

引用本文:马雅盼,汪井源,李建华,等. 新型无线紫外光协作通信网络性能分析与研究[J]. 光通信技术,2023,47(3):37-43.

新型无线紫外光协作通信网络性能分析与研究

马雅盼,汪井源,李建华*,徐智勇,苏洋

(陆军工程大学通信工程学院,南京 210016)

摘要:为进一步提高无线紫外光通信网络的信息传输质量和网络性能,提出了一种新型无线紫外光协作通信网络,网络中各节点采用解码转发方式,设定各节点优先级,从而实现了网络节点实时转发的协作策略。仿真分析了有无缓存设置和有无协作条件下无线紫外光通信网络的归一化吞吐量、各节点平均时延等性能。仿真结果表明:无缓存设置时,随着数据帧传输成功率的增加,高优先级节点一直有较高的归一化吞吐量,而低优先级节点数据帧丢失,归一化吞吐量下降;有缓存设置时,随着缓存的增加,各节点归一化吞吐量均有所增加;与无协作相比,有协作的紫外光通信网络具有更高的节点归一化吞吐量和平均时延。

关键词:紫外光通信网络;协作通信;归一化吞吐量;网络时延

中图分类号: TN929.12 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2023)03-0037-07

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2023.03.006

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Analysis and research on performance of novel wireless ultraviolet optical cooperative communication network

MA Yapan, WANG Jingyuan, LI Jianhua*, XU Zhiyong, SU Yang

(College Communication Engineering, Army Engineering University of PLA, Nanjing 210016, China)

Abstract: In order to further improve the information transmission quality and network performance of the wireless ultraviolet optical communication network, this paper proposes a novel wireless ultraviolet light cooperative communication network. The network nodes adopt the decoding and forwarding mode, and set the priority of each node, so as to realize the real-time forwarding cooperation strategy of network nodes. The paper simulates and analyzes the normalized throughput, average latency of each node of the new wireless ultraviolet light communication network with or without cache setting, and with or without cooperation. The simulation results show that when there is no cache setting, with the increase of the success rate of data frame transmission, the high-priority nodes always have higher normalized throughput, while the low-priority nodes lose data frames and the normalized throughput decreases. When cache is set, the normalized throughput of each node increases with the increase of cache. Compared with non-cooperation, cooperative ultraviolet light communication network has higher node normalized throughput and average latency.

Key words: ultraviolet light communication network, cooperative communication, normalized throughput, network delay

0 引言

紫外光通信作为一种新型通信方式,与其它无线通信方式相比,具有无需频率许可、频带宽、保密性能

收稿日期:2022-09-06。

基金项目:国家自然科学基金项目(62171463、61975238)资助。

作者简介:马雅盼(1996—),女,河南洛阳人,硕士研究生,现就读于陆军工程大学通信工程学院,主要从事无线光通信方面的研究工作,研究方向为紫外光通信与网络。

*通信作者:李建华(1976—),男,博士,副教授,主要研究方向为无线光通信、光纤通信与网络。



好、抗干扰能力强、灵活组网等优点。紫外光波长短,在大气信道传输中受到粒子的强散射作用,散射传播路径可绕过障碍物实现非视距(NLOS)通信,可用于障碍物多、电磁环境复杂等场景,具有重要的军事应用价值^[1]。

紫外光的散射特性使其非常便于组网,研究人员很早就开始关注紫外光通信组网的可能性并研究其网络性能。2006年,Ben-Gurion University^[2]探讨了包括无线传感器网络和自组织网络在内的紫外光通信网络方案,同时研究了紫外光链路模型。2011年,德国

马雅盼,汪井源,李建华,等:新型无线紫外光协作通信网络性能分析与研究

VAVOULAS A 等人^[3]对紫外光 NLOS 通信网络进行了深入研究,利用多个节点间的多跳传输方式扩大了紫外光通信网络的通信范围,通过对网络中链路连通性的研究,获得了不同网络参数及不同调制方式对紫外光通信网络性能的影响。同年,LI Y 等人^[4]根据无线定向网络中的邻居发现协议,提出了一种适用于紫外光通信网络的邻居发现协议,为紫外光通信网络节点及链路之间的研究提供了方向。WANG L 等人^[5]进一步研究了无线紫外光通信网络的互连特性。近年来,国内对紫外光通信组网也进行了一系列研究。张曦文等人^[6]为了改善无人机通信网络中机间紫外光进行定向通信时的“耳聋”问题,基于分簇式无人机通信网络模型提出了采用多信道的通信,同时也提高了网络吞吐量。徐正元团队^[7-8]提出了一种适合紫外光通信的节点媒质层接入控制(MAC)协议,同时研究并验证了多种空间复用的可行性。宋鹏等人^[9]针对空分复用的紫外光通信网络链路中多用户干扰的问题,基于紫外光多次散射模型及理论分析,利用蒙特卡洛方法研究了紫外光通信网络节点间误码率与链路参数的关系。陆军工程大学^[10-12]针对紫外光通信组网机理与性能等方面展开了初步研究。西安理工大学柯熙政、赵太飞等团队^[13-14,23]围绕紫外光通信网络节点定位算法和节点覆盖范围、紫外光通信中的多信道接入技术^[15-16]、无线紫外光网络连通性^[17-18]等方面展开了大量研究。

从现有的紫外光通信组网研究中可以看出,紫外光通信组网面临通信距离短、网络覆盖范围有限等问题,如果采用传统的中继转发方法,不仅不能有效利用信道资源,还会由于紫外光通信的速率低,导致本来较小的网络吞吐量进一步恶化。因此,针对当前紫外光通信缺乏与其相适应的有效组网方法以及网络性能不足(如吞吐量较小)等问题,本文提出一种新型无线紫外光协作通信组网方法。

1 新型无线紫外光协作通信网络

1.1 紫外光点对点 NLOS 通信模型

为了更好地利用紫外光散射通信的特点,紫外光通信一般采用 NLOS 的工作模式。紫外光点对点 NLOS 通信模型如图 1 所示。图 1 中, Tx 是发送端, ϕ_1 、 θ_1 为发送端的发散角和发送仰角; Rx 是接收端, ϕ_2 、 θ_2 为接收端的视场角和接收仰角。V 为发射紫外光束和接收紫外光束的重合部分,称为有效散射体, r 为收发端的通信距离, r_1 和 r_2 分别为发送端到有效散射体的距离和有效散射体到接收端的距离。通信模型的基本

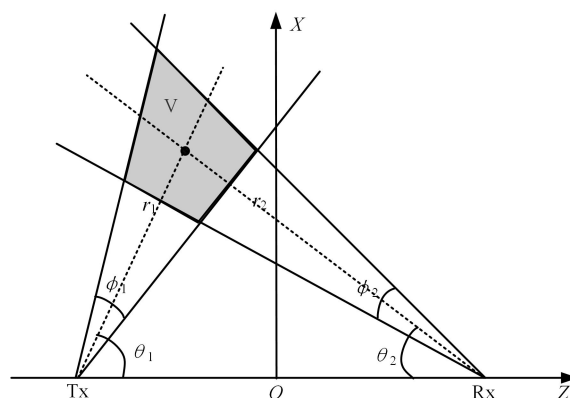


图 1 紫外光点对点 NLOS 通信模型

通信过程为:发送端发出紫外光信号,光信号经过有效散射体的散射到达接收端。

紫外光在空气中传播时损耗较严重,随着通信路径的增加,损耗呈指数形式递增。近距离无线紫外光 NLOS 通信的损耗公式为

$$I = \xi r^\alpha \quad (1)$$

其中, α 为路径损耗指数, ξ 为路径损耗因子。 ϕ_1 、 θ_1 、 ϕ_2 、 θ_2 共同决定了 α 和 ξ 的大小^[22]。现有研究表明^[19]:一般情况下, ϕ_1 和 ϕ_2 的取值分别为 17° 和 30° 时,链路性能较好。当发送端的发散角和接收视场角固定时,紫外光 NLOS 通信中不同 θ_1 、 θ_2 对应不同 α 和 ξ 的取值^[20]。

在紫外光通信中,节点的通信半径还取决于调制方式,常用的调制方式有开关键控(OOK)和脉冲位置调制(PPM)。本文选用“日盲区”紫外波段,背景光噪声较小,因此可以忽略背景光。采用 OOK 调制方式时的紫外光节点通信半径为

$$R_{\text{OOK}} = \sqrt[\alpha]{\frac{\eta \lambda P_t}{hc \xi R_b \ln(2P_e)}} \quad (2)$$

其中, λ 为波长; η 为滤光片和光电探测器的量子效率, $\eta = \eta_{\text{PMT}} \times \eta_f$, η_{PMT} 为光电倍增管的量子效率, η_f 为光学滤波器效率; P_t 为发送功率; R_b 为数据传输速率; P_e 为误码率; c 为光速, $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$; h 为普朗克常数, $h = 6.626\ 070\ 15 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ 。

针对网络节点行为和链路特征进行数字化描述,由此可建立相应紫外光通信网络的节点模型和链路模型。

1.2 新型无线紫外光协作通信网络原理

本文基于紫外光点对点 NLOS 通信模型,在一个区域内建立了 4 个节点的新型无线紫外光协作通信网络,其网络拓扑图如图 2 所示。在该网络中,4 个节点分别为 a、b、c、d,其通信范围分别为 A、B、C、D。网络中两两通信节点之间构成紫外光点对点 NLOS 链路,

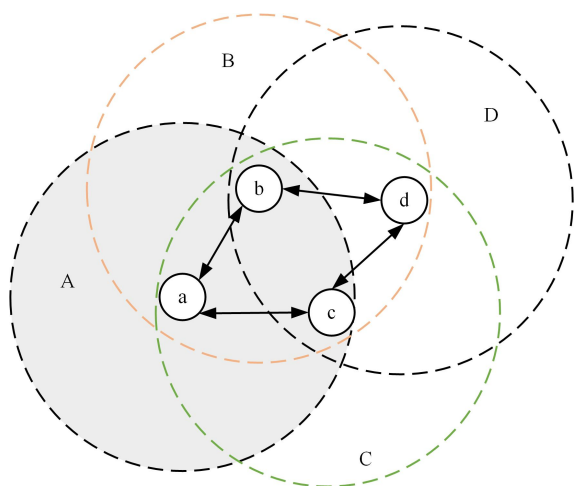


图2 新型无线紫外光协作通信网络拓扑图

链路之间的各个参数满足点对点 NLOS 链路的参数关系。基于紫外光通信的散射非直视特性,网络节点的光学天线表现为全向性,即网络中节点发送光信号时,在其通信范围内的任意节点均能接收到光信号,可视为广播数据。信道设定为单一波长信道,即多个网络节点共享单一波长信道。各节点间的通信通过竞争接入信道,通过竞争接入信道的节点为源节点,源节点发送数据到目的节点。源节点和目的节点之间的距离超出其各自通信范围,同时位于源节点和目的节点通信范围内的节点为协作节点,协作节点在源节点的数据传输时隙内实时帮助源节点转发数据到目的节点。

以节点 a 需要传输数据到节点 d 为例,节点 b、c 为中继转发节点。节点 d 因距离节点 a 较远,接收不到信息。如采用传统的中继转发方式,分为 2 个阶段:第一阶段,节点 a 发送信息到其通信范围内的节点 b、c,节点 b、c 完全接收该信息后,节点 a 停止发送信息;第二阶段,节点 b、c 确认信息的目的节点为节点 d,并将信息转发到节点 d。以上 2 个阶段分别是在不同的时隙完成的,这会恶化紫外光通信网络的性能。本文基于新型无线紫外光协作通信网络拓扑图,提出一种网络节点实时转发的协作策略。在该策略中,协作节点 b、c 接收信息与转发信息是在一个时隙内完成的。协作节点 b、c 接收到节点 a 的信息时,立即在节点 a 的数据传输时隙内进行转发,即协作节点是实时转发的,且在协作转发信息的过程中,源节点 a 一直在发送信息,直到目的节点完全接收协作节点的信息。

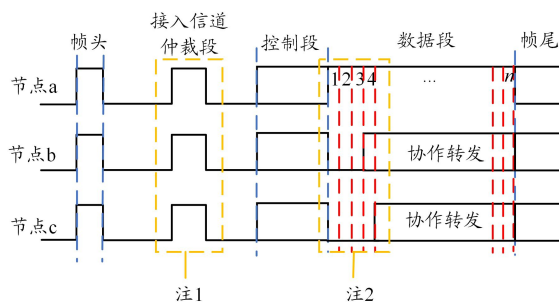
网络中各节点依据优先级的高低依次接入信道,设定优先级为:节点 a>节点 b>节点 c>节点 d,则本文提出的网络节点实时转发策略流程如下:

1)源节点 a 有传输数据需求且获得信道的使用权时,将每个数据传输时隙分成 K 个时间间隔。节点 b、c 位于节点 a 的通信范围 A 内,会先后收到节点 a 的紫外光信号,此时节点 b、c 进入协作转发状态,发送紫外光信号。

2)节点 b、c 在节点 a 的数据传输时间间隔内将处理过的信息实时向节点 d 发送。

3)目的节点 d 在节点 b、c 的通信范围 B、C 内,节点 d 接收到节点 b、c 经过处理的信息后,进行接收处理。

为完成以上实时转发过程,本文提出了新型无线紫外光协作通信网络中各节点的帧结构,如图 3 所示。与传统中继转发帧结构类似,该帧结构包括帧头、接入信道仲裁段、控制段、数据段和帧尾。其中,帧头和帧尾是数据的开始与结束,接入信道仲裁段中有数据传输需求的各节点根据优先级高低依次接入信道,控制段主要用于相应的网络管理,数据段是节点之间的通信数据。



注1:节点a、b、c以“1”表示有数据传输需求,根据节点优先级的高低,最高优先级节点a接入信道;
注2:节点b、c在节点a的通信范围A内,收到节点a的紫外光信号时进入协作转发状态。

图3 无线紫外光协作通信网络中各节点帧结构示意图

1.3 网络节点转发方式

节点 b、c 常用的协作转发方式有放大转发(AF)和解码转发(DF)等。图 4、图 5 分别是 AF 方式和 DF 方式的示意图。AF 方式分为 2 个阶段:在第一阶段,节点 a 以紫外发光二极管(LED)广播通信,向周围节点发送光信号,其中一路直接发送到目的节点 d,另一路发送到协作节点 b 和节点 c。在第二阶段,协作节点 b 和节点 c 将接收到的信号在光域进行放大,然后将其转发到目的节点 d。

DF 方式也分为 2 个阶段,第一阶段与 AF 方式相同。在第二阶段,协作节点 b 和节点 c 对信号进行解调、校验等电域处理之后,再调制成光信号转发到节点 d。

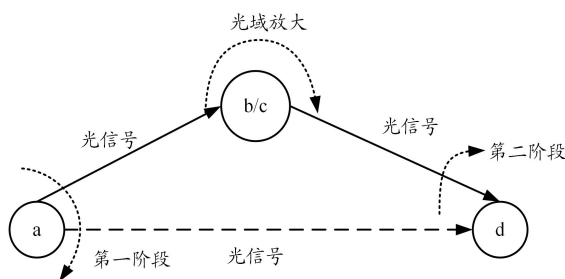


图4 AF方式示意图

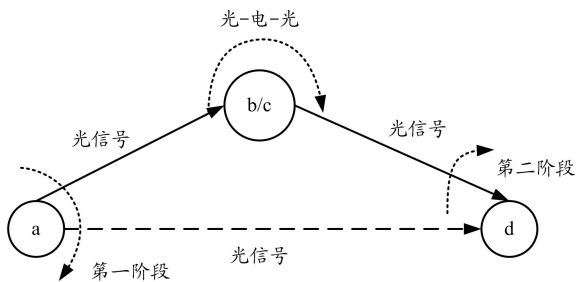


图5 DF方式示意图

从以上 AF、DF 方式的转发过程可以看出,AF 方式的协作节点 b、c 在放大有用光信号的同时,噪声也被放大,有噪声的积累,而 DF 方式避免了噪声对网络中下一链路的影响,因此本文中协作节点 b、c 选用 DF 方式。

2 无线紫外光协作通信网络性能分析

2.1 吞吐量

吞吐量是信道上成功传输的信息量。设帧长固定为 L (单位为 bit),且单位时间内成功传输的帧数为 n ,则吞吐量可一般表示为 $n \times L$ (单位为 b/s)。本文用信道传输速率 R (单位为 b/s)对吞吐量进行归一化处理,可定义归一化吞吐量 S 为

$$S = n \times \frac{L}{R} \quad (3)$$

传统无线紫外光网络中无协作转发时,设定节点优先级为节点 a>节点 b>节点 c>节点 d,各个节点的归一化吞吐量可分别定义为

$$S_a = \frac{P_a n L}{R} \quad (4)$$

$$S_b = \frac{(1-P_a) P_b n L}{R} \quad (5)$$

$$S_c = \frac{(1-P_a)(1-P_b) P_c n L}{R} \quad (6)$$

$$S_d = \frac{(1-P_a)(1-P_b)(1-P_c) P_d n L}{R} \quad (7)$$

其中, P_a, P_b, P_c, P_d 分别为节点 a、b、c、d 单位时隙内各节点数据帧传输成功的概率。

在新型无线紫外光协作通信网络中,各节点在发送数据时,在其通信范围内的其它节点也在其剩余时隙内帮助转发数据,则各节点归一化吞吐量可分别定义为

$$S_a = \frac{P_a n m L}{R} \quad (8)$$

$$S_b = \frac{(1-P_a) P_b n m L}{R} \quad (9)$$

$$S_c = \frac{(1-P_a)(1-P_b) P_c n m L}{R} \quad (10)$$

$$S_d = \frac{(1-P_a)(1-P_b)(1-P_c) P_d n m L}{R} \quad (11)$$

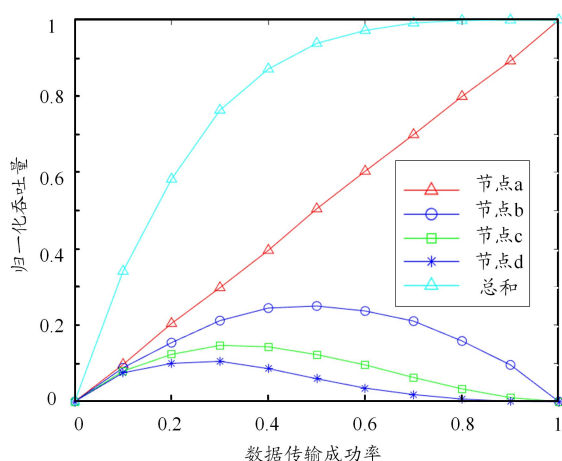
其中, m 为帮助各节点协作转发的节点个数。由此,新型无线紫外光协作通信网络的平均归一化吞吐量可表示为

$$S = \frac{S_a + S_b + S_c + S_d}{M} \quad (12)$$

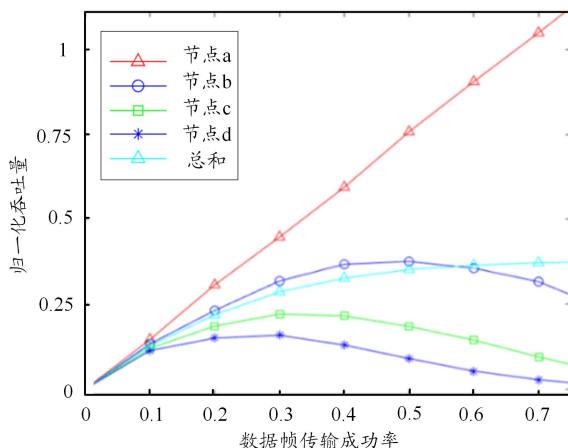
其中, M 为网络中的节点总数。

本文采用蒙特卡洛仿真方法进行网络性能仿真。设定仿真次数为 10 000 次,发送数据固定帧长为 500 bit,仿真分析了各节点无缓存设置时的吞吐量。节点无缓存设置意味着当节点竞争接入信道时,低优先级的节点在发送数据时因竞争信道失败而直接丢弃数据。无协作和有协作时,无缓存设置的无线紫外光通信网络中各节点吞吐量随数据帧传输成功率的变化情况如图 6 所示。

网络中各节点数据传输帧成功率越高表示节点传输的数据越多,网络负载越重。从图 6 可以看出,对于无缓存设置的无线紫外光通信网络,最高优先级节点 a 的归一化吞吐量与数据帧传输成功率成正比,且相较于其它节点,节点 a 一直保持着最高的归一化吞吐量。其它节点在数据帧传输成功率较小时,由于信道较空闲,其归一化吞吐量随着数据帧传输成功率的增加而增加,但当数据帧传输成功率增加到一定值时,信道资源更多被高优先级节点占用,此时,低优先级节点的数据帧丢失,归一化吞吐量会有所下降。图 6 中,最低优先级的节点 d 的数据帧最先被丢弃。数据帧传输成功率为 0 时各节点都没有信息传输,信道空闲,各节点归一化吞吐量及其总和为零;数据帧传输成功率为 1 时信道资源一直被优先级最高的节点 a 占用,节点 a 一直在发送信息,其它节点的归一化吞吐量就为零。另外,在无缓存设置的紫外光通信网络中,相比于无协作的无线紫外光通信网络,有协作的无线紫外光通信网络具有更高的节点吞吐量。



(a) 无协作



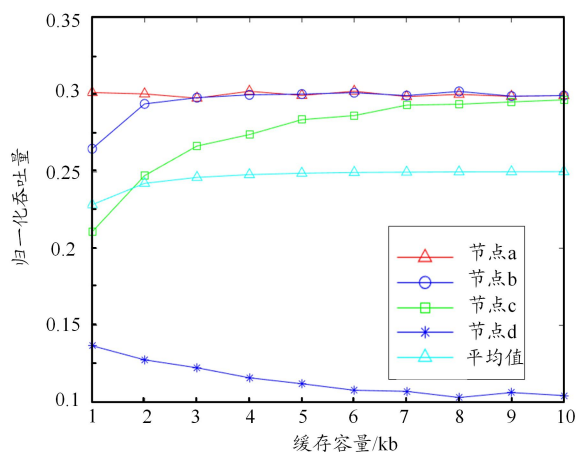
(b) 有协作

图6 无缓存设置的无线紫外光通信网络
归一化吞吐量随数据帧传输成功率的变化情况

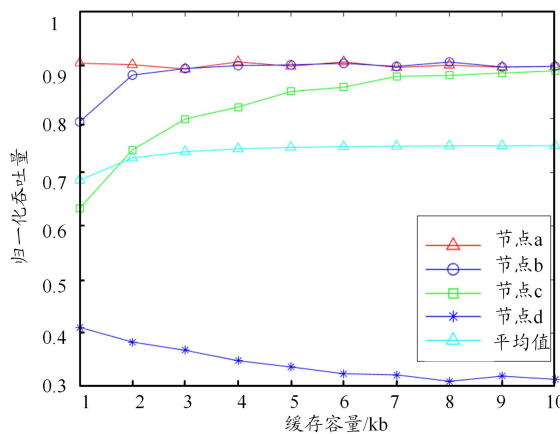
在实际网络节点设计中,为解决因竞争接入信道产生的冲突而导致低优先级节点数据丢失的问题,网络中各节点会引入一定的数据缓存容量。本文在仿真中发送数据包固定帧长为 500 bit,缓存容量设置为 1~10 kb,1 kb 缓存容量对应一个数据包。

若网络中有 N 个节点,则每个节点的数据帧传输成功率为 $1/N$ 时信道被充分利用,信道利用率达到最大化;高于 $1/N$ 时,信道繁忙,低优先级的数据被丢弃;低于 $1/N$ 时,信道竞争不激烈,各节点数据均能得到有效传输。在本文设计的新型无线紫外光协作通信网络中有 4 个节点,即当各节点的数据帧传输成功率为 0.25 时,信道的利用率达到最大化。当各节点数据帧传输成功率取 0.3,且节点引入缓存设置时,可获得无协作和有协作的无线紫外光通信网络各节点归一化吞吐量随缓存容量的变化情况,具体如图 7 所示。

从图 7 可以看出,在有缓存设置的无线紫外光通信网络中,最高优先级节点 a 的归一化吞吐量随缓存



(a) 无协作



(b) 有协作

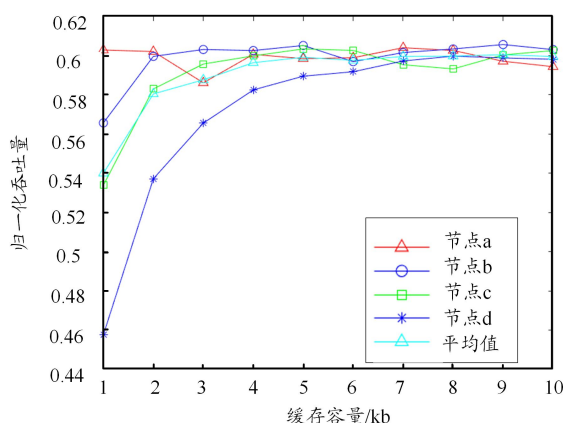
图7 有缓存设置的无线紫外光通信网络
归一化吞吐量随数据帧传输成功率的变化情况

容量的增加而增大,且一直保持着最高的归一化吞吐量;次优先级的节点 b 的归一化吞吐量仅低于节点 a;节点 b、c 的归一化吞吐量随着缓存容量的增加均得到有效的提升;对于优先级最低的节点 d,随着缓存容量的增加,更多的信道资源被高优先级的节点占用,其归一化吞吐量有所下降,在高缓存的情况下,甚至出现“饿死”的现象;相比无协作的无线紫外光通信网络,有协作的无线紫外光通信网络各节点具有更高的归一化吞吐量。

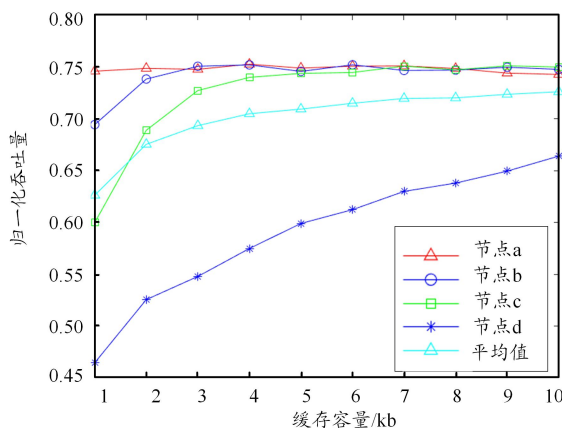
节点数据帧传输成功率为 0.2 和 0.25 时,无线紫外光协作通信网络中 4 个节点的归一化吞吐量及其平均值随缓存容量的变化如图 8 所示。可以看出,高优先级的节点 a 具有较高的数据处理能力,同时,由于数据产生概率相对较低,即网络负载较轻,节点竞争不激烈,所以随着缓存容量的增加,各节点的归一化吞吐量均较好且都能得到有效提升。

对比图 8 和图 7 可以看出,数据帧传输成功率分

马雅盼,汪井源,李建华,等:新型无线紫外光协作通信网络性能分析与研究



(a) 数据帧传输成功率为0.2



(b) 数据帧传输成功率为0.25

图8 有缓存设置的无线紫外光协作通信网络
归一化吞吐量随缓存容量的变化情况

别为0.2、0.25、0.3时，最高优先级的节点a的归一化吞吐量分别稳定在0.60、0.75、0.9，说明数据帧传输成功率越高，高优先级节点的数据处理能力越强；归一化吞吐量的平均值随着缓存容量的增加分别稳定在0.60、0.72、0.75，说明数据帧传输成功率越高、网络负载越重、网络越繁忙，信道资源更多地被高优先级节点占用。另外，在高缓存容量情况下最低优先级的节点d在数据帧传输成功率为0.25时的吞吐量最好，但是在数据帧传输成功率为0.3时出现“饿死”现象，网络节点公平性出现较大的恶化，因此应该避免网络出现高负载。

2.2 网络时延

网络时延也是衡量网络性能的重要指标之一，一般定义为将某一报文或者分组从网络的某一源节点传送到目的节点所需要的时间，若网络中存在缓存设置，网络时延即为某一帧数据从进入缓存开始，至成功到达目的节点并被正确处理的总时间。网络时延包

括传输时延、传播时延、排队时延。其中，传输时延 τ_1 取决于发送数据长度 x （单位为bit）和信道传输速率 R （单位为b/s），其表达式为

$$\tau_1 = x/R \quad (13)$$

传播时延 τ_2 是光信号以光速 c 在信道中传播一定距离 L 所需的时间，其表达式为

$$\tau_2 = L/c \quad (14)$$

由于光速大，所以传输时延一般可忽略。

排队时延则包括发送等待时间和接收处理时间，其中发送等待时间也称为接入时延，表示节点从有数据需要发送到实际发送的时间间隔，可用于反映单个节点的接入效率；接收处理时间是指各节点在收到数据时要花费一定的时间进行处理，当协作节点采用DF方式时，对信息进行解调、校验、再编码等处理产生的时延。

网络时延的主要影响是由接入时延造成的。另外，对于新型无线紫外光协作通信网络来说，协作节点的处理时延也是造成网络时延的主要原因。因此，本文主要分析接入时延和处理时延。

数据帧传输成功率为0.2时，在保证紫外光通信网络中各节点数据均得到有效传输，且具有较好的归一化吞吐量情况下，各节点在无协作和有协作时的平均时延及所有节点平均时延的平均值随缓存容量的变化情况如图9所示。可以看出，无论有无协作，各节点平均时延及所有节点平均时延的平均值都随着网络中缓存容量的增加而增加，且网络节点的平均时延

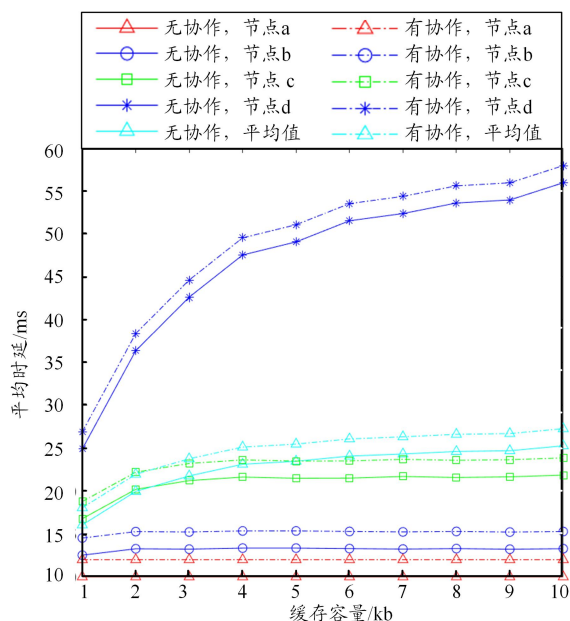


图9 紫外光通信网络节点平均时延与缓存容量的关系

随节点优先级的降低而增大,优先级最低的节点,其平均时延越高。这是由于对于低优先级节点而言,缓存容量越大,数据在缓存中等待的时间就越长。另外,有协作的紫外光通信网络的节点平均时延要高于无协作的紫外光通信网络,这是由于节点参与协作时,处理时延的增加导致了网络平均时延增加。

从以上仿真研究和结果分析可以看出,新型紫外光协作通信网络虽然可以有效提高网络吞吐量,但需要以增加一定的网络时延为代价。

3 结束语

本文提出了一种新型无线紫外光协作通信网络,设计了网络节点的实时转发策略,仿真分析了在有缓存设置和有无协作时新型无线紫外光协作通信网络中各节点的归一化吞吐量和平均时延。仿真分析和研究结果表明:无缓存设置时,随着数据帧传输成功率增加,高优先级节点一直有较高的吞吐量,低优先级节点数据帧丢失,吞吐量下降;有缓存设置时,随着缓存容量增加,各节点归一化吞吐量有所增加;与无协作相比,新型无线紫外光协作通信网络以增加一定平均时延为代价,有效提高了网络的归一化吞吐量。本文的研究为下一步新型无线紫外光协作通信网络的性能优化和实验平台搭建提供了理论依据。

参考文献:

- [1] 李海涛,李晓毅,叶永桢,等. 紫外光通信及其军事应用前景[J]. 信息通信, 2016(12): 60-62, 66.
- [2] KEDAR D, ARNON S. Non-line-of-sight optical wireless sensor network operating in multiscattering channel [J]. Appl. Opt., 2006, 45(33): 8454-8461.
- [3] VAVOULAS A, SANDALIDIS H, VAROUTAS D. Connectivity issues for ultraviolet UV-C networks [J]. Optics Communications, 2011, 3(3): 199-205.
- [4] LI Y, WANG L, XU Z, et al. Neighbor discovery for ultraviolet ad hoc networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2011, 29: 2002-2011.
- [5] WANG L, LI Y, XU Z. On connectivity of wireless ultraviolet networks [J]. Journal of the Optical Society of America A, 2011, 28(10): 1970-1978.
- [6] 张曦文,赵尚弘,李勇军. 紫外光通信组网技术研究[J]. 光通信技术, 2015, 39(8): 47-49.
- [7] GANG C, ZHENG Y X, HAI P D, et al. Sadler 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.
- [8] ZHENG Y X, HAI P D, BRIAN M, et al. Analytical performance study of solar blind non-line-of-sight ultraviolet short-range communication links [J]. Optics Letters, 2008, 33(16): 1860-1862.
- [9] SONG P, KE X, SONG F, et al. Multi-user interference in a non line of sight ultraviolet communication network [J]. IET Commun., 2016, 10(13): 1640-1645.
- [10] LI C, LI J, XU Z, et al. Study on the k-connectivity of UV communication network under the node distribution of RWP mobility model in the arbitrary Polygon area[J]. IEEE Photonics Journal, 2020, 12(4): 7903912-1-7903912-13.
- [11] LI C, LI J, XU Z, et al. Study on the k-connectivity of ultraviolet communication network under uniform distribution of nodes in a circular region [C]//IEEE. 2019 IEEE 5th International Conference on Computer and Communications (ICCC). Chengdu: IEEE, 2019: 797-802.
- [12] 徐智勇,沈连丰,汪井源,等. 无线光通信中紫外散射传播特性的研究[J]. 光通信技术, 2009, 33(11): 56-59.
- [13] 何华,柯熙政,赵太飞,等. 无线“日盲”紫外光网格网中的定位研究[J]. 激光技术, 2010, 34(5): 607-610.
- [14] ZHAO T F, GAO Y Y, ZHANG Y. An area coverage algorithm for non-line-of-sight ultraviolet communication network[J]. Photonic Network Communication, 2016, 32(2): 269-280.
- [15] 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, 2013, 32(3): 22-29.
- [16] ZHAO T F, LI Q, PENG S. A fast channel assignment scheme based on power control in wireless ultraviolet networks[J]. Computers and Electrical Engineering, 2016, 56: 262-267.
- [17] ZHAO T, XIE Y, ZHANG Y. Connectivity properties for UAVs networks in ireless ultraviolet communication [J]. Photonic Network Communication, 2018, 35(3): 316-324.
- [18] ZHAO T F, GAO Y Y. A networking strategy for three-dimensional wireless ultraviolet communication network[J]. Optik, 2017, 151: 123-125.
- [19] CHEN G, XU Z, DING H, et al. Path loss modeling and performance trade-off study for short-range non-line-of-sight ultraviolet communications [J]. Optics Express, 2009, 17(5): 3929-3940.
- [20] 张里荃. 紫外光大气传输特性的模拟研究[J]. 吉林大学学报(信息科学版), 2012, 30(5): 534-539.
- [21] 马愈昭,程飞帆,贾惠婷,等. 雾天环境下 SIMO NLOS 紫外光通信系统性能研究[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(11): 140-148.
- [22] 袁仁智,王志峰,彭木根. 紫外光通信散射信道模型分析与发展现状[J]. 电信科学, 2021, 37(6): 45-54.
- [23] 赵太飞,刘昆,姚佳彤,等. 无线紫外光协作无人机编队邻居发现方法[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(1): 134-141.