

紫外光空分复用自组织网络路由协议

宋晓梅¹, 宋 菲¹, 宋 鹏^{1,2*}, 李云红¹

¹西安工程大学电子信息学院, 陕西 西安 710048;

²陕西省复杂系统控制与智能信息处理重点实验室, 陕西 西安 710048

摘要 为了改善紫外光(UV)点对点通信中传输距离有限、覆盖范围小的问题,组建了 UV 自组织(Ad Hoc)网络。结合 UV 通信的信道特性,提出了一种 UV 组网通信收发装置设计方案。基于该方案,给出了 UV Ad Hoc 网络节点定位算法,该算法利用节点间的通信距离和扇区信息求得节点间的相对位置。以无线 Ad Hoc 网络多播按需距离矢量路由协议为基础,提出了一种 UV 空分复用 Ad Hoc 网络路由协议,并对该路由协议进行了仿真,给出了不同节点数和运动区域下的仿真结果。结果表明:在满足发包数、时延和丢包率等通信要求的前提下,在一定运动区域内,应选择较少的节点;当节点数一定时,应选择较小的运动区域。

关键词 光通信; 紫外光通信; 自组织网络; 空分复用; 节点定位; 路由

中图分类号 TN929.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.1006005

Routing Protocol of Ultraviolet Space Division Multiplexing Ad Hoc Network

Song Xiaomei¹, Song Fei¹, Song Peng^{1,2}, Li Yunhong¹

¹College of Electronics and Information, Xi'an Polytechnic University,

Xi'an, Shaanxi 710048, China;

²Shaanxi Key Laboratory of Complex System Control and Intelligent Information Processing,

Xi'an, Shaanxi 710048, China

Abstract The limited transmission distance and coverage of point-to-point ultraviolet (UV) communication can be improved with an UV self-organization (Ad Hoc) network. Combined with the channel characteristics of UV communication, a design scheme of UV network communication transceiver device is proposed. Based on this scheme, an UV Ad Hoc network node localization algorithm is proposed, which can obtain the relative position between the nodes with the communication distance and sector information between nodes. Based on the wireless Ad Hoc multicast on-demand distance-vector routing protocol, a routing protocol of UV space division multiplexing Ad Hoc network is proposed and simulated. The simulation results under different moving areas and numbers of nodes show that under the premise of meeting communication requirements such as number of message sent, delay and packet loss rate, fewer nodes should be chosen in a certain moving area, and when the number of nodes is constant, a small moving area should be selected.

Key words optical communications; ultraviolet communications; self-organization network; space division multiplexing; node location; routing

OCIS codes 060.4510; 060.4250; 040.7190

收稿日期: 2017-04-19; 收到修改稿日期: 2017-05-26

基金项目: 国家自然科学基金委员会-中国民航局民航联合研究基金(U1433110)、陕西省科技厅工业科技攻关项目(2016GY-047)、陕西省科技厅自然科学基金基础研究计划(2016JZ026)、陕西省复杂系统控制与智能信息处理重点实验室开放课题(2016CP05)、西安工程大学研究生创新基金(CX201603)

作者简介: 宋晓梅(1958—),女,本科,教授,主要从事紫外光通信、信号采集与处理方面的研究。

E-mail: sxiaomeicn@163.com

* 通信联系人。E-mail: pengsong916@126.com

1 引 言

无线日盲紫外光(UV)通信受到大气的散射和吸收作用,能进行非直视(NLOS)传输,具有背景噪声小、保密性高、抗干扰能力强和全天候工作等优点^[1]。但是,大气的强散射、强吸收作用使得目前常用的基于紫外发光二极管(LED)和光电倍增管探测器(PMT)的UV通信模式难以实现远距离传输,且通信覆盖范围受限^[2-3]。UV通信信道的高路径损耗以及独特的光学特性对系统的设计和实现提出了独特的要求。例如,增加功率是一种常见且简单的提高通信性能的方法,但无线UV通信系统必须考虑与人眼和皮肤安全相关的规定^[4-5]。

根据实际需求,可以利用不同结构的拓扑网来扩大通信覆盖范围。文献[4,6]通过建立点到点的多跳通信网络来扩大通信范围,但网络灵活性差;文献[7]提出将日盲UV通信与自组织(Ad Hoc)网络相结合的方法。Ad Hoc网络是一种特殊的对等网络,具有无中心、可移动和多跳等特点,每一个节点都具有终端和路由功能^[8-9],将UV通信和自组织网络技术相结合,可以大大弥补UV通信发送功率低、路径损耗大等缺陷^[10]。为了实现UV组网通信,文献[5]提出了一种由多个UV LED组成的定向发送装置,接收端则采用全向接收的方式,但全向接收会降低协议解决冲突的能力。文献[11]借鉴蜂窝结构和无线传感器网络簇划分的思想,提出了改进的UV通信时分复用组网方法。该方法基于垂直收发模型,采用全向收发的方式,但是在UV通信中发送功率有限,采用全向收发方式时系统的通信覆盖范围小且抗干扰能力弱。基于文献[5],文献[12]提出了一种由多个UV LED和多个PMT组成的、能定向切换光束的收发装置,该装置可增加传输距离、增强抗干扰能力,但日盲UV LED和PMT的价格昂贵。上述文献中,发送设备和接收设备都是相对独立的,而文献[13-15]指出,只要对系统的几何参数进行合理的配置,就可以降低用户间的干扰,实现收发设备的共址同存。此外,受到UV硬件设备的限制,目前还无法实现频分复用和码分复用。为了解决上述问题,提出了一种基于空分复用技术的可旋转UV通信收发设备的设计方案,基于该设计方案对节点的定位算法和路由协议展开研究。

在Ad Hoc网络中,通信节点随机分布,无法事先知道节点间的相对位置,因此需对节点进行实时定位。在传感器网络中,通常会将一些节点作为锚节点,未知节点可以通过与锚节点之间的通信来获取距离和角度等信息,然后采用定位算法估算自身位置,该方法同样适用于UV通信网络。路由协议的目的是在通信网络中建立并维护数据传输路径^[16]。目前无线自组网多播按需距离矢量(MAODV)路由协议是应用于无线自组网中进行路由选择的路由协议,能实现单播和多播路由,它的处理过程简单,存储开销很小,不需要全程的路由维护,只有当某节点有数据需要传送时,才进行路由发现和路由维护过程^[17]。

本文针对UV Ad Hoc网络,采用一种可旋转的UV通信收发设备,通过节点间的通信距离和扇区信息求得节点间的相对位置,结合MAODV协议,提出了一种UV空分复用Ad Hoc网络路由协议。

2 UV通信收发装置设计方案

目前,UV通信网络多采用垂直收发模型,发送端和接收端的仰角均为 90° ,即全向收发。但该模型的通信覆盖范围小、抗干扰能力弱,无法实现定向收发。为了改善这些问题、实现全向收发和定向收发的任意切换、实现UV收发设备的共址同存并避免同一节点收发端的相互干扰,基于空分复用技术,提出了一种可旋转UV通信收发装置的设计方案。该方案的示意图如图1所示,发送端为UV LED,接收端为PMT,二者都为四棱柱结构,发送端与接收端互为相邻面,相对的面收发功能相同。文献[18]指出为了减小大气衰减效应对自由空间光通信的影响,可采用多输入多输出技术。在该方案中,每一面可以分别安装多个发送设备或接收设备,图1中以两个LED和两个PMT为例进行说明。

误码率能直接反映系统性能,并以此确定系统是否能够实现通信。一般情况下,误码率为 10^{-5} 时,可以满足通信的需求。采用二进制通断键控方式进行调制,不考虑干扰时,接收端误码率 R_{BE} 为^[19]

$$R_{BE} = \frac{1}{2} \exp\left(-\frac{\eta_1 \eta_2 P_t}{LR_b h\nu}\right), \quad (1)$$

式中 η_1 为PMT的效率; η_2 为光学过滤器的效率; P_t 为发射光功率; L 为从发送端到接收端的路径损耗; R_b 为传输速率; $h\nu$ 为每个光子的能量,其中 h 为普朗克常量, ν 为发送端的频率, $\nu = c/\lambda$, c 为光速, λ 为波长。

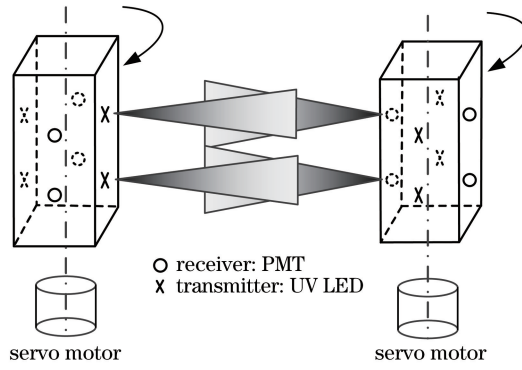


图 1 可旋转 UV 通信收发装置

Fig. 1 Rotatable transceiver device for UV communication

L 可表示为

$$L = \frac{P_t}{P_r}, \tag{2}$$

式中 P_r 为接收功率。由(1)式和(2)式可得

$$P_r = -\frac{R_b h c \ln(2R_{BE})}{\eta_1 \eta_2 \lambda}. \tag{3}$$

当给定误码率限定条件时,利用(3)式可以判断信息是否被成功接收。

3 UV 组网通信节点定位算法

3.1 基于能量信息测距

UV 通信分为直视(LOS)传输和 NLOS 传输两种状态^[20-21]。

3.1.1 LOS 测距公式

根据文献[20]所述,一条 LOS 链路会产生自由空间路径损耗,并且能量会因大气的散射和吸收作用呈指数衰减。LOS 链路的接收功率为

$$P_{r, LOS} = P_t \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \exp(-k_e d) \frac{4\pi A_r}{\lambda^2}, \tag{4}$$

式中 d 为发射端到接收端的距离; k_e 为消光系数,为吸收系数 k_a 和散射系数 k_s 之和,即 $k_e = k_s + k_a$; A_r 为接收孔径面积; $[\lambda/(4\pi d)]^2$ 为自由空间路径损耗; $\exp(-k_e d)$ 为大气指数衰减; $4\pi A_r/\lambda^2$ 为探测器的接收增益。(4)式经化简可得

$$P_{r, LOS} = \frac{P_t A_r}{4\pi d^2} \exp(-k_e d). \tag{5}$$

3.1.2 NLOS 单次散射测距公式

在 NLOS 通信状态下,接收端接收到的能量主要来自光子的单次散射,因此在忽略两次或多次散射影响的条件下,UV 通信单次散射模型如图 2 所示^[9]。将图 2 中的 NLOS 链路看成两段 LOS 链路,将从发射端 T 到散射点 S 的链路视为第一段 LOS 链路,将从散射点 S 到接收端 R 的链路视为第二段 LOS 链路。图

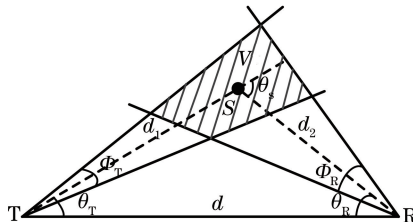


图 2 NLOS UV 单次散射链路模型

Fig. 2 Single scattering link model of NLOS UV

2 中 d_1 为发射端 T 到散射点 S 的距离, d_2 为散射点 S 到接收端 R 的距离, θ_T 为发射端仰角, θ_R 为接收端仰角, θ_s 为散射角(出射光束与接收端观测方向的夹角, 由三角函数关系可知 $\theta_s = \theta_T + \theta_R$), Φ_T 为发射光束发散角, Φ_R 为接收端视场角, V 为有效散射区域体积。

已知初始发射光功率为 P_t , 发射光束立体角 $\Omega_T = 4\pi \sin^2(\theta_T/2)$, 则单位立体角的能量为 P_t/Ω_T 。考虑到大气衰减和路径损耗, 经过第一段 LOS 链路传输后功率变为 $\frac{P_t \exp(-k_e d_1)}{\Omega_T d_1^2}$ 。经共同散射体中大气微粒的散射后功率变为 $\frac{P_t \exp(-k_e d_1)}{\Omega_T d_1^2} \frac{k_s}{4\pi} P_s V$, 其中 P_s 为散射相函数。第二段 LOS 链路的总衰减包括自由空间路径损耗 $[\lambda/(4\pi d_2)]^2$ 和大气衰减 $\exp(-k_e d_2)$, 探测器的接收增益同样为 $4\pi A_r/\lambda^2$ 。综上可得 NLOS 单次散射链路的接收功率为

$$P_{r,NLOS} = \frac{P_t \exp(-k_e d_1)}{\Omega_T d_1^2} \frac{k_s}{4\pi} P_s V \left(\frac{\lambda}{4\pi d_2} \right)^2 \frac{4\pi A_r}{\lambda^2} \exp(-k_e d_2), \quad (6)$$

式中 $d_1 = d \sin \theta_R / \sin \theta_s$, $d_2 = d \sin \theta_T / \sin \theta_s$ 。当 $d_2 \Phi_R > d_1 \Phi_T$, 且 Φ_T 和 Φ_R 较小时, 公共散射体可近似为底面边长为 $d_1 \Phi_T$ 、高为 $d_2 \Phi_R$ 的立方体, 即 $V \approx d_2 \Phi_R (d_1 \Phi_T)^2$ ^[22]。将上述参数代入(6)式, 经化简后可得^[20]

$$P_{r,NLOS} = \frac{P_t A_r k_s P_s \Phi_R \Phi_T^2 \sin(\theta_T + \theta_R)}{32\pi^3 d \sin \theta_T [1 - \cos(\Phi_T/2)]} \exp\left[-\frac{k_e d (\sin \theta_T + \sin \theta_R)}{\sin(\theta_T + \theta_R)}\right]. \quad (7)$$

P_s 为瑞利散射相函数和米散射相函数的加权和, 即

$$P_s = \frac{k_s^{Ray}}{k_s} P^{Ray}(\theta_s) + \frac{k_s^{Mie}}{k_s} P^{Mie}(\theta_s), \quad (8)$$

式中 k_s^{Ray} 为瑞利散射的散射系数, k_s^{Mie} 为米散射的散射系数, 两者之和构成了 k_s ; $P^{Ray}(\theta_s)$ 为瑞利散射相函数, $P^{Mie}(\theta_s)$ 为米散射相函数, 可分别表示为

$$P^{Ray}(\theta_s) = \frac{3[1 + 3\gamma + (1 - \gamma) \cos^2 \theta_s]}{4(1 + 2\gamma)}, \quad (9)$$

$$P^{Mie}(\theta_s) = (1 - g^2) \left[\frac{1}{(1 + g^2 - 2g \cos \theta_s)^{3/2}} + f \frac{(3 \cos^2 \theta_s - 1)}{2(1 + g^2)^{3/2}} \right], \quad (10)$$

式中 γ 为瑞利散射的散射因子, $\gamma = 0.017$; g 为米散射的不对称因子, $g = 0.72$; f 为米散射的散射因子, $f = 0.5$ 。波长为 260 nm 时, $(k_e, k_s^{Ray}, k_s^{Mie}) = (1.23 \text{ km}^{-1}, 0.24 \text{ km}^{-1}, 0.25 \text{ km}^{-1})$ 。

3.2 算法原理

在 UV Ad Hoc 网络中, 各节点地位相同, 均未携带全球定位系统设备, 因此可以通过距离信息和角度信息来求得节点间的相对位置。

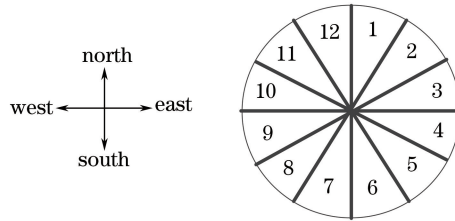


图 3 扇区划分

Fig. 3 Sector division

结合图 1 所示的可旋转 UV 通信收发装置, 将该装置的旋转区域划分为扇区。以 30° 为间隔, 将旋转区域划分成 12 个扇区, 如图 3 所示。划分扇区后, 可实现全向通信模式和定向通信模式的任意切换, 通过选择不同扇区以实现节点定向发送和定向接收, 当需要广播消息时, 则不需要分扇区通信。

图 4 为旋转过程中节点间的通信状态。节点 A、B 均为顺时针旋转, 节点 A 的发射光束与节点 B 的接收视场慢慢靠近。图 4(a) 为临界状态; 之后, 发射光束和接收视场产生公共散射体, 如图 4(b) 所示; 节点继续旋转, 公共散射体逐渐增大, 当发射端与接收端对准公共散射体最大, 如图 4(c) 所示; 随后公共散射体逐渐减小, 如图 4(d) 所示; 图 4(e) 为临界状态; 之后, 节点 A 的发射光束与节点 B 的接收视场逐渐远离且无

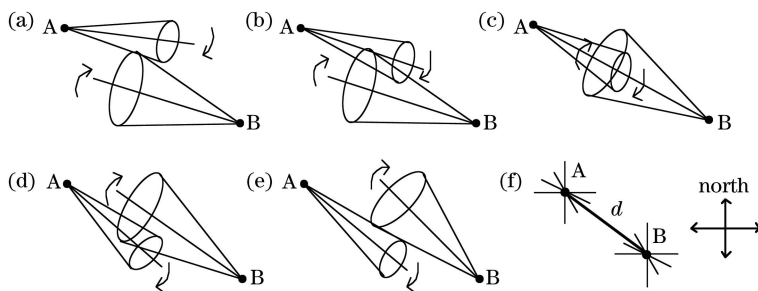


图 4 旋转过程中节点间通信状态。(a)~(e) 5 种状态;(f)节点相对位置

Fig. 4 Communication states between nodes during rotation processes. (a)-(e) Five states; (f) relative positions of nodes

公共散射体。

进行节点定位时,节点 A 旋转广播消息,消息中包含节点身份(ID)、发射功率和扇区等信息,节点 B 收到消息后,记录该消息,同时记录接收功率和接收扇区。由图 4 可以看出,该装置的节点间存在 LOS 通信和 NLOS 通信两种工作状态。

在 LOS 工作状态下,可由(5)式求得通信距离;在 NLOS 状态下,虽然存在偏轴角,不存在仰角,但是可以通过坐标变换将偏轴角视为仰角。坐标变化过程如图 5 所示,其中 α_T 为发射端偏轴角, α_R 为接收端偏轴角,代入(7)式求得通信距离为

$$P_{r,NLOS} = \frac{P_t A_r k_s P_s \Phi_R \Phi_T^2 \sin(\alpha_T + \alpha_R)}{32\pi^3 d \sin \alpha_T [1 - \cos(\Phi_T/2)]} \exp \left[-\frac{k_c d (\sin \alpha_T + \sin \alpha_R)}{\sin(\alpha_T + \alpha_R)} \right] \quad (11)$$

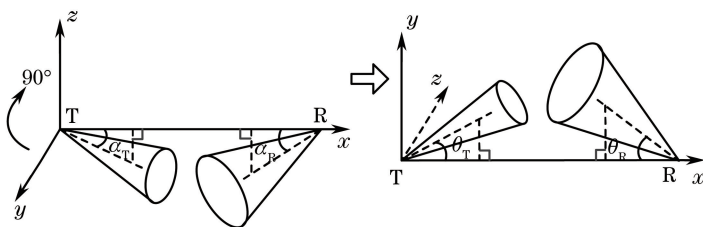


图 5 坐标变换过程

Fig. 5 Coordinate transformation process

当求得通信距离 d 后,结合记录的消息中所包含的节点 ID 和扇区信息[图 4(f)]以及节点 A 可知,在第 5 扇区 d 处存在节点 B,这样就实现了节点定位。同样的,由节点 B 也可知,在第 11 扇区 d 处存在节点 A。若想要进行更精确的节点定位,以求得准确的角度信息,节点广播消息时,可以带上实时的角度信息。但是,采用空分复用技术时,将空间分割,则某一空间只和一个节点进行通信,因此无需知道准确的角度信息,只需知道扇区信息即可。

节点定位能给路由层提供更多的位置信息,只有实现节点定位,才能估算所要通信的目的节点是在一跳通信范围内还是需要转发,并为获得高效率、高质量的无线通信提供基础。

4 UV 空分复用 Ad Hoc 网络路由协议

4.1 路由路径的建立

MAODV 路由协议中的路由搜索是按需进行的,采用路由请求(RREQ)和路由回复(RREP)两种报文寻找、建立路由。图 6 为路由发现过程示意图,图中节点 1 为源节点,节点 12 为目的节点,其他节点为中间节点。

当源节点 1 向目的节点 12 发送消息且已知路由不存在时,就会启动路由发现过程来寻找合适的路由。源节点首先广播 RREQ 消息,相邻节点 2,3,4 收到消息后,先在自己的路由表中查找是否有到目的节点的路由。如果有到目的节点的路由,则将路由信息写入 RREP 包发给源节点;如果没有到目的节点的路由,则跳数加 1,再将 RREQ 转发给自己所有的邻节点。如果一个节点收到多个 RREQ,则按照先到优先的原则进

行选择。但是,如果新到的 RREQ 的跳数更少,则更新 RREQ 并广播给相邻节点。节点在转发 RREQ 的同时,会在其路由表中为源节点建立反向路由入口,记录 RREQ 中所包含的有关源节点、目的节点以及相邻节点的信息。如果相邻节点太多,同样按照先到优先的原则记录相邻的 3~5 个节点。每个节点在建立路由入口的同时,会设置一个路由定时器,若该路由入口在定时器设定的计时周期内从未使用过该入口,则将该路由作为备选路由。如此循环,直到到达目的节点 12 或中间某个节点知道到达目的节点的路由为止。当一个收到 RREQ 信息的节点知道到达目的节点的路由,或者它自己就是目的节点,该节点就会沿着 RREQ 所建立的路径反向发送 RREP 消息。图 6 中虚线箭头所示为随着 RREP 从目的节点向源节点传输,即反向路径的建立过程。当源节点收到 RREP 消息后,正向路由即成功建立。

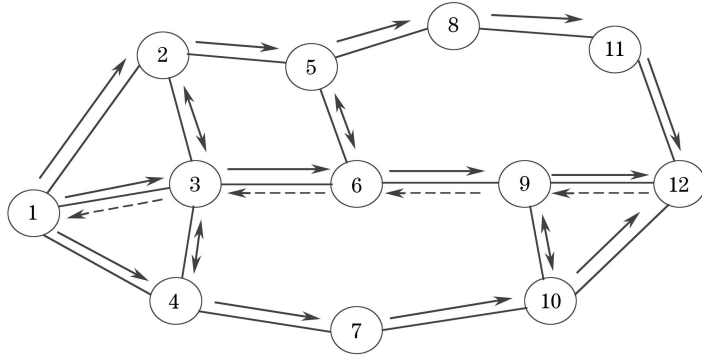


图 6 路由发现过程

Fig. 6 Routing discovering process

4.2 路由维护

在 MAODV 算法中,一条已经建立起来的路由会一直被维护,直到源节点不再需要它为止。如果源节点发生移动,就需要重新启动路由发现过程来建立到达目的节点的新路由。但当目的节点或某些中间节点移动时,受影响的源节点就会收到一个连接失败的消息(RERR),同时在断开节点处选用备用节点开启路由。选择哪一个备用节点的依据是路由发现过程链路返回时间的长短,返回时间短的节点作为优先选用节点。如果所有备用节点在断开处都无法建立新的路由,则在原路由的断开节点处向上一节点处发送 RERR,并在上一节点处继续启用备用节点。以此类推,直到成功建立新路由为止。若原来链路上的所有节点都无法建立新路由,最后 RERR 传到源节点,这时再在源节点重新启动路由发现过程。

4.3 UV MAODV 路由建立过程

UV 通信路由的建立过程分为源节点旋转、发送端广播 RREQ、多播通信 3 个阶段。通常 RREQ 中含有源节点 ID、目的节点 ID、上一节点的 ID、广播 ID 以及跳数等相关信息。结合 MAODV 路由协议的 UV 通信路由的建立过程需在 RREQ 中加入扇区信息。扇区的分配可以根据具体情况进行调整,并对扇区进行编码。旋转相邻节点接收端进行侦听,路由建立后,通信过程中节点间进行单播通信,在一个扇区只能和一个节点进行通信。因此在发送数据前,节点需要根据记录信息确定目标所处的扇区位置,从而选择该扇区定向发送信号。

5 仿真与分析

5.1 定位算法

通过 Matlab 对节点定位算法进行仿真,实验参数设置如表 1 所示。在已知接收功率的情况下,通过(5)式求得 LOS 传输时的通信距离,通过(11)式求得 NLOS 单次散射传输时的通信距离。通过 Matlab 求解可能得到多个解,但只有一个解为正实数,其余解为负数或虚数,这里选取正实数解。

图 7(a)为 LOS 传输时接收功率与通信距离的关系,随着接收功率的逐渐减小,通信距离越来越远。当接收功率小于 10^{-7} W 时,收发节点的距离在 10 m 以上,故重点研究接收功率小于 10^{-7} W 时接收功率与通信距离的关系。图 7(b)为 NLOS 单次散射传输时接收功率与通信距离的关系,随着接收功率的逐渐减小,

表 1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters

Parameter	Value
$\theta_T / (^\circ)$	0
$\theta_R / (^\circ)$	0
$\Phi_T / (^\circ)$	6
$\Phi_R / (^\circ)$	30
α_T, α_R (LOS transmission) $/ (^\circ)$	0
α_T, α_R (NLOS single scattering transmission) $/ (^\circ)$	30
P_t / W	1
A_r / cm^2	1

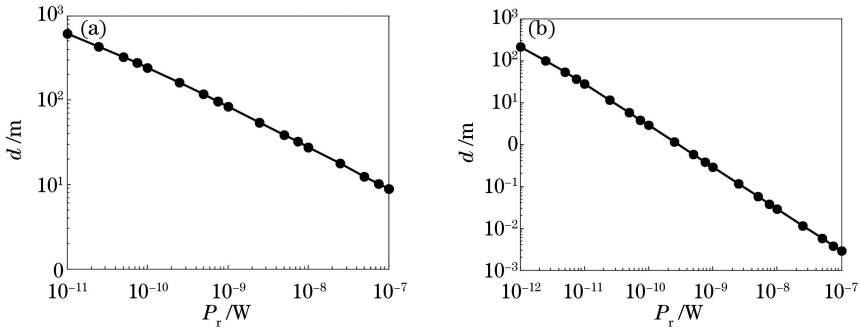


图 7 接收功率与通信距离的关系。(a) LOS 传输;(b) NLOS 单次散射传输

Fig. 7 Relationship between receiving power and communication distance. (a) LOS transmission;
(b) NLOS single scattering transmission

通信距离越来越远。对比图 7(a)和图 7(b)可以发现,当接收功率相同时,LOS 传输的通信距离更远,通信性能更好。

5.2 路由协议

5.2.1 仿真场景设置

采用 NS2(Network Simulator Version 2)作为网络路由协议仿真平台,设置信号波长 $\lambda = 260 \text{ nm}$,发送功率 $P_t = 50 \text{ mW}$,传输速率 $R_b = 4 \text{ kbit/s}$,PMT 的效率 $\eta_1 = 0.35$,光学过滤器的效率 $\eta_2 = 0.3$ 。通过(3)式和上述参数设置求得 $P_r = 1.575 \times 10^{-13} \text{ W}$,即接收阈值 $R_T = 1.575 \times 10^{-13}$ 。

给定仿真场景中的节点数,节点在一定的区域内随机运动。节点高速移动,每个节点将会在移动范围内随机选择一个目的地,以给定的速度移动至该目的地,在原地停留一段时间,然后再随机选取下一个目的地进行下一次移动。分别对节点数和仿真区域进行仿真。节点的最大移动速度为 10 m/s ,最小移动速度为 2 m/s ,仿真时间为 360 s ,停留时间为 5 s 。

5.2.2 评价指标

选择 3 个常用的指标来评估协议的性能,分析网络的服务质量^[23-24]。这 3 个常用的指标为:1) 源节点发送的数据包数;2) 端到端时延,即收到数据包的总时延与目的节点接收的数据包数的比值;3) 数据包丢包率,即去除目的节点收到的数据包数后的源节点发送的数据包数与源节点发送的数据包数的比值。

由于运动场景是随机生成的,故需要在同样的参数设置下进行几次运动场景的仿真测试后取平均值来评价系统性能。

5.2.3 仿真结果分析

如图 8 所示,考虑节点数变化对系统性能的影响。设定节点数的变化范围为 $3 \sim 30$ 。由图 8 可知,随着节点数的增加,发包数增加、时延先增加再减小、丢包率先增大后减小。这主要是由于节点是随机运动的,随着节点数的增加,建立通信链路的概率也在逐渐提高,发包数逐渐增加。同时,随着节点数的增加,通信链路的建立变得相对容易,但是节点数的增加会导致通信链路变长、数据距离增大、传输时间延长以及丢包现象

加重。当节点数一定时,系统的发包数、时延和丢包率的变化幅度不大,这说明系统达到了一个饱和状态,此时节点数的增加几乎不会对系统性能产生影响。由此可见,在一定运动区域内,节点数并非越多越好,在满足发包数、时延和丢包率等通信要求的前提下,应选择较少的节点。

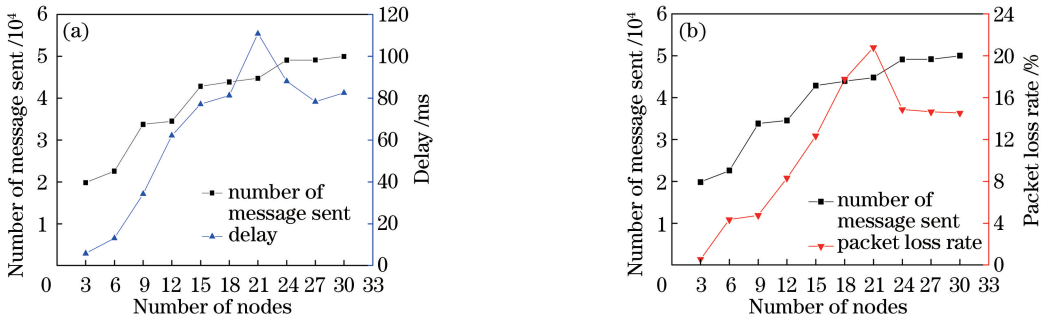


图 8 节点数对系统性能的影响。(a)发包数和时延;(b)发包数和丢包率

Fig. 8 Influence of number of nodes on system performance. (a) Number of message sent and delay; (b) number of message sent and packet loss rate

图 9 所示为节点运动区域的变化对系统性能的影响。设定节点数为 15,节点运动区域从 20 m×20 m 变化至 300 m×300 m。由图 9 可知,随着节点运动区域的增大,发包数减少,时延先增大后减小,丢包率先增大后减小。这主要是由于节点是随机运动的,当节点数一定时,随着节点运动区域的增大,建立通信链路的概率逐渐降低,发包数逐渐减少,导致通信链路变长、数据距离增大,时延增大以及丢包率增大。当节点运动区域很大时,系统的时延和丢包率反而逐渐减小,导致这一结果的主要原因是节点运动区域太大,通信链路的建立变得困难,所建立的通信链路的长度变短,传输时间缩短,丢包现象得到改善。由此可见,当节点数一定时,在满足发包数、时延和丢包率等通信要求的前提下,节点运动区域越小,通信质量越高。

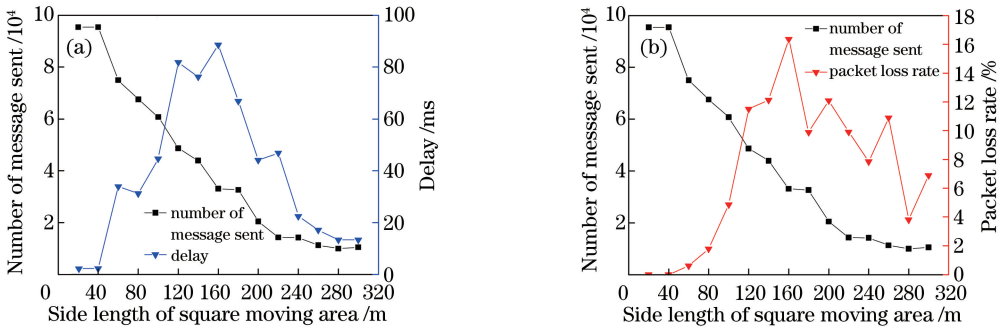


图 9 节点运动区域对系统性能的影响。(a)发包数和时延;(b)发包数和丢包率

Fig. 9 Influence of node moving area on system performance. (a) Number of message sent and delay; (b) number of message sent and packet loss rate

6 结 论

将 UV 通信和 Ad Hoc 网络技术相结合,可以改善 UV 点对点通信距离有限、覆盖范围小的问题,因此,UV Ad Hoc 网络受到越来越多研究者的重视。针对 UV 特有的信道特性,提出了一种可旋转的 UV 通信收发设备的设计方案,将该装置的旋转区域划分为多个扇区。给出 LOS 传输和 NLOS 单次散射传输时接收功率与通信距离的关系式,通过节点间的通信距离和扇区信息可求得节点间的相对位置。通过仿真得到了 LOS 传输和 NLOS 单次散射传输时接收功率与通信距离的关系曲线。提出了一种 UV 空分复用 Ad Hoc 网络路由协议,并对路由协议进行仿真,给出了不同节点数量和运动区域下的仿真结果。结果表明,在一定运动区域内,节点数并非越多越好,在满足发包数、时延和丢包率等通信要求的前提下,应选择较少的节点;当节点数一定时,在满足发包数、时延和丢包率等通信要求的前提下,节点运动区域越小,通信质量越高。验证了 UV 通信组网节点定位算法以及 UV Ad Hoc 网络的可行性,该研究对 UV Ad Hoc 网络的进一步研究

具有一定的参考价值。

参 考 文 献

- [1] Zhao Taifei, Jin Dan, Song Peng. Channel capacity estimation and analysis of wireless ultraviolet non-line-of-sight communication[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(6): 0605001.
赵太飞, 金丹, 宋鹏. 无线紫外光非直视通信信道容量估算与分析[J]. 中国激光, 2015, 42(6): 0605001.
- [2] Razeghi M. Deep ultraviolet light-emitting diodes and photodetectors for UV communications[C]. SPIE, 2005, 5729: 30-40.
- [3] Zhao T F, Li Q, Song P. A fast channel assignment scheme based on power control in wireless ultraviolet networks[J]. Computers & Electrical Engineering, 2016, 56: 262-276.
- [4] He Q F, Xu Z Y, Sadler B M. Non-line-of-sight serial relayed link for optical wireless communications[C]. Military Communications Conference, 2010: 11742523.
- [5] Zhao Taifei, Ke Xizheng, Feng Yanling. Technology research in the solar blind ultraviolet wireless network[J]. Optical Communication Technology, 2010, 34(7): 50-53.
赵太飞, 柯熙政, 冯艳玲. 大气日盲紫外无线光组网技术研究[J]. 光通信技术, 2010, 34(7): 50-53.
- [6] Vavoulas A, Sandalidis H G, Varoutas D. Node isolation probability for serial ultraviolet UV-C multi-hop networks [J]. Journal of Optical Communications & Networking, 2011, 3(9): 750-757.
- [7] Zhao Taifei, Ke Xizheng. Research on technologies in solar blind ultraviolet Ad Hoc network[J]. Application Research of Computers, 2010, 27(6): 2204-2207.
赵太飞, 柯熙政. 基于日盲紫外光通信的自组织网络技术研究[J]. 计算机应用研究, 2010, 27(6): 2204-2207.
- [8] Sun Baolin, Li Layuan. A QoS multicast routing protocol in Ad Hoc networks[J]. Chinese Journal of Computers, 2004, 27(10): 1402-1407.
孙宝林, 李腊元. Ad Hoc 网络 QoS 多播路由协议[J]. 计算机学报, 2004, 27(10): 1402-1407.
- [9] Ke Xizheng. UV self-organizing network theory[M]. Beijing: Science Press, 2011, 20-25.
柯熙政. 紫外光自组织网络理论[M]. 北京: 科学出版社, 2011, 20-25.
- [10] Li Jiye, Qiu Keni. Military application of UV communication[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2005, 3(4): 19-21.
李霁野, 邱柯妮. 紫外光通信在军事通信系统中的应用[J]. 光学与光电技术, 2005, 3(4): 19-21.
- [11] Li Jibo, Liu Xiguo, Wang Hongxing, *et al.* Improved ultraviolet communication time division multiplexing[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] Chen Mou, Li Xiaoyi, Wang Shentao, *et al.* Analysis of TDMA time slot allocation algorithm in ultraviolet Ad Hoc network[J]. Optical Communication Technology, 2016(1): 40-43.
陈谋, 李晓毅, 王申涛, 等. 紫外光 Ad Hoc 网络中的 TDMA 时隙分配算法分析[J]. 光通信技术, 2016(1): 40-43.
- [13] Wang L J, Li Y Y, Xu Z Y, *et al.* Wireless ultraviolet network models and performance in noncoplanar geometry[C]. IEEE Globecom 2010 Workshop on Optical Wireless Communications, 2010: 1037-1041.
- [14] Song P, Ke X Z, Song F, *et al.* Multi-user interference in a non-line-of-sight ultraviolet communication network[J]. IET Communications, 2016, 10(13): 1640-1645.
- [15] Song Peng, Song Fei, Li Yunhong, *et al.* Inter-link multi-user interference in non-line-of-sight ultraviolet communication network[J]. Acta Photonica Sinica, 2016, 45(9): 0906001.
宋鹏, 宋菲, 李云红, 等. 非直视紫外光通信组网多用户干扰问题[J]. 光子学报, 2016, 45(9): 0906001.
- [16] Zhou Ling, Wang Jianxin. Research on routing protocol in wireless multimedia sensor networks[J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(1): 149-156.
周灵, 王建新. 无线多媒体传感器网络路由协议研究[J]. 电子学报, 2011, 39(1): 149-156.
- [17] Che Bin, Feng Xi'an. A new routing protocol for the mobile ad-hoc network of the underwater nodes[J]. Technical Acoustics, 2007, 26(5): 915-918.
车斌, 冯西安. 一种新型水下移动自组织网络路由算法[J]. 声学技术, 2007, 26(5): 915-918.
- [18] Han Liqiang, You Yahui. Performance of multiple input multiple output free space optical communication under atmospheric turbulence and atmospheric attenuation[J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(7): 0706004.
韩立强, 游雅晖. 大气衰减和大气湍流效应下多输入多输出自由空间光通信的性能[J]. 中国激光, 2016, 43(7): 0706004.

- [19] Gagliardi R M, Karp S. Optical communications[M]. New York: Wiley, 1995.
- [20] Xu Z Y. Approximate performance analysis of wireless ultraviolet links[C]. IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing-ICASSP, 2007: 9497374.
- [21] Song Peng, Ke Xizheng, Xiong Yangyu, *et al.* Pulse broadening effect of non-line-of-sight ultraviolet in noncoplanar communication system[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(11): 1106004.
宋鹏, 柯熙政, 熊扬宇, 等. 非直视紫外光在非共面通信系统中的脉冲展宽效应[J]. 光学学报, 2016, 36(11): 1106004.
- [22] Sunstein D E. A scatter communications link at ultraviolet frequencies[D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 1968.
- [23] Ke Zhiheng, Cheng Rongxiang, Deng Dejuan. NS2 simulation experiment: Multimedia and wireless network communication[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2009: 31-38.
柯志亨, 程荣祥, 邓德隽. NS2 仿真实验: 多媒体和无线网络通信[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009: 31-38.
- [24] Huang Huaji, Feng Suili, Qin Lijiao, *et al.* NS network simulation and protocol simulation[M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2010: 129-139.
黄化吉, 冯穗力, 秦丽姣, 等. NS 网络模拟和协议仿真[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2010: 129-139.