

无线紫外光散射通信中多信道接入技术研究

赵太飞 王小瑞 柯熙政

(西安理工大学自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048)

摘要 针对无线紫外光散射通信 MAC 层多信道接入技术的特点, 结合紫外光散射通信的基本原理, 对紫外光非直视通信的三种工作方式进行分析, 在通信节点处配置多套紫外收发器的情况下, 建立了紫外光通信的节点模型和信道模型, 进行多信道的接入研究。利用 NS2 仿真软件, 对紫外光非直视的三种多信道通信方式在不同的拓扑结构下进行了仿真, 结果表明, 该紫外光多信道接入技术能在一定程度上利用多个信道同时进行通信, 大大增加网络的有效吞吐量。

关键词 光通信; 紫外光; 非直视; 多信道; 接入协议

中图分类号 TN929.9 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0306001

Research on Multi-Channel Access Technology in Wireless UV Scattering Communication

Zhao Taifei Wang Xiaorui Ke Xizheng

(Faculty of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology,
Xi'an, Shaanxi 710048, China)

Abstract The multi-channel access technology of MAC (Media Access control) is studied for wireless UV light scattering communication. The three modes of UV (ultraviolet light) NLOS (no-line-of-sight) communication are analyzed. Multi-interface and multi-channel sets of UV transceiver are deployed in each node. Both the communication node model and the UV channel model are established, and the access technology of multi-channel is studied. Three modes of UV NLOS multi-channel communication are stimulated in different topologies with NS2. The results show that the UV multi-channel access technology can increase the effective network throughput with using multiple channels.

Key words optical communicaitons; ultraviolet light; no-line-of-sight (NLOS); multi-channel; access protocol

OCIS codes 060.2605; 060.4251; 060.4510; 060.4250

1 引 言

紫外光是一种波长在 10~400 nm 的光波, 由于在这一波长范围内的紫外光随波长变化而表现出不同特性, 所以通常把紫外光划分为近紫外 (NUV, 400~315 nm), 中紫外 (MUV, 315~280 nm), 远紫外 (FUV, 280~200 nm), 极端紫外 (EUV, 200~10 nm) 四个波段^[1]。无线紫外光通信的基本原理就是以紫外光作为信息传输的载体, 把需传输的信息加载到紫外光上, 以实现信息的发送和接收。

在紫外光通信中, 媒体存取控制 (MAC, Media access control) 协议是网络的研究关键, 它主要控制多个用户如何高效、合理地共享有限的无线信道资源, 它的主要目标是在解决多个节点公平接入共享信道的基础上尽量提高信道的利用率。单信道面临的一个问题是当接入终端数量增加时, 由于出现很高的竞争和冲突, 使得网络性能迅速地降低。为了提高紫外光的通信性能, 可以通过使用高敏感度的探测器和大直径的天线来扩大紫外通信距离^[2], 还

收稿日期: 2011-07-27; **收到修改稿日期**: 2011-10-09

基金项目: 国家自然科学基金(61001069)、西安市科技计划[CXY1012(2)]、陕西省自然科学基金(2011JQ8028)和陕西省教育厅科研计划(2010JK739, 08JK386)资助课题。

作者简介: 赵太飞(1978—), 男, 博士, 副教授, 主要从事紫外光通信网络和无线光通信等方面的研究。

E-mail: zhaotaifei@163.com

可以通过在节点处设置多套收发器,进行多信道接收和转发,提高网络的性能。本文主要结合了紫外光通信的特点,设计了一种定向的多信道 MAC 层信道接入协议,并对其进行了仿真分析。

2 紫外光通信的信道模型

紫外光通信系统主要由发射端、大气信道及接收端三部分组成,当紫外光在大气信道中进行传输时,FUV 段紫外光表现出很强的散射特性和“日盲”特性^[3],其工作模式可以分为:直视方式(line of sight)和非直视方式(non-line-of-sight, NLOS)。直视方式是指发射和接收端之间没有障碍物,非直视方式就是指传输的光信息可以绕开通信两端之间障碍物的通信模式。在紫外光散射通信系统中,大气空间作为通信信道,因此紫外光信号在传输的过程中会受到大气分子的吸收、散射作用以及大气湍流效应的影响。

当通信系统设备、背景噪声和大气信道特性确定时,发送接收端所处位置组成的几何空间将决定

了近距离散射通行的效果,因此,必须针对紫外光链路的散射信道进行几何分析,直视传输和非直视传输的几何图形如图 1 所示^[4]。图 1(a)中发送端和接收端进行直视传输,发射端光源以发散角 ϕ_1 向空间发出光信号,接收器的视场角为 ϕ_2 进行接收,两个角度共同的重叠区域为有效散射区域 V ,实际的通信过程中有许多光子并不经过散射而是直接到达接收端实现通信,因此直视通信的信道容量比较大、通信质量比较高、相对通信距离比较远;图 1(b)中发射端光源以发散角 ϕ_1 和发射仰角 θ_1 向空间发出光信号,接收器以视场角 ϕ_2 和接收仰角 θ_2 进行光信号接收,发射光束与接收视场在空间的重叠区域 V ,大气形成一个收发连接的有效散射体,发射光信号经过大气的吸收和散射到达散射体,接收端接收来自该散射体对光信号的散射,这样就完成了信号的非直视传送。通常散射光都很微弱,由图 1(b)分析可知可以通过增大接收视场和调整发送仰角以便接收到更多的散射光,来增加有效通信范围。

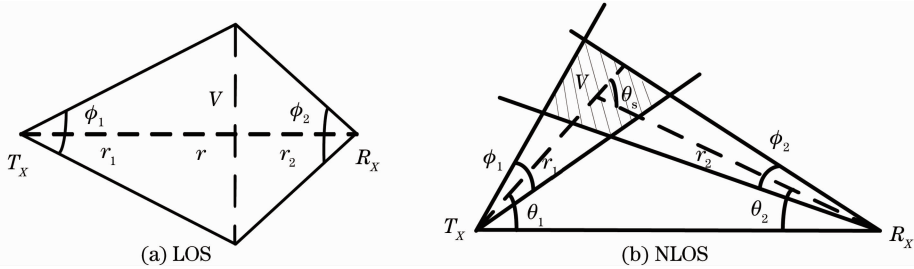


图 1 紫外散射光链路分析
Fig. 1 UV scattering link analysis

紫外光 NLOS 链路的接收光功率的表达式为^[5]

$$P_{r,NLOS} = \frac{P_t A_r K_s P_s \phi_2 \phi_1^2 \sin(\theta_1 + \theta_2)}{32\pi^3 r \sin \theta_1 \left(1 - \cos \frac{\phi_1}{2}\right)} \exp\left[-\frac{K_e r (\sin \theta_1 + \sin \theta_2)}{\sin(\theta_1 + \theta_2)}\right], \quad (1)$$

其中消光系数为 $K_e = K_a + K_s$, 式中 K_a 为吸收系数, K_s 为散射系数, P_s 为散射角 θ_s 的相函数, A_r 为接收孔径面积, 从(1)式可以看出通信设备放置角度、通信距离、接收孔径面积、大气特性决定了通信的效果, 因此利用多信道的接入, 可以提升多个用户同时通信的能力, 并且利用转发功能增加通信距离。

3 紫外光通信非直视链路和节点模型

紫外光散射通信系统能以非直视方式传输信号, 从而能适应复杂的地形环境, 克服了其它自由空

间光通信系统必须工作在可直视方式的弱点, 因此我们主要对紫外光非直视通信进行研究。

根据光轴和水平轴之间的夹角, 紫外光 NLOS 通信可以分为 NLOS(a)、NLOS(b)和 NLOS(c)三种通信方式。如图 2 所示, 在(a)方式下, 发送端和接收端仰角均为 90° , 发送端、接收端都朝天, 即全向发送全向接收。在(b)方式下, 发送端仰角小于 90° , 接收端仰角为 90° , 即定向发送全向接收。在(c)方式下, 发送端仰角小于 90° , 接收端仰角小于 90° , 即定向发送定向接收^[6]。

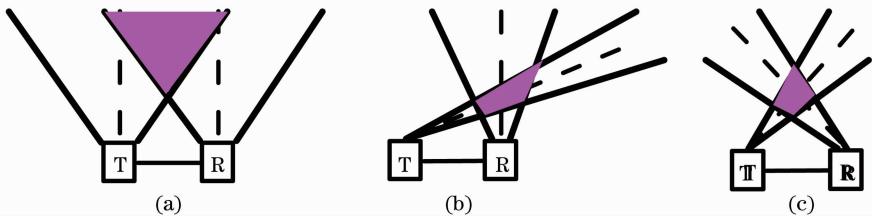


图 2 紫外光非直视通信的三种方式

Fig. 2 Three types of UV NLOS communication

紫外 NLOS(a)通信方式用非直视通信模型来分析,此时发送端、接收端都朝天,散射后的紫外光覆盖范围为一个圆形区域^[7],每个方向的通信距离都相等,此种通信方式信号覆盖范围小,通信效果和传输距离都非常有限,并且通信性能不好,带宽窄、延时大及信号失真严重;而对于紫外 NLOS(c)通信方式,其发送端仰角小于 90°,接收端仰角小于 90°,此种情况紫外光通信主要考虑前向散射,但是在发射端附近也存在一定的后向散射,采用此种通信方式时为了达到较好的通信效果,接收端一定要在前向散射覆盖范围之内,此通信方式性能较好、带宽大、延时小,但是覆盖范围有较强的方向性;而紫外 NLOS(b)通信方式的通信性能介于 NLOS(a)和 NLOS(b)之间,通信性能和通信方向性之间实现了一定的折中。紫外光通信对方向和角度比较敏感,所以实现通信组网时需要充分考虑方向性和方位性。因此,本文中每个节点处设置多个接口,每个接口放置一套收发器,每套收发器可以采用不同的信道,每套紫外收发器通信时分别具有一定的方向性覆盖范围,多收发器的节点通信示意图如图 3 所示。

图中节点 A 拥有两个紫外接口,可以和节点 B、E 进行通信。节点 B 有三个紫外接口,分别用于和节点 C、D、A 进行通信。网络拓扑确定时,网络中每个节点的接口数就固定,每个接口对应一个固定的信道。

紫外光非直视通信的三种工作方式,在不同的方向上有不同的覆盖范围,因此紫外光多信道模型

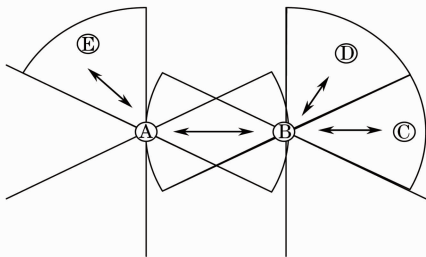


图 3 紫外多收发器节点通信示意图

Fig. 3 Schematic of UV multi-transceiver node communication

可以把空分复用和频分复用结合起来,即在不同方向上的节点设置不同波长的紫外光 LED^[8],不同的信号加载到不同波长的紫外光上发射出去,经过大气的散射,在接收端设置一个带通的滤光片,把信号进行过滤,经过探测器的放大^[9],再经过解调,就可以得到发射的原信号,即实现紫外光的多信道通信,如图 4 为日盲滤光片不同光波长的透射率图^[10],可以实现紫外光的多信道复用。

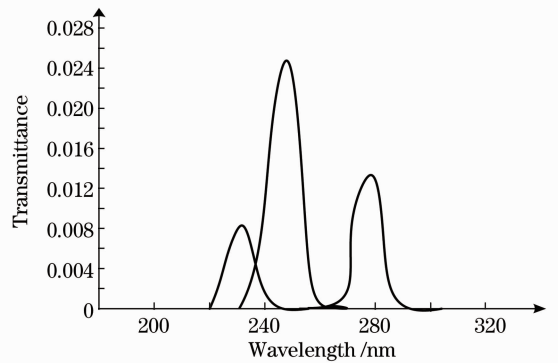


图 4 滤光片透射率图

Fig. 4 Diagram of filter's transmittance

4 NS2 仿真中紫外光节点模型

射频通信的载波是高频的电磁波,在传播的过程中碰到不同的介质传播速率会发生变化,也会发生电磁波反射、折射和绕射等从而引起损耗,图 5 是 NS2 仿真软件中原有的无线射频通信节点模型。紫外光通信的载波是紫外光,虽然光也是一种电磁波,但是其频率远比射频的高,主要是靠大气的散射进行通信,在通信的过程中易受到大气中各种成分、天气和气候条件等的影响,和射频通信的通信机理完全不同,因此需要针对紫外光通信节点模型进行研究,图 6 是本文提出的紫外光节点模型。通过对比分析射频通信和紫外光通信节点模型可以发现,紫外光节点模型的本质是对物理层、链路层的模型组件 LLC、IFQ、MAC、NetIF 和 channel 等进行了重新的配置。紫外光通信节点的每个接口配置一套

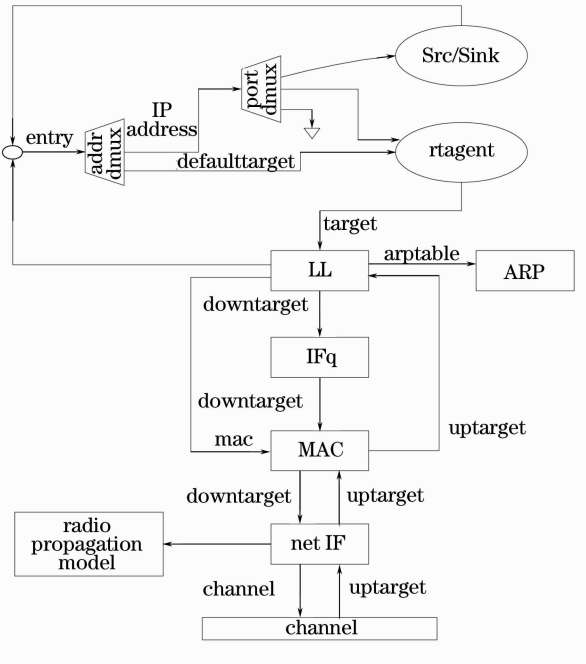


图 5 无线节点模型^[11]

Fig. 5 Model of wireless node^[11]

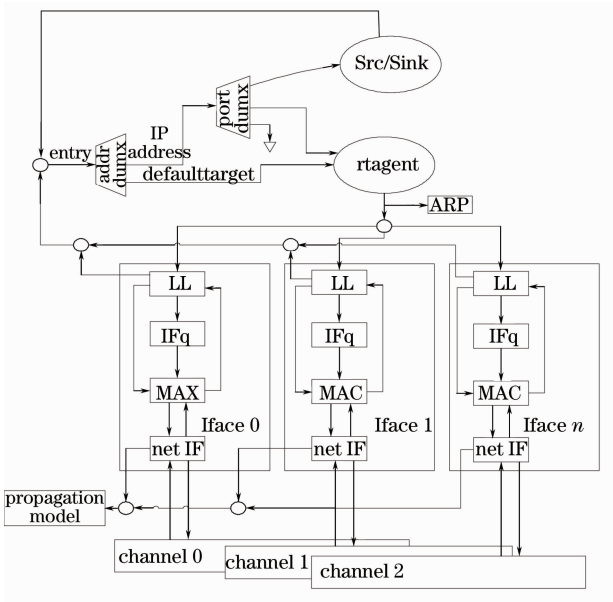


图 6 紫外多收发器节点模型

Fig. 6 Model of UV multi-transceiver node

紫外收发器,对于传输到信道的数据包信道根据其物理地址的不同送给不同的接口进行收发。针对传输数据包所使用接口的号码,需要对链路层文件进行修改,链路层连接的 ARP(Address Resolution Protocol)模块能够解析出数据包使用的接口号,然后数据包根据接口号被传入相应的队列中,再到相应的 MAC 层,最后就通过相应的网络接口传给信道,信道接收后选择合适的接口往上传数据包。文

献[12,13]是对 Ad hoc 网络进行了多接口的仿真,本文在此基础上,对紫外光散射通信的多接口多信道模型进行了配置和实现。

紫外光散射通信中多接口多收发器节点模型实现步骤如下:

1) 在 ns-lib.tcl 文件中,首先需要添加节点接口个数的 Simulator 过程—numifs 来定义节点的接口个数 numifs,然后在节点配置 node-config 的过程中加入接口个数 numifs 这个变量。另外在 Simulator 类中有一个成员变量 chan,代表 Simulator 中使用的信道,如果不进行多接口的扩展,那么它是一个单值,如果进行多接口扩展,它就是一个数组。进行多接口扩展,chan 的数组设置有两种方法,一是修改 Simulator 类处理 channelType 参数的过程,为 chan 数组的每个信道赋成同类型的不同信道,另一种方法是在 ns 运行的脚本中添加 chan 数组赋值命令。

2) 在 ns-mobilenode.tcl 中,添加网络接口过程 add-interface 只被调用了一次,所以要在这个过程中加入一个 for 循环,根据节点接口的个数分别创建相应个数的链路层、队列、MAC 层、网络接口、天线,最后把多个网络接口关联到信道上。

3) NS2 中 ARP 地址解析协议模块负责解析出分组的下一跳目标节点的物理(MAC)地址,该分组就放入接口队列中。由于 ARP 依赖于节点的地址,对于有多个接口的节点不再适用。在链路层 ll.cc 文件中添加了 add-arp-entry 命令后可以方便的在脚本中手动设置 ARP 表,相应的 arp.cc,arp.h 文件也进行修改,分别添加 arpadd 函数的声明及实现。在添加的 ARP 表中指定节点的下一跳的物理(MAC)地址,不同 MAC 对应不同的网络接口,不同的紫外光源。

紫外光非直视传输模型的建立,主要是通过紫外光非直视通信链路接收光功率的计算(1)式,在 NS2 软件中的 Two-Rayground 模型添加紫外非直视通信传输模型。

5 紫外光非直视多信道通信协议描述

文献[10]虽然对无线紫外光通信的 MAC 层进行理论分析和协议设计,但是只分析了单信道的情况,而多信道情况没有涉及,并且没有在实际的路由协议下进行仿真。因此,本文无线紫外光散射通信定向静态路由协议主要是在传统 AODV(Ad hoc On-Demand Distance Vector Routing)协议基础上

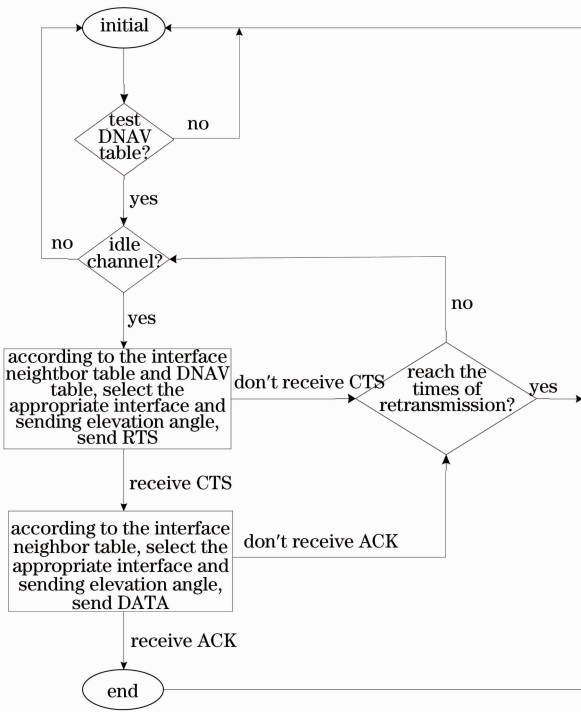


图 7 发送节点流程

Fig. 7 Flow chart of sending node

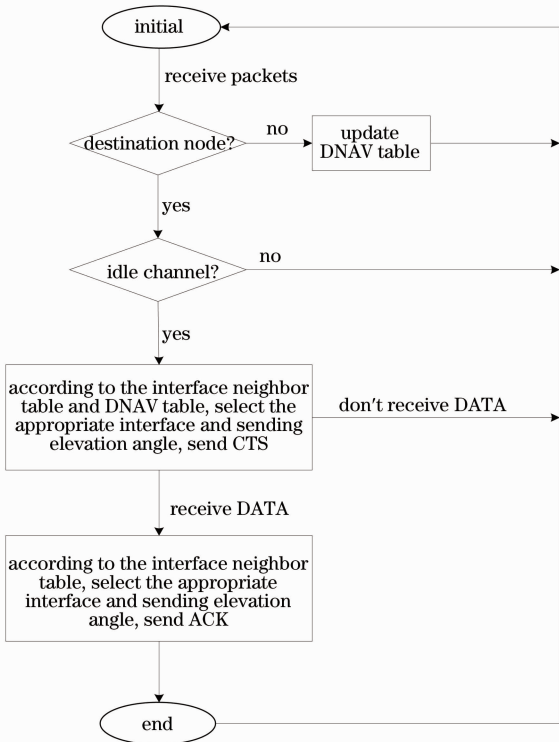


图 8 接收节点流程

Fig. 8 Flow of receiving node

进行修改的,图 7 和图 8 是紫外光定向静态路由协议发送节点和接收节点的流程图,该协议主要包括信道空闲的判定、RTS/CTS 帧的交换、数据的发送和接收三个过程,具体如下:

1) 判定信道是否空闲

紫外光定向静态路由协议在通信前,网络中节点处于空闲信道扫描模式,假设节点 1 要向节点 2 发送数据,节点 1 就要判定信道是否空闲。在判定前,节点 1 首先要检测 DNAV(Directional Network Allocation Vector),否则,节点回到初始的空闲信道扫描模式。

2) 交换 RTS/CTS(Request to Send/Clear to Send)

当节点 1 判定信道空闲的时候,节点 1 就检测接口邻居表中是否有节点 2,如果有则节点就选择 DNAV 表中 DNAV 值为零的所有接口,根据接口邻居表中相应的发送仰角发送 RTS 帧;否则,节点选择 DNAV 表中 DNAV 值为零的所有接口中发送仰角最小的接口发送 RTS 帧,这样做的目的是为了在信道预约(RTS/CTS 帧的交换)过程中尽量减少传输所需的跳数。当节点 2 收到节点 1 发给自己的 RTS 帧后,选择 DNAV 表中 DNAV 值为零的所有接口,根据接口邻居表中相应的发送仰角发送 CTS 帧。节点 1 收到 CTS 帧后,说明信道预约成功,等待 SIFS 时间后进行 DATA 的发送;否则,节点 1 认为此次信道预约失败,转入退避过程,重新竞争接入信道。并且节点 1 和节点 2 的邻居节点分别根据接收到 RTS 帧和 CTS 帧进行 DNAV 表的更新。

3) 数据的发送和接收

当节点 1 成功与节点 2 进行 RTS/CTS 交换后,说明信道预约成功。节点 1 就根据接口邻居表,选择对应节点 2 方向的接口号向节点 2 发送 DATA。当节点 2 收到节点 1 发给自己的 DATA 后,也根据接口邻居表,选择对应节点 1 方向的接口号回复 ACK 确认帧,节点 1 成功收到 ACK 帧后,证明此次数据传输成功。

经历以上三个过程就可以实现无线紫外光散射通信,发送节点和接收节点按照紫外光定向路由协议进行选路,并且将信息传输到预定的目标节点。

6 仿真与实验分析

6.1 链状拓扑仿真分析

为了分析紫外光非直视多接口多信道通信的性能,在 NS2 软件中进行了仿真。对于三种紫外光非直视通信工作方式的收发仰角分别设置为 NLOS(a)(90°,90°),NLOS(b)(30°,90°),NLOS(c)(20°,60°),对于紫外 NLOS(b)和 NLOS(c)定向通信的覆盖范围简化为扇形,覆盖范围的角度大小设置为

45°,节点间的通信距离为 200 m。对紫外光非直视通信的三种通信方式的网络性能分别对其链状和网状拓扑结构下的吞吐量进行仿真,可用信道为 3 个,数据包的长度为 1000 个字节,仿真时间为 100 s。

链状结构如图 9 所示,节点个数为 6 个,图 10 为在该链状结构下对紫外光 NLOS(a),(b),(c)三类进行仿真的结果,图中为不同通信方式和不同信道数情况下的网络吞吐量。

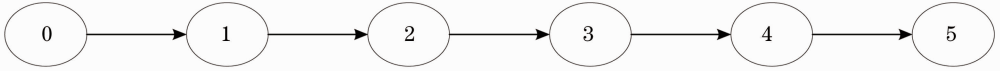


图 9 链状拓扑

Fig. 9 Chain topology

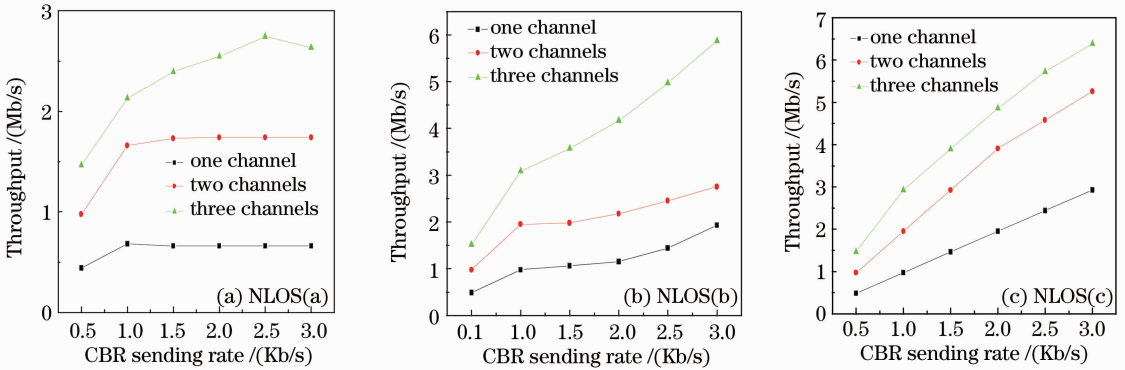


图 10 不同通信方式下链状拓扑仿真图

Fig. 10 Simulation diagrams of different communication modes in chain topology

从图 10 可以看出,在单信道时,由于 NLOS(a) 通信方式是全向发送全向接收,当其中的一对节点 1 和 2 在通信的时候,节点 3 会收到节点 2 的发送而判定信道忙,等待节点 1 和节点 2 之间通信结束才向其他节点发送数据,所以此时吞吐量较低,但是其吞吐量曲线比较平稳;对于 NLOS(b)通信方式来说,由于其定向发送全向接收,当接收节点全向接收的时候容易产生定向隐藏终端,比如节点 1 向节点 2 定向发送信息,节点 2 全向接收,这时节点 3 定向的向节点 2 发送信息,就会对节点 2 造成干扰,吞吐量较低,随着数据速率的增加,其吞吐量逐渐减小; NLOS(c)通信方式采用定向发送定向接收,就提高了信道的空分复用率,其吞吐量相比前两种通信方式其吞吐量显著提高,吞吐量曲线也是呈上升趋势,通信性能达到了最优。

从图 10 中还可以看出,不管哪种通信方式,单信道的网络吞吐量是最低的,而双信道和三信道通信时,三种通信方式的吞吐量都明显的增加。NLOS(a)通信方式吞吐量曲线比较平稳,最大值分别达到了约 2 M和 3 M;NLOS(b)通信方式在双信道和三信道时吞吐量成缓慢上升趋势,吞吐量的最大值分别约为 3 M和 5 M;NLOS(c)通信方式下,双信道和三信道通信时的吞吐量曲线急速上升,吞吐量的最大值约

为 5.5 M 和 6.5 M。

6.2 格形拓扑仿真分析

同样的初始条件下,紫外光非直视通信收发仰角的设置分别为 NLOS(a) (90°, 90°), NLOS(b) (30°, 90°), NLOS(c) (20°, 60°),对于紫外 NLOS(b)和 NLOS(c)定向通信的覆盖范围简化为扇形,覆盖范围的角度大小设置为 45°,节点间的通信距离为 200 m。5×5 的格形结构,如图 11 所示。仿真中每个接口的可用信道为 3 个,数据包的长度为 1000 个字节,仿真时间为 100 s,具体的仿真结果如图 12 所示。

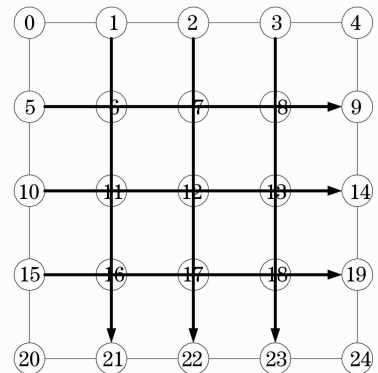


图 11 网状拓扑

Fig. 11 Mesh topology

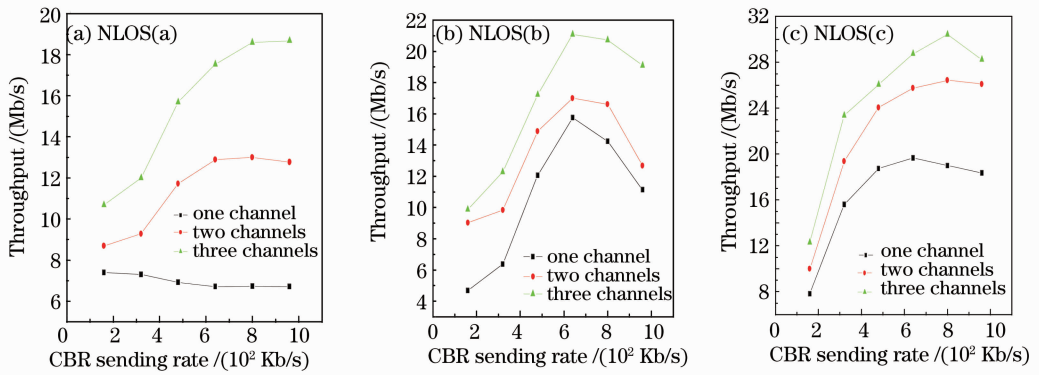


图 12 不同通信方式下网状拓扑仿真图

Fig. 12 Simulation diagrams of different communication mode in mesh topology

通过图 12 中图(a)~(c)的对比分析,可以看出采用紫外 NLOS(c)类通信方式网络的吞吐量最大,这是因为定向通信会提高信道的空分复用率。采用紫外 NLOS(c)类通信方式时信道空分复用率的增加极大的弱化了耳聋问题对网络的影响,而采用紫外 NLOS(b)类通信方式时在通信速率小于 500 Kb/s 的情况下,信道的空分复用率的优势可以弱化定向隐藏终端的影响,但是随着通信速率的增加,单信道情况下定向隐藏终端问题加剧,定向隐藏终端的存在极大减弱了信道空分复用率对网络性能的提高。

图 12 中还可以看出,不管哪种通信方式单信道的网络吞吐量是最低的,而双信道和三信道通信时,三种通信方式的吞吐量都明显的增加。NLOS(a)通信方式吞吐量曲线比较平稳,随着信道数目的增加网络吞吐量的增加明显;NLOS(b)通信方式在双信道和三信道时吞吐量快速上升,当网络负载过大时网络吞吐量有一定的下降;NLOS(c)通信方式下,双信道和三信道通信时的吞吐量曲线急速上升,当网络负载过大时网络吞吐量略微下降。

仿真的结果还表明,随着信道数目的增加,网络吞吐量增大,并且随着节点数的增加,网络的吞吐量呈下降趋势,节点越多,信道多的优势将越来越小,网络的吞吐量也逐渐下降。

6.3 “日盲”紫外光中继通信实验

实验中采用 270 nm 紫外 LED 为光源,由于单个“日盲”紫外 LED 功率比较小,通信距离较近,可以通过多跳中继方式来扩大“日盲”紫外光通信距离,实验是在室内楼道环境中进行的,通过一跳转发实现两点间的通信。图 13 为单跳通信时的误码率曲线图。从图中可以看出,经过一跳转发后,通信距离相对的增加,经过实验证明了可以通过多跳通信方式来扩大紫外光通信距离。

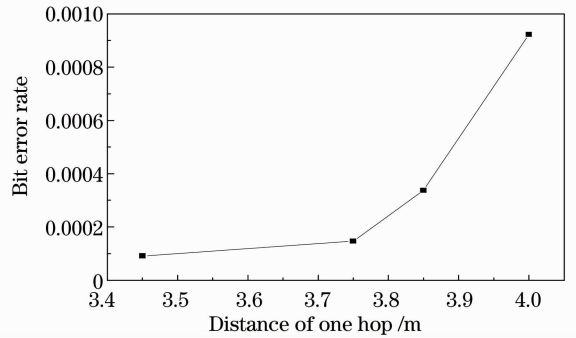


图 13 “日盲”紫外光中继通信误码率曲线图

Fig. 13 BER diagram of blind UV relay communication

7 结 论

本文主要对紫外光通信的信道模型及非直视链路模型进行了分析,对 NS2 原有的节点模型进行了扩展,建立了紫外光通信的节点模型,并对紫外光节点模型的实现过程进行了介绍,同时详细介绍了紫外光非直视定向信道接入协议。通过对紫外光多信道下不同拓扑结构下的仿真分析,发现在链状拓扑结构下,紫外光非直视通信的三种工作方式随着信道数目的增加,网络的吞吐量随着增加,NLOS(a)通信的吞吐量相对小,其曲线比较平稳。NLOS(b)通信由于定向隐藏终端的影响,其吞吐量随着数据速率的增加而减小,甚至低于 NLOS(a)通信的吞吐量。NLOS(c)通信由于其定向发送定向接收,提高了空分复用率,相对于 NLOS(a)和 NLOS(b)通信,NLOS(c)通信的吞吐量较大,其曲线呈上升趋势。对于网状拓扑结构下,随着信道数目的增加,网络吞吐量增加。随着网络节点的增加,网络的吞吐量呈下降趋势,并且多信道的优势下降。针对“日盲”紫外光通信,通过中继通信实验,证明了通过多跳网络能有效增加紫外光通信距离。

参 考 文 献

- 1 M. R. David, T. M. Daniel, A. M. John. Unique properties of solar blind ultraviolet communication systems for unattended ground sensor networks [C]. *SPIE*, 2004, **5611**: 244~254
- 2 H. H. Jia, H. L. Zhang, H. W. Yin *et al.*. The experimental research of NLOS UV propagation channel in the atmosphere based on LIA technology[C]. *SPIE*, 2007, **6783**(2): 67833B
- 3 He Hua, Ke Xizheng, Zhao Taifei. Research of ultraviolet non-line-of-sight single scattering link model[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(11): 3148~3152
何 华, 柯熙政, 赵太飞. 紫外光非视距单次散射链路模型的研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(11): 3148~3152
- 4 Alexander S. Zachor. Aureole radiance field about a source in a scattering-absorbing medium [J]. *Appl. Opt.*, 1978, **17**(12): 1911~1922
- 5 Z. Xu. Approximate performance analysis of wireless ultraviolet links [C]. *JCASSP*, 2007:15~20
- 6 G. A. Shaw, A. M. Siegel, J. Mode. Recent progress in short-range ultraviolet communication [C]. *SPIE*, 2005, **5796**: 214~225
- 7 Zhao Taifei, Feng Yanling, Ke Xizheng. Research on the coverage area of communication in the solar-blind UV communication network[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(8): 2230~2235
赵太飞, 冯艳玲, 柯熙政. “日盲”紫外光通信网络中节点覆盖范围研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(8): 2230~2235
- 8 Zhao Ming, Xiao Shali, Wang Xi *et al.*. Ultraviolet communication system based on deep LED [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(4): 040602
赵 明, 肖沙里, 王 玺 等. 基于 LED 的紫外光通信系统研究 [J]. *激光与光电子学进展*, 2010, **47**(4): 040602
- 9 Wang Rui, Wang Shurong, Li Futian *et al.*. Investigation on radiation calibration system of vacuum ultraviolet detector [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(4): 1026~1030
王 锐, 王淑荣, 李福田 等. 真空紫外探测器辐射定标研究 [J]. *光学学报*, 2010, **30**(4): 1026~1030
- 10 W. S. Ross, R. S. Kennedy. An investigation of atmospheric optically scattered no-line-of-sight communication links [R]. Army Research Office Project Report, Research Triangle Park, NC, 1980. 1~6
- 11 Xu Leiming, Pang Bo, Zhao Yao *et al.*. NS and Network Simulation[M]. Beijing: Post & Telecom Press, 2003. 117~124
徐雷鸣, 庞 博, 赵 耀. NS 与网络模拟 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2003. 117~124
- 12 R. Anguswamy, M. Zawodniok, S. Jagannathan. A multi-interface multi-channel routing (MMCR) protocol for wireless ad hot net work [J]. *IEEE, Budapest: WCNV*, 2009, (5-8): 1~6
- 13 P. Kyasanur, N. H. Vaidya. Routing and link-layer protocols for multi-channel multi-interface Ad Hoc wireless networks [J]. *Sigmobile Mobile Computing and Communications Review*, 2006, **10**(1): 31~43

栏目编辑: 谢 婧