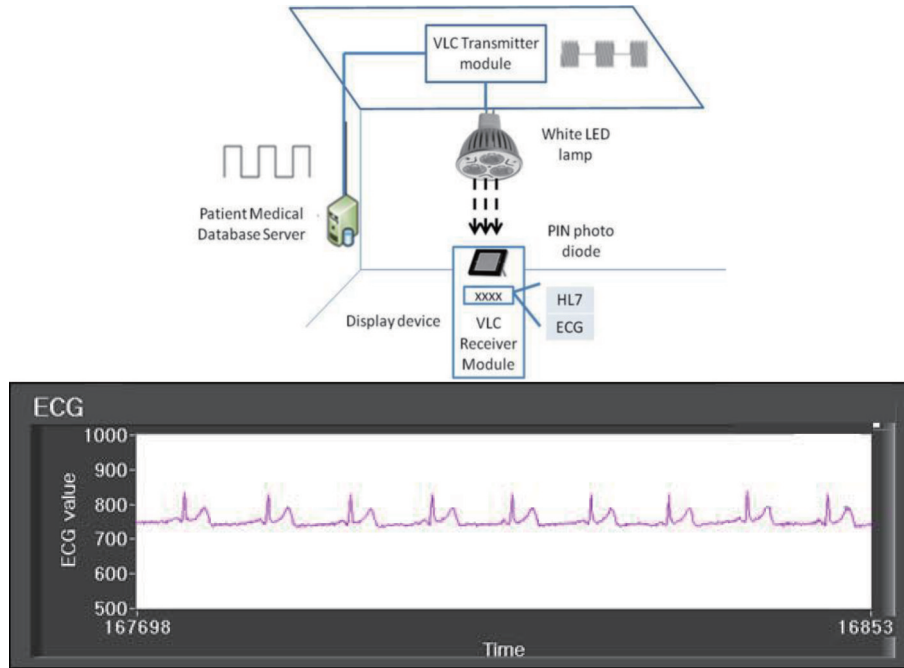


图9 医疗VLC系统^[36]。(a)医疗环境中使用LED装置的室内VLC系统架构;(b)通过VLC医学信息系统接收的ECG信号
Fig. 9 Medical VLC system^[36]. (a) Architecture of indoor VLC system in a hospital environment using LED devices; (b) ECG signal received via VLC medical information system

而误比特率(BER)水平保持在 10^{-6} 。

在上述实验性工作基础上,该团队进一步给出了单一可见光源的综合健康监测系统,如图10所示。该系统的设计预期是同时发送三种不同类别的健康信息,具体包括ECG、血压信号以及卫生信息交换标准7(HL7)文本信息。实验结果显示,在实验环境照明光源全部点亮条件下,系统的数据传输速率达到2.5 kb/s,光源的功耗水平为1 W,传输距离为1 m。此外,研究人员发现通过动态调整发送数据包的大小,可以降低接收数据的丢包率(PER)。

在长距离健康信息监测方面,韩国釜庆国立大学研究团队给出了基于稀疏码分多址(SCMA)的实验原型系统^[8]。SCMA被用来实时传递多路医疗数据。根据非正交码本,多用户数据被展宽至时域码片,最终通过单一LED光源同时发送出去。在接收端,通过单一光电二极管(PD)完成VLC光信号的监测,进而借助消息传递算法(MPA)将不同用户的数据分离出来,最终经重新安排给用户接口。实验结果显示,该原型系统能够同时传递6路不同的医疗数据,传输距离可达5 m,误帧率可以降低至 10^{-5} 。因此,该方案能够满足心电图、体温等数据的传输需求,适用于新生儿监护以及紧急病患监护等应用场景。

在脑电图(EEG)数据的实时检测传输上,研究

人员也已开启了针对性的实验性研究工作。传统的无线穿戴式EEG检测系统通常是基于射频技术,需要将使用者的脑部长期置于微波辐射之下,很可能引起人体生理机能改变,甚至诱发脑部癌症、脑部肿瘤、白血病等病变^[24,39-40]。相应地,研究人员提出了基于可见光无线通信的穿戴式EEG监测系统,具体如图11^[24]所示。在该系统中,头戴式监测部分包含三个电极来获取使用者的实时EEG信号,进而通过发射端的微处理单元将开关键控(OOK)调制后的数据信号加载到LED光源;接收端借助聚焦透镜,将更多的能量收集到智能手机的图像传感器,进而通过图像帧处理技术及OOK解调技术将源端的EEG数据还原处理。初步的实验显示,该系统可以实现长达450 cm距离的无差错传输,传输速率可达2.4 kb/s,对应的光照度水平为327.84 lx。此外,扰动测试显示接收端使用者引入的智能手机微小抖动并不会影响所接收的数据结果。

与此同时,医疗场所空气质量检测问题也得到了医疗无线光研究者的关注。目前,空气污染已成为全球性的问题,并对全球公共健康和社会经济构成严峻威胁。在医疗场所,细颗粒物(PM_{2.5})可以诱发并加剧肺癌、哮喘、尘肺病等严峻健康问题。为了实现电磁敏感医疗场所细颗粒物监测和实时传输,研究人员提出了基于波分复用(WDM)技术的

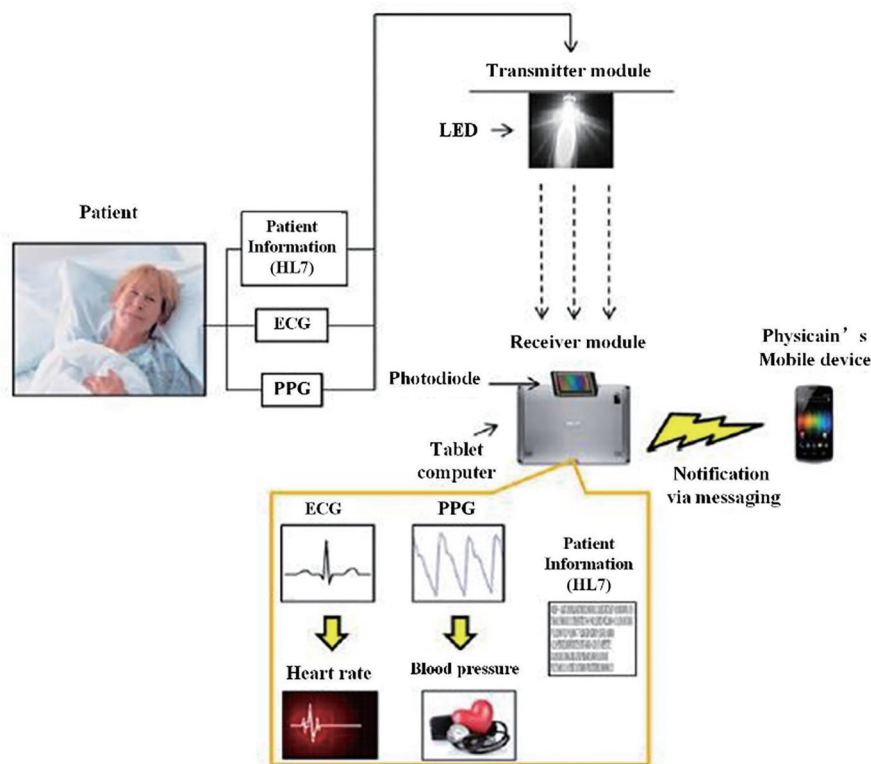


图 10 使用 VLC 传输的移动健康监测系统的系统架构^[27]

Fig. 10 System architecture of mobile health - monitoring system using VLC transmission^[27]

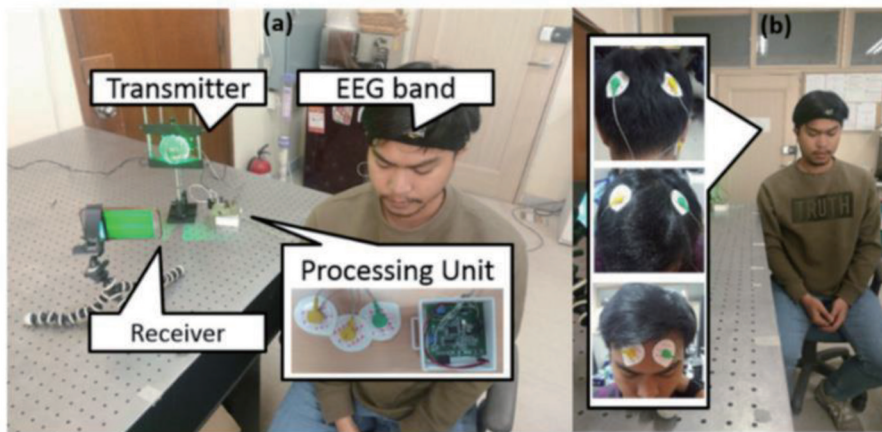


图 11 穿戴式 EEG 传输实验^[24]. (a)穿戴式 EEG 测量装置(侧视图);(b)不同电极布放方式的前视图

Fig. 11 Wearable EEG transmission experiment^[24]. (a) Wearable EEG measurement setup (side view); (b) front view with different electrode placement

PM2.5 无线光监测系统。该系统仅包括使用单一红绿蓝(RGB)三色白光 LED 以及单一颜色传感器,如图 12^[30]所示。实验结果显示,所提出的系统能够同时传递 3 种不同的环境信息,在满足可靠传错速率条件下,传输距离可以达到 11 m。可以预想,上述系统能作为未来空气质量检测系统的参考原型。

为了满足医疗场景下,用户对视频会议、视频观

察等高带宽业务切实需求,清华大学的研究团队积极地探索混合动力线回传的可见光无线视频传输系统^[33-34]。在基带带宽仅为 8 MHz 的条件下,研究人员借助正交频分复用(OFDM)技术成功实现了高于 48 Mb/s 的传输表现,并成功展示了视频信号的传输与还原。该系统的电力线部分为 50 m,无线光部分为 8 m,展现了远超已有方案的服务半径。

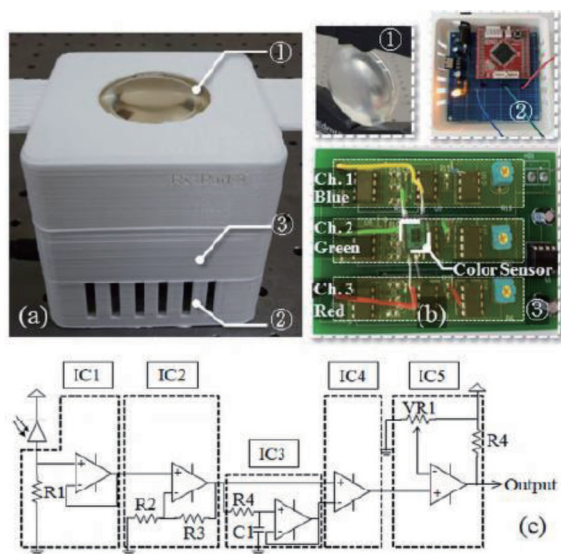


图 12 接收器原型。(a)使用三维打印机制作的接收器容器；(b)接收器模块的组件；(c)每一路颜色信道的平均电压追踪电路^[30]

Fig. 12 Prototype of receiver module. (a) Receiver container designed using three-dimensional printer; (b) components of module; (c) average voltage tracking circuit for each color channel^[30]

在植入式医学装置(IMD)的保密信号传输上,美国普林斯顿大学的研究团队借助无线光技术开展了新颖的探索。植入式装置可以在不同医学条件实现对患者的持续监测和处理,因而能极大地提高患者的生命质量。然而,各种恶意攻击以及IMD唤醒协议的不完善都可能造成IMD被恶意劫持或者其电池被恶意耗尽。研究人员提出了借助短距离无线光链路,实现智能终端与IMD之间的装置唤醒和密钥交换,如图13所示。基于安卓应用的验证



图 13 植入式装置装有嵌入式光传感器,而智能手机闪光灯作为光源^[1]

Fig. 13 IMD has an embedded light sensor and smartphone flashlight acts as a light source^[1]

实验显示,上述方案仅需很小的空间与能力开销可实现IMD安全防护能力的显著提升,在物理层面屏蔽了密钥被无察觉窃取的可能性。

3 主要研究挑战及应用前景

目前,理论及实验性工作已经初步展现了医疗无线光技术在安全性、保密性、传输容量等方面的优越性能。同时,必须清醒地认识到,现有的实验原型大多数是基于分立的光学器件构建的,与实际应用所需的紧凑型、便携性收发终端尚存在较大差距。此外,传输速率、传输距离等主要医疗无线光链路性能指标是在点对点理性静态条件下获得的,链路在各类移动状态下的表现仍缺乏实验验证。为了推动医疗无线光技术进一步发展,应该结合多光源连续覆盖、杂散光源干扰、多用户干扰、动态链路可靠性增强等方向开展针对性研究。

在空间波束维度,现有的医疗无线光通信仍然局限于朗伯光波束的研究范式。朗伯光波束的天然约束在于将大多数光信号功率集中于光源的法向方向,难以提供更为均匀的医疗无线光信号覆盖,客观上增加了链路的对准难度^[41]。实际上,LED光源厂商在通用照明领域已经提出了众多的非朗伯光波束解决方案。通过引入反射杯及自由曲面透镜,传统朗伯光波束被整形为定制旋转对称光波束,甚至非对称光波束。在后续的研究中,可以尝试将上述定制非朗伯光波束引入到医疗无线光链路的构造、设计及优化之中,从而提供更加均匀的信号覆盖,缓解链路对准的困难。

在数据保密性方面,医疗无线光技术仍缺少针对性的研究与讨论。必须指出,医疗数据传递对安全性是高度敏感的,必须给出针对性的解决方案。传统的信息安全技术高度依赖上层加密解密技术的计算复杂度。随着移动终端计算能力的快速提升,上述信息安全范式的局限性日益凸显。与此同时,物理层安全技术所谓一类全新的信息安全范式受到了广泛的关注和讨论。此类技术的基础方法论是借助无线传播的信道特性来提升通信链路的保密水平。必须指出,物理层安全研究仍很大程度局限于传统射频无线通信领域,面向医疗无线光技术的针对性研究还缺少应有的探索和研究。随着人工噪声、空间置零等物理层安全技术的引入,医疗无线光技术的信息安全水平必将获得显著的增强。

通过前文的阐述不难发现,现有的医疗无线光链路仍然很大程度上受限于单数据流的设计,缺少对空间多数据平行传输的充分引入。与传统射频无线技术类似,灵活多样的多输入多输出技术是快速提升医疗无线光吞吐能力的重要选项。不依赖传输带宽的累加,预编码、空间调制、空间复用等具体的多输入多输出技术可以有效地引入医疗无线光传输增益,克服现有单数据流设计的容量困难。

在链路可靠性方面,医疗无线光很大程度上依赖视线路径来构造传输链路,因而易受到遮挡及阴影效应的影响。在实际医疗应用场景,很难始终保持光源和接收器之间存在视线路径。一旦视线路径受到遮挡,同时漫射多径分量所提供的接收信号难以满足链路所需的信噪比水平,就会不可避免造成链路中端的发射。针对上述问题,在光发送端,可以通过增加分布式光源的数量和密度,来为用户提供重叠覆盖或冗余覆盖。在光接收端,可以借助多个不同朝向的光接收器来增加接收端的空间自由度。由于收发端不再依赖单一的视线链路,即便某条链路受到遮挡效应的影响,其他差异化备用链路仍能正常连接,从而显著改善链路整体上的可靠性。

在市场需求方面,随着全球,特别是中国老龄化以及少子化程度的加剧,社会对医疗服务需求与优质医疗资源稀缺之间的鸿沟将进一步凸显。医疗无线光技术以其无传统电磁辐射、安全性高、免电磁干扰等天然优势,必将在智慧医疗、远程医疗及居家养老等新型社会医疗养老服务体系中获得长足的发展,形成规模化的应用。

4 结束语

随着以LED为代表固态光源在基础设施领域应用的深入,基于此类光源的新兴无线光技术正与传统医疗监测技术进行着深度的融合。随着智慧医疗逐步从设想走向现实,医疗无线光技术必将取得长足的发展和应用,使其无电磁干扰、无有害辐射、保密性强、频谱资源丰富、传输容量大等诸多天然潜在优势得到充分的发挥。与此同时,必须深刻认识到医疗无线光技术在移动性、强壮性等方面的关键挑战,仍需进一步提出针对性的解决方案,从而为其在多样医疗场景的规模化应用铺平道路。

参 考 文 献

[1] Mosenia A, Jha N K. OpSecure: a secure

unidirectional optical channel for implantable medical devices[J]. IEEE Transactions on Multi-Scale Computing Systems, 2018, 4(3): 410-419.

[2] Li R L, Shang H L, Lei Y, et al. Research of key enabling technologies for high-speed visible-light communication[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(5): 050003.

李荣玲, 商慧亮, 雷雨, 等. 高速可见光通信中关键使能技术研究[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(5): 050003.

[3] Chi N, Lu X Y, Wang C, et al. High-speed visible light communication based on LED[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(3): 0300001.

迟楠, 卢星宇, 王灿, 等. 基于LED的高速可见光通信[J]. 中国激光, 2017, 44(3): 0300001.

[4] Ding C H, Zhang T. Research on health monitoring of LED lighting system[C]//2016 Prognostics and System Health Management Conference (PHM-Chengdu), October 19-21, 2016, Chengdu, China. New York: IEEE Press, 2016: 16616492.

[5] Ding J P, Chih-Lin I, Chen X F, et al. Asymmetrical emission beams based visible light communication access points design[C]//2019 28th Wireless and Optical Communications Conference (WOCC), May 9-10, 2019, Beijing, China. New York: IEEE Press, 2019: 18852031.

[6] Ding J P, Chih-Lin I, Zhang H, et al. Cells planning of VLC networks using non-circular symmetric optical beam[C]//ICC 2019-2019 IEEE International Conference on Communications (ICC), May 20-24, 2019, Shanghai, China. New York: IEEE Press, 2019: 18866347.

[7] Ding J P, I C L, Xu Z Y. Indoor optical wireless channel characteristics with distinct source radiation patterns[J]. IEEE Photonics Journal, 2016, 8(1): 1-15.

[8] An J, Chung W Y. Single-LED multichannel optical transmission with SCMA for long range health information monitoring[J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(23): 5470-5480.

[9] Chevalier L, Sahuguede S, Julien-Vergonjanne A. Optical wireless links as an alternative to radio-frequency for medical body area networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2015, 33(9): 2002-2010.

[10] Toumieux P, Chevalier L, Sahuguede S, et al. Optical wireless connected objects for healthcare[J]. Healthcare Technology Letters, 2015, 2(5): 118-122.

- [11] Behloul A, Combeau P, Sahuguède S, et al. Impact of physical and geometrical parameters on visible light communication links[C]//2017 Advances in Wireless and Optical Communications (RTUWO), November 2-3, 2017, Riga, Latvia. New York: IEEE Press, 2017: 73-76.
- [12] Torkestani S S, Julien-Vergonjanne A, Cances J P. Mobile healthcare monitoring in hospital based on diffuse optical wireless technology[C]//21st Annual IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, September 26-30, 2010, Istanbul, Turkey. New York: IEEE Press, 2010: 1055-1059.
- [13] le Bas C, Sahuguède S, Julien-Vergonjanne A, et al. Impact of receiver orientation and position on Visible Light Communication link performance[C]//2015 4th International Workshop on Optical Wireless Communications (IWOW), September 7-8, 2015, Istanbul, Turkey. New York: IEEE Press, 2015: 15649645.
- [14] Barbot N, Sahuguède S, Julien V A. Multiple access interference impact on outage probability of wireless optical CDMA systems[C]//2012 International Conference on Photonics in Switching(PS), September 11-14, 2012, Ajaccio, France. New York: IEEE Press, 2013: 13798538.
- [15] Chevalier L, Sahuguède S, Julien-Vergonjanne A, et al. Investigation of wireless optical technology for communication between on-body nodes[C]//2013 2nd International Workshop on Optical Wireless Communications (IWOW), October 21-21, 2013, Newcastle Upon Tyne, UK. New York: IEEE Press, 2013: 79-83.
- [16] le Bas C, Sahuguède S, Julien-Vergonjanne A, et al. Human body impact on mobile visible light communication link[C]//2016 10th International Symposium on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing (CSNDSP), July 20-22, 2016, Prague, Czech Republic. New York: IEEE Press, 2016: 16321548.
- [17] Noonpakdee W. Hybrid passive-active optical wireless transmission for health monitoring system [J]. Wireless Personal Communications, 2016, 86 (4): 1899-1911.
- [18] Noonpakdee W. Adaptive wireless optical transmission scheme for health monitoring system [C]//2013 IEEE Third International Conference on Consumer Electronics Berlin (ICCE-Berlin), September 9-11, 2013, Berlin, Germany. New York: IEEE Press, 2013: 161-164.
- [19] Noonpakdee W, Liu J, Shimamoto S. Hybrid RFID-OVC with an adaptive priority transmission scheme [J]. International Journal of Computer Networks & Communications, 2011, 3(5): 135-147.
- [20] Noonpakdee W. Performance analysis of passive: active optical wireless transmission for personal health monitoring[C]//2014 Sixth International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN), July 8-11, 2014, Shanghai, China. New York: IEEE Press, 2014: 17-21.
- [21] Liu J, Takano H, Shimamoto S. An optical IM/DD channel based relay scheme for indoor healthcare communication system[C]//2009 6th IEEE Consumer Communications and Networking Conference, January 10-13, 2009, Las Vegas, NV, USA. New York: IEEE Press, 2009: 10474810.
- [22] Liu J, Takano H, Shimamoto S. An optical IM/DD based spatial transmission diversity achievable relay scheme[C]//2009 IEEE Wireless Communications and Networking Conference, April 5-8, 2009, Budapest, Hungary. New York: IEEE Press, 2009: 10646361.
- [23] Liu J, Noonpakdee W, Takano H, et al. A novel RF signal beamforming scheme over optical wireless communications[C]//2011 International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS), May 11-13, 2011, Santa Monica, CA, USA. New York: IEEE Press, 2011: 346-350.
- [24] Rachim V P, Jiang Y B, Lee H S, et al. Demonstration of long-distance hazard-free wearable EEG monitoring system using mobile phone visible light communication[J]. Optics Express, 2017, 25 (2): 713-719.
- [25] An J, Pham N Q, Chung W Y. Multiple bio-monitoring system using visible light for electromagnetic-wave free indoor healthcare[J]. Optics Communications, 2017, 405: 107-113.
- [26] An J, Chung W Y. A novel indoor healthcare with time hopping-based visible light communication[C]//2016 IEEE 3rd World Forum on Internet of Things (WF-IoT), December 12-14, 2016, Reston, VA, USA. New York: IEEE Press, 2016: 19-23.
- [27] Tan Y Y, Chung W Y. Mobile health-monitoring system through visible light communication[J]. Bio-Medical Materials and Engineering, 2014, 24(6): 3529-3538.

- [28] An J, Chung W Y. Wavelength-division multiplexing optical transmission for EMI-free indoor fine particulate matter monitoring[J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 74885-74894.
- [29] Dhatchayeny D R, Sewaiwar A, Tiwari S V, et al. Experimental biomedical EEG signal transmission using VLC[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2015, 15(10): 5386-5387.
- [30] Adiono T, Armansyah R F, Salman A H, et al. Design and implementation of analog transceiver circuit for patient monitoring system based on OWC [C]//2018 International Conference on Electrical Engineering and Computer Science (ICECOS), October 2-4, 2018, Pangkal, Indonesia. New York: IEEE Press, 2018: 63-68.
- [31] Ding W B, Yang F, Yang H, et al. A hybrid power line and visible light communication system for indoor hospital applications[J]. *Computers in Industry*, 2015, 68: 170-178.
- [32] Jian S, Ding W B, Yang F, et al. Indoor hospital communication systems: an integrated solution based on power line and visible light communication[C]//2014 IEEE Faible Tension Faible Consommation, May 4-6, 2014, Monaco, Monaco. New York: IEEE Press, 2014: 14382947.
- [33] Qi X X, Du L, Wang S Z, et al. Design of the indoor positioning glasses for the blind based on the LiFi technology[C]//2018 IEEE 4th International Conference on Computer and Communications (ICCC), December 7-10, 2018, Chengdu, China. New York: IEEE Press, 2018: 744-747.
- [34] Pravin M, Sundararajan T V P. VLC based indoor blind navigation system[C]//2018 9th International Conference on Computing, Communication and Networking Technologies (ICCCNT), July 10-12, 2018, Bengaluru, India. New York: IEEE Press, 2018: 18182211.
- [35] Mariya I A, Ettiyil A G, George A, et al. Li-Fi based blind indoor navigation system[C]//2019 5th International Conference on Advanced Computing & Communication Systems (ICACCS), March 15-16, 2019, Coimbatore, India. New York: IEEE Press, 2019: 675-677.
- [36] Cheong Y K, Ng X W, Chung W Y. Hazardless biomedical sensing data transmission using VLC[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2013, 13(9): 3347-3348.
- [37] Al-Qahtani A, Al-Hajri H, Al-Kuwari S, et al. A non-invasive remote health monitoring system using visible light communication[C]//2015 2nd International Symposium on Future Information and Communication Technologies for Ubiquitous HealthCare (Ubi-HealthTech), May 28-30, 2015, Beijing, China. New York: IEEE Press, 2015: 15367092.
- [38] Cahyadi W A, Jeong T I, Kim Y H, et al. Patient monitoring using visible light uplink data transmission [C]//2015 International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems (ISPACS), November 9-12, 2015, Nusa Dua Bali, Indonesia. New York: IEEE Press, 2015: 431-434.
- [39] Lai H. Research on the neurological effects of nonionizing radiation at the university of Washington [J]. *Bioelectromagnetics*, 1992, 13(6): 513-526.
- [40] Wust P, Kortüm B, Strauss U, et al. Non-thermal effects of radiofrequency electromagnetic fields[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 13488.
- [41] Ding J P, Yi Z L, Wang J T, et al. Analysis of light-emitting diodes spatial beam effect in visible light positioning system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(5): 0523001.
- 丁举鹏, 易芝玲, 王劲涛, 等. 可见光定位系统中发光二极管的空间波束效应分析[J]. *光学学报*, 2021, 41(5): 0523001.