

紫外光非直视通信抗干扰中继链路方法及其功率需求分析

李济波¹ 吴晓军¹ 王红星^{1,2} 李笔锋¹ 刘传辉¹

¹海军航空工程学院电子信息工程系, 山东 烟台 264001

²山东省信号与信息处理重点实验室, 山东 烟台 264001

摘要 针对紫外光通信中光源器件发射功率受限和大气信道衰减严重造成传输距离近的问题,提出一种用于非直视通信的抗干扰中继链路方法。该方法采用多跳网络方式在端到端传送节点间构建中继通信链路,通过时分复用技术给相邻节点分配不同时间隙防止节点的相互干扰;同时,对节点直接传送信息和采用中继链路方法接力转发信息两种不同方式的功率需求进行了分析。仿真表明,采用的中继链路方法在传输相同通信距离时减少了单个节点的发射功率及系统总功率,提高了系统功率利用率,有利于重量轻、低功耗需求的节点部署实施。

关键词 光通信; 紫外光通信; 多跳网络; 中继链路; 功率计算

中图分类号 TN929.12

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.030601

Anti-Interference Relayed Link Method and Power Requirement Analysis for Ultraviolet Non-Line-of-Sight Communication

Li Jibo¹ Wu Xiaojun¹ Wang Hongxing^{1,2} Li Bifeng¹ Liu Chuanhui¹

¹Department of Electronic Engineering, Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai, Shandong 264001, China

²Key Laboratory of Shandong Province on Signal and Information Processing, Yantai, Shandong 264001, China

Abstract To address the short distance transmission problem of ultraviolet communication for the power restriction with optical source device and the severe attenuation with atmospheric channel, an anti-interference relayed link method for ultraviolet non-line-of-sight communication is proposed. The relayed communication link is built in the transmission node from end point to end point by adopting multihop network structure, and the time division multiplexing technology is used to avoid possible interference from neighboring nodes distributed the different slots. At the same time, the power requirements of different communication styles both direct transmission information and relayed link retransmission information are analysed. The simulation analysis indicates that this method can decrease power for not only single node but also the system in the same transmission range, so the power utilization ratio is raised. Light weight nodes with low power consumption are shown to be feasible to implement and deploy.

Key words optical communications; ultraviolet communication; multihop network; relayed link; power calculation

OCIS codes 060.4510; 060.4250; 040.7190

1 引言

波长位于200~280 nm的紫外光(UV)由于大气平流层中臭氧的强吸收特性,使得在大气中传输具有极低的背景光干扰(一般太阳背景低于 10^{-13} W/m²),所以被称为日盲区^[1]。又由于大气中存在大量的粒子,使得UV在传输过程中存在较大的散射现象,这种散射特性让UV通信系统可以非直视(NLOS)传输信号,从而

收稿日期: 2014-09-01; 收到修改稿日期: 2014-10-10; 网络出版日期: 2015-02-03

基金项目: 山东省“泰山学者”建设工程专项经费资助项目(ts20081330)、山东省自然科学基金青年基金(ZR2013FQ010)

作者简介: 李济波(1990—),男,硕士研究生,主要从事紫外光通信组网方面的研究。E-mail: demigod18@163.com

导师简介: 王红星(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事光通信、现代通信新技术等方面的研究。

E-mail: 13371368601@189.com

能适应复杂的地形环境,克服一般自由空间光(FSO)通信系统必须以直视(LOS)方式工作的不足^[2]。因而,UV通信具有抗干扰能力强、非直视和全天候工作的优点,并且,它的路径损耗高、传输距离近特性还使其具有高隐蔽性的特点^[3-4]。

然而,UV NLOS通信在具有高路径损耗特点的同时也意味着对设计通信系统所需要的辐射距离和传输速率性能有更高的要求。通常情况下,直接增大发射功率是最常用的也是延长通信范围最直接的方法,但是UV通信必须考虑人眼安全的规定,另一方面对收发机轻装简洁的应用需求也使得大幅度提高发射功率变得不现实,而现有的一些供应器件如发光二极管(LED)^[5-6]、雪崩光电二极管(APD)^[7]、光电倍增管(PMT)^[8],也都无法满足大功率的需求。因此,通过增大器件发射功率来延伸通信距离的方法不可行。

既然无法直接在发射功率上增加通信距离,于是人们想到用网络的方法来间接提升。无线 Mesh 网络在UV通信中的应用近年就有很多研究^[9],不足的是大部分都假设在LOS前提条件下,在信道衰减方面又繁琐地考虑了湍流因素。事实上,UV通信的特点是传输距离近(一般为几十米到几百米),具有非直视性能,而湍流影响在几百米通信范围内是可以忽略不计的^[10]。

综上所述,本文以延长通信距离和减少发射功率为目的提出了一种用于紫外光非直视通信的抗干扰中继链路方法,该方法在端到端节点间采用多跳技术构建中继通信链路,利用节点间的转发信息来延长通信距离,采用了时分技术给邻近节点分配不同时隙降低光互扰问题对通信的影响,随后对节点直接传送信息和采用中继链路方法接力转发信息两种不同方式的功率需求进行了分析,结果表明,采用中继链路方法在传输相同通信距离时,通过增加转发节点数可以降低对单个节点及系统的功率需求,有利于重量轻、低功耗需求的节点部署实施,为下一步进行UV通信组网提供了依据。

2 UV NLOS通信系统抗干扰中继链路方法

2.1 构造UV NLOS通信中继链路

假设两个节点相距为 d ,给定设备可提供的发送功率为 P 时满足需求条件下能够覆盖的通信距离为 r ,当 $r < d$ 时,即节点发送功率辐射范围达不到两个节点的相距距离,那么S端节点和D端节点无法进行有效通信,如图1所示。

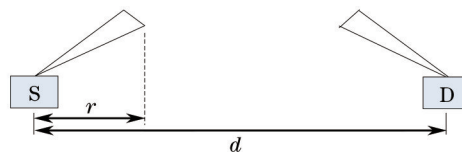


图1 紫外光非直视通信直接链路

Fig.1 UV NLOS communication straight link

在这种情况下要完成通信,一般方法就是通过增大节点发射功率,延长通信距离,但是经过上面分析,由于种种原因,这种方法在UV通信中不可取。针对这个问题,本文提出在S端节点到D端节点间采用多跳技术构建中继通信链路,利用 R_1, \dots, R_n 节点间的转发信息来延长通信距离,拓扑结构在UV NLOS通信链路中应用情景如图2所示。

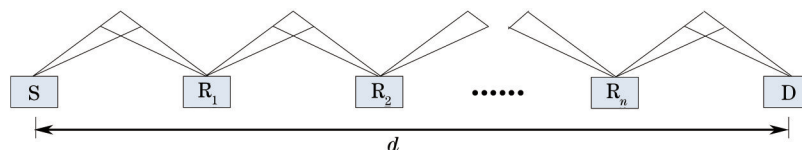


图2 紫外光非直视通信多跳链路

Fig.2 UV NLOS communication multihop link

系统链路中的所有节点均采用直接强度调制(IM/DD),具有相同的收发能力,S端节点经过 R_1, \dots, R_n 等中继节点的转发信息最后到达目的端节点D,如图2所示。通过构造中继链路可由 $N+1$ 个节点将相距为 d 的路程分成 N 段,在满足 $\frac{d}{N} < r$ 时,就能确保信息能够顺利从S传递到D,以增加中继节点数为代价获取传输距离的延伸性和确保通信的完整可靠性。

但是构造这样一个中继链路在具有上述优势的同时,由于同步传输中每一个节点都在发送信息,故需要解决由此带来的链路光互扰问题。

2.2 时分复用技术提升链路的抗干扰性能

由于UV的散射特性通信,多跳链路上的中继节点不仅能接收上一个节点的信息,还能接收前几个节点的余留信息,影响着通信性能,而影响程度的大小则根据节点距离的远近来定,距离越近,残留功率越强,干扰也就越大,如图3所示。

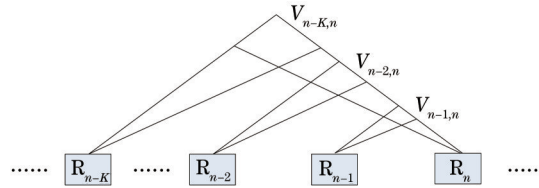


图3 紫外光非直视通信多跳链路光干扰

Fig.3 UV NLOS communication multihop link with optical interference

为了消除上述所说链路节点同时发送信息带来的干扰问题,采用时分复用技术是个不错的选择。在时分复用中,给邻近的几个节点分配不同的时隙,分得不同时隙的节点可以根据规定在相对应时间内有序发送信息,避免了同时发送信息带来的干扰。再结合UV在大气中传输衰减严重、通信距离受限的特点,让相距较远的节点重复使用前面的时隙,既能避免近距离节点使用同一时隙带来的干扰问题,又能解决时分技术中时隙资源有限与中继链路增加节点数带来的矛盾^[11-12]。节点网络通信拓扑图如图4所示,图中,一个圆圈表示网络中划分的一个小区,黑点 u_1 、 u_2 、 u_3 、 u_4 表示小区内的中心节点, S 端节点发送的信息经过中继节点 R_1 、 R_2 、 R_3 转发后到达目的端节点 D,通过给相邻小区内节点 S、 R_1 、 R_2 、 R_3 划分不同时隙进行信息的收发,可以有效避免链路上节点间的光互扰,不是相邻小区的节点则可以重复使用前面的时隙,具体时隙分配协议如图5所示。

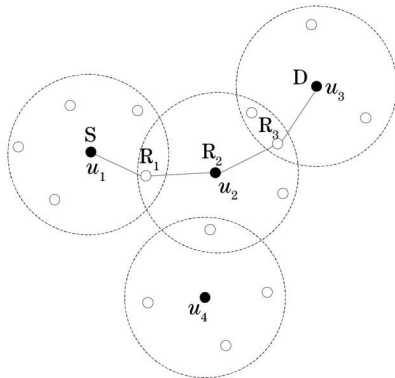


图4 中继链路通信节点拓扑

Fig.4 Relayed link topology of communication node

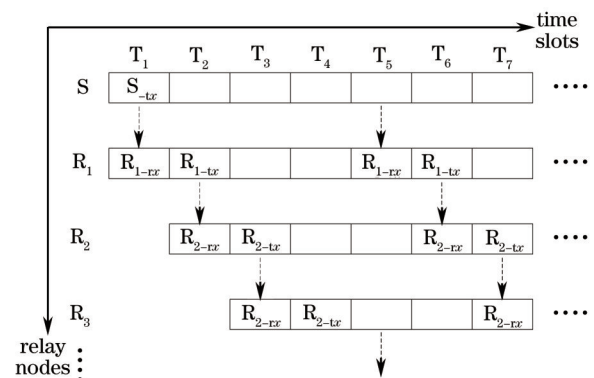


图5 多跳非直视紫外光链路收发协议

Fig.5 Transmission and receiving protocol for multihop NLOS UV link

3 UV NLOS 通信系统功率需求分析

UV NLOS 通信模型如图6所示,图中Tx、Rx表示发端和收端, θ_1 、 θ_2 表示收发仰角, ϕ_1 、 ϕ_2 表示收发半波束角,本文以收发仰角作为变量,半波束角 ϕ_1 和 ϕ_2 固定为 10° 和 30° , r 表示收发端直线距离, V 表示发射端和接收端视场角延伸的公共体积, r_1 、 r_2 表示公共体积到发端和收端的距离^[13]。

3.1 NLOS 节点直接通信功率需求分析

根据图6所示,水平距离为 r 的 a 、 b 两节点进行短距离非直视信道通信有经验路径损失公式^[14]为

$$L_{a,b} = \xi r^\alpha, \tag{1}$$

式中 ξ 是路径损失因子,跟收发仰角紧密相关; α 是路径损失指数,是收发仰角与传输距离两者共同作用的函数。参数与收发仰角的关系可通过文献[15]查询得到,作为本文研究UV NLOS通信系统路径损耗的基

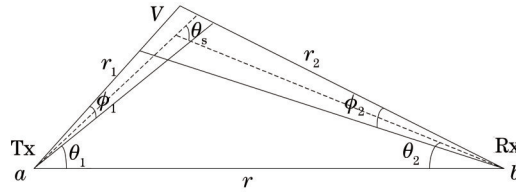


图6 紫外光非直视通信模型

Fig.6 UV NLOS communication model

础,表1摘抄了部分角度对应值。

表1 路径损耗参数 ξ 和指数 α Table 1 Path loss factor ξ and exponent α

Parameter	Value			
(θ_1, θ_2)	$(10^\circ, 10^\circ)$	$(20^\circ, 20^\circ)$	$(30^\circ, 30^\circ)$	$(40^\circ, 40^\circ)$
ξ	3.46×10^4	3.43×10^5	8.54×10^6	1.69×10^8
α	1.9697	1.9139	1.7219	1.3498

根据上面的路径损失公式和给定参数值,假设接收端光电探测器接收到瞬时光功率后统计光电子数计数速率为 λ ,且输出服从泊松分布。在节点发射功率为 P_t ,接收端功率为 P_r 时,可以得到光电子计数速率 $\lambda_s = \eta P_r / (R_b h\nu) = \eta P_t / (LR_b h\nu)$,其中 η 、 P_r 、 R_b 、 h 、 ν 、 P_t 和 L 分别为接收端滤光片和光电探测器的量子转换效率、接收功率、传输速率、Planck常量、通信光频率、发射功率和路径损失^[15]。也就是说,在给定发射功率情况下,可以通过 L 估算得到接收功率。

UV NLOS通信接收端,服从泊松分布的光电子到达速率为 λ ,在每个调制码元间隔单位脉冲时间内接收到的光电子数为 k_i ,则概率公式表示为

$$P_{k_i}(j) = \frac{\lambda^j \exp(-\lambda)}{j!}, \quad (2)$$

式中 $\lambda = \lambda_s + \lambda_b$, λ_s 为正常发光探测器接收到的光电子计数速率, λ_b 为背景辐射光电子计数速率。

从前面可知,系统构造参数 λ_s 是路径损失 L 的函数,基于阈值采用开关键控(OOK)调制方式直接探测,信号误比特率可以表示为^[16]

$$P_c = \frac{1}{2} \sum_{k=0}^{m_T} \frac{(\lambda_s + \lambda_b)^k \exp[-(\lambda_s + \lambda_b)]}{k!} + \frac{1}{2} \sum_{k=m_T+1}^{\infty} \frac{\lambda_b^k \exp(-\lambda_b)}{k!}, \quad (3)$$

式中 m_T 为最低要求误比特率时的最佳探测阈值,表达式为 $m_T = \frac{\lambda_s}{\ln(1 + \lambda_s/\lambda_b)}$ 。当信道中背景辐射噪声很小且经过滤光片后可忽略,即 $\lambda_b = 0$ 时,最佳阈值 $m_T = 0$,此时(3)式可以写为

$$P_c = \frac{1}{2} \exp(-\lambda_s). \quad (4)$$

将 λ_s 表达式代入(4)式中,可得到端节点距离为 d 时直接通信需要的发送功率表达式:

$$P_{DT} = -\xi d^\alpha h\nu R_b \ln(2P_c) / \eta. \quad (5)$$

根据(5)式所示,给出误比特率、传输速率和通信距离等性能指标就可以估算出需要的发射功率大小。例如,要求 $P_c = 10^{-4}$, $d = 100$ m, $R_b = 32$ kb/s,在收发仰角为 30° 时需要的发送功率能到几百毫瓦,根据现有的UV LED器件技术水平、日盲滤光片产品和探测器工作效率来看,还无法提供这么大功率的UV LED阵列及成套的通信系统实现。

3.2 NLOS中继链路通信的功率需求分析

为利于比较,不论是采用直通方式还是链路中继方式的两个端节点完成信息传输任务,达到要求的系统误比特率均为 P_{cMH} ,假设单个节点传送信息的误比特率为 P_c ,那么对于直接通信的两个节点来说,系统误比特率等于节点误比特率,即 $P_{cMH} = P_c$ 。对UV NLOS中继链路通信而言,在每个节点具有相同的解码和转发功能条件下,可以得到系统总误比特率

$$P_{cMH} = 1 - \prod_{n=1}^N (1 - P_{cn}) = 1 - (1 - P_c)^N, \quad (6)$$

式中 P_m 为第 n 跳节点的分段误差概率。为了便于功率需求的直观分析,将(6)式转换为发射功率的表达式,追求精确解情况下应把(3)式代入(6)式,但是结果中包含了求和计算,不够简洁明了,并且日盲波段 UV 具有非常低的背景辐射,文献[17]指出即使在太阳光强烈的白天,经过大气吸收的背景辐射也不会超过 10^{-13} W/m^2 ,因此,可以将忽略了背景辐射干扰的简化(4)式代入(6)式。在端节点间水平距离为 d 时,经过 N 段多跳中继链路可以将节点与节点间的通信距离缩短为 d/N ,相应的,在信息传输中,与直通方式相比,也带来了增加 N 倍传输时延,则可以得到中继链路上每个节点覆盖 d/N 范围需要的发射功率计算式为

$$P_m = -N^{-\alpha} \frac{R_b \xi h v d^\alpha}{\eta} \ln[2 - 2(1 - P_e)^{1/N}]. \quad (7)$$

通过(7)式,整个链路的功率需求即为 N 段节点功率总和,有 $P_{MH} = NP_m$ 。为了进一步统计两种传输方式的功率需求差别,在这里定义了系统功率节省率这个概念,即直通方式传送信息的发射功率与中继链路方式完成信息传送的系统发射功率节省差值和直通方式的系统功率值的比值,概念式为 $(P_{DT} - P_{MH})/P_{DT}$,将(5)式和(7)式代入,可以得到系统功率节省率表达式为

$$\Gamma = 1 - N^{1-\alpha} \frac{\ln[2 - 2(1 - P_e)^{1/N}]}{\ln(2P_e)}, \quad (8)$$

式中当 $N=1$ 时,即为源端节点和目的端节点直接通信情况下的系统功率节省率,有 $\Gamma=0$ 。

4 仿真实验和分析

经过前面分析,在 UV NLOS 通信中构造一系列多跳节点的中继链路可以节省单个节点发射功率和系统总功率。仿真中的一些主要参数设置如表 2 所示。

表 2 UV NLOS 链路中的典型参数

Table 2 Typical parameters for UV NLOS link

Parameter	Value
Launching elevation $\theta_1 / (^\circ)$	10, 20, 30, 40
Receiving elevation $\theta_2 / (^\circ)$	10, 20, 30, 40
Wavelength λ / nm	265
Information transmission rate $R_b / (\text{kb/s})$	32
Back ground noise $N_n / (\text{W/m}^2)$	10^{-13}
PMT conversion efficiency $\eta_{\text{PMT}} / \%$	30
Filter efficiency $\eta_{\text{filter}} / \%$	20

仿真中,主要根据前面推导的表达式从不同收发仰角情况下直通方式节点功率需求随传输距离变化关系、中继链路方式节点功率需求随多跳节点数变化关系和系统功率节省率三方面进行详细分析。

图 7 为信息传输速率 $R_b = 32 \text{ kb/s}$, 误比特率 $P_e = 10^{-5}$ 时,UV NLOS 通信系统根据(5)式进行直接传送信息需要的发送功率随传输距离的变化曲线。从图 7 中,横向比较可以看出,随着传输距离的增加,需要的发送功率逐渐增大;纵向比较可知,功率与收发仰角存在一定关系,角度越大,功率需求也越大。这是因为:传输距离越远,收发仰角越大,光束越发散,能量损耗越多,对进行通信的节点发送功率需求也就更高。从图中还可以看出,收发仰角分别为 $(10^\circ, 10^\circ)$, $(20^\circ, 20^\circ)$, $(30^\circ, 30^\circ)$, $(40^\circ, 40^\circ)$, 传输距离为 300 m 时,需要的节点发射功率分别为 36、180、490、1000 mW,这样的发射功率需要布置大量的 LED 阵列才能实现,成本高、代价大、安全性得不到保证,不利于通信系统硬件实现,因此需要对传输信息的链路进行改进,降低对发射功率的需求。

图 8 为信息传输速率 $R_b = 32 \text{ kb/s}$, 误比特率 $P_e = 10^{-5}$, 传输距离 $d = 300 \text{ m}$ 时,构造 UV NLOS 通信中继链路后,节点发射功率随多跳节点数的变化曲线。对于理想的多跳 UV NLOS 通信链路来说,假设每个节点的发射功率是固定的,那么增加中继节点数也就相应延伸了通信距离,换句话说,在通信距离不变时,每增加一个中继节点,就能相应减少单个节点的发射功率需求,如图 8 所示。收发仰角较小时,如 $(10^\circ, 10^\circ)$, $(20^\circ, 20^\circ)$, 经过几跳节点中继,可以将所需发射功率降低到 0.5 mW 和 2 mW,1 个 LED 灯就能满足需求,对于大角度仰角,如 $(30^\circ, 30^\circ)$, $(40^\circ, 40^\circ)$, 传输 300 m 距离经过 10 个中继节点转发,也能将功率降低到 10 mW 和 50 mW,这时需要部署 LED 阵列才可以实现。总的来说,经过中继链路转发信息后,通过增加节点数能够将

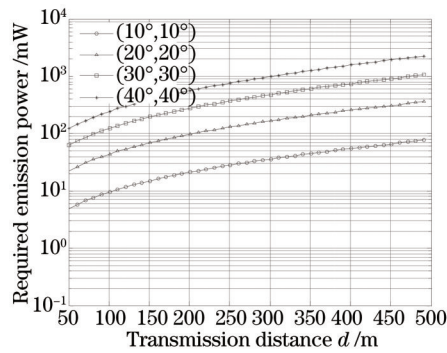


图7 直通方式节点功率需求随距离变化曲线

Fig.7 Required emission power versus transmission distance of direct connection mode

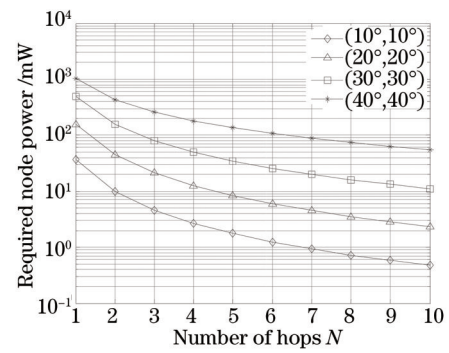


图8 中继链路方式节点功率需求随多跳节点数变化曲线

Fig.8 Required node emission power versus multihop numbers of relayed link mode

单个节点发射功率降低到现有LED技术可以提供的水平。

图9为误比特率 $P_e = 10^{-5}$ 时,构造的多跳节点中继链路根据(8)式得到的系统功率节省率随节点数的变化曲线。从图中可以看出,随着多跳节点数的增加,可以节省更多的发射功率,在中继节点数小于4时,曲线比较陡峭,说明这时功率节省率比较敏感,当节点数在5~10时,曲线增长趋势逐渐变缓。特别的,中继节点数超过4后,除了收发仰角为(40°,40°)外,都可以节省60%以上的系统功率,效果比较明显,说明系统的功率节省率与收发仰角存在很大的关联,并且在角度较小时,可以显著提升节省率,一旦角度变大,功率节省率提升的效率就会迅速降低,这是因为路径损耗指数 α 在提升功率节省率上起着关键作用,说明系统的功率节省率是中继节点数和收发仰角共同作用的结果。在角度固定不变时,可以通过改变系统的中继链路增加节点数来获取功率节省率的提升。

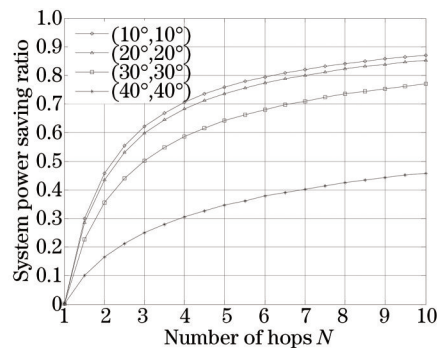


图9 系统功率节省率随多跳节点数变化曲线

Fig.9 System power saving ratio versus multihop numbers

5 结 论

在UV NLOS通信传输中因节点发射功率受限和信道衰减严重,致使延长通信距离需要增大功率,然而现有器件技术却很难满足应用需求,故提出一种构造多跳网络的中继链路方法。该方法用增加节点数转发信息来减少单个节点的发射功率需求,通过采取时分复用技术给邻近节点分配不同时隙降低节点间的相互干扰。随后,对节点直接通信和中继链路通信两种不同传输方式需要的功率进行了详细分析,并给出了系统功率节省率的概念和表达式。通过仿真表明,构造的多跳链路能够减少单个节点的发射功率需求,同时还能降低整个系统的总功率,提高系统功率利用率,有利于重量轻、低功耗需求的节点部署实施,为下一步进行UV通信组网提供了思路和依据。

参 考 文 献

- 1 Lindner M, Elstein S, Panitkova E, *et al.*. UV devices for solar blind & background limited detection[C]. SPIE, 2004, 3110: 527-534.
- 2 Z Xu, B Sadler. Ultraviolet communications: Potential and state-of-the-art[J]. IEEE Communications Magazine, 2008,

- 46(5): 67–73.
- 3 Zhao Taifei, Wang Xiaorui, Ke Xizheng. Research on multi-channel access technology in wireless UV scattering communication[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(3): 0306001.
赵太飞, 王小瑞, 柯熙政. 无线紫外光散射通信中多信道接入技术研究[J]. *光学学报*, 2012, 32(3): 0306001.
- 4 Ke Xizheng. UV Self-Organizing Network Theory[M]. Beijing: Science Press, 2011.
柯熙政. 紫外光自组织网络理论[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- 5 V Adivarahan, Q Fareed, S Srivastava, *et al.*. Robust 285 nm deep UV light emitting diodes over metal organic hydride vapor phase epitaxially grown AlN/sapphire templates[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2007, 46: 537–539.
- 6 Zhang Jiankun, Yang Yu, Liu bo, *et al.*. Design of home network based on visible light communication and power line carrier communication[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, 48(10): 100604.
张建昆, 杨宇, 刘博, 等. 基于可见光和电力线载波的家庭网络设计[J]. *激光与光电子学进展*, 2011, 48(10): 100604.
- 7 X Bai, D McIntosh, H Liu, *et al.*. Ultraviolet single photon detection with Geiger-mode 4H-SiC avalanche photodiodes [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2007, 19: 1822–1824.
- 8 G A Shaw, A M Siegel, J Model. Extending the range and performance of non-line-of-sight ultraviolet communication links[C]. SPIE, 2006, 6231: 62310C.
- 9 Guo Da, Zhang Yong, Peng Xiaochuan. Wireless Mesh Networks: Framework, Protocol and Standard[M]. Beijing: Electronics Industry Press, 2008.
郭达, 张勇, 彭晓川. 无线网状网: 架构、协议与标准[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008.
- 10 Q He, Z Xu, B M Sadler. Non-line-of-sight serial relayed link for optical wireless communications[C]. *IEEE Military Communications Conference*, 2010. 1588–1593.
- 11 Li Jibo, Liu Xiguo, Wang Hongxing, *et al.*. Improved ultraviolet communication time division multiplexing network method[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(11): 1105003.
李济波, 刘锡国, 王红星, 等. 改进的紫外光通信时分复用组网方法[J]. *中国激光*, 2014, 41(11): 1105003.
- 12 Fan Changxin, Cao Lina. Communication Principles[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007. 12–14.
樊昌信, 曹丽娜. 通信原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007. 12–14.
- 13 Song Chao, Xu Zhiyong, Wang Jingyuan, *et al.*. Optimization of link analysis and design for long-range non-line-of-sight atmospheric scattering communication[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(9): 0913003.
宋超, 徐智勇, 汪井源, 等. 非视距大气散射光通信最优化链路分析与设计[J]. *中国激光*, 2012, 39(9): 0913003.
- 14 G Chen, Z Xu, H Ding, *et al.*. Path loss modeling and performance trade-off study for short-range non-line-of-sight ultraviolet communications[J]. *Opt Express*, 2009, 17(5): 3929–3940.
- 15 Q He, Z Xu, B M Sadler. Performance of short-range non-line-of-sight LED-based ultraviolet communication receivers[J]. *Opt Express*, 2010, 18(12): 12226–12238.
- 16 R M Gagliardi, S Karp. *Optical Communications*[M]. New York: John Wiley & Son, 1976.

栏目编辑: 王晓球