

DOI: 10.7652/xjtuxb201908014

室内可见光通信系统切换机制设计

赵贝贝, 冯莉芳

(北京科技大学计算机与通信工程学院, 100083, 北京)

摘要: 为缓解无线频谱资源紧缺问题以及满足未来个人用户或者集体的需求,解决可见光异构网络无缝通信的问题,提出一种基于传输时间的可见光通信系统切换机制。鉴于传统传输方式需要大量的反馈信息,必然会引起传输延迟,且可能导致反馈风暴的缺陷,采用无码率的喷泉码差错控制传输方案进行数据传输,不需考虑信道特性。首先采用喷泉码传输差错控制传输方式分析平均传输时间,然后将平均传输时间与设定阈值进行比较,进行切换判决。采用不同度分布的喷泉码切换方法进行了仿真分析,结果表明,与传统的切换算法比,基于传输时间切换方法性能更好,可以实现切换频率不超过 0.4, VLC 网络服务率达到 83%,可有效减少系统开销,降低乒乓效应,提高切换准确性及 VLC 网络利用率。

关键词: 可见光通信;异构网络;切换;喷泉码

中图分类号: TN929.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2019)08-0107-07

A Design of Handoff Mechanism for Indoor Visible Light Communication Systems

ZHAO Beibei, FENG Lifang

(Institute of Computer and Communication Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: A novel handoff mechanism based on the time of data propagation at a transmitter is proposed to realize the seamless connection between a heterogeneous network with visible light and millimeter-wave. The mechanism is proposed through integrating with the fountain code-based error control scheme and analyzing the switching algorithm based on RSS. Firstly, the average transmission time is calculated by the transmission error control transmission method of the fountain code. Then the handoff mechanism is used to perform the handoff decision based on the average transmission time. Finally, some fountain code handoff methods employing different degree distribution are compared and analyzed by simulation. The simulation results and comparisons with some traditional handoff methods show that the proposed handoff method with robust soliton distribution has better performance, e. g. the handoff frequency is less than 0.4, and the VLC service rate reaches 83%. It is concluded that the proposed method can effectively reduce the system overhead and the ping-pong effect, and improve the accuracy of handoff and the utilization rate of the VLC network.

Keywords: visible light communication; heterogeneous network; handoff; fountain code

可见光通信技术 (visible light communications, VLC) 由于具有高带宽、高速率、兼具照明和通信的特点,受到业界的广泛关注,为未来室内无线通信提供了新的解决方案^[1-4]。

可见光方向性强、覆盖范围小、穿透性差,在室内通信环境中易受遮挡,从而导致通信中断。将 VLC 技术与其他无线接入技术相结合是未来网络技术的发展方向之一。文献[5-7]提出了 VLC-射频融合的异构网络,与传统无线技术相比,毫米波和可见光具有相似传播特性,如频率高、波束窄、方向性强、穿透性差等。因此,将毫米波与 VLC 技术相结合,可为室内通信带来接近的传播速率及用户体验。

在室内环境中,当用户在 VLC 小区内进行通信时,可能会因为外来遮挡或用户移动到小区边缘从而导致信号质量差,甚至通信中断,需要触发切换。文献[8-12]主要从水平切换的角度对可见光异构网络切换进行分析,不涉及不同网络间切换。为实现可见光系统与其他射频系统间的融合,文献[13-14]提出了基于接收光照强度的切换算法,通过比较接收的光照强度和设定的阈值判断是否触发切换,但由于该算法易受信道环境影响,切换准确性不高,甚至出现乒乓效应。文献[15]提出了基于等效信干噪比(SINR)的垂直切换算法通过比较目标网络和服务网络 SINR 差值决定是否触发切换,提高了切换判决的准确性,但由于接收信号不稳定,该算法易出现乒乓效应。为了减弱乒乓效应,文献[16-17]提出一种改进的动态驻留时间算法,通过引入影响因子来减少切换次数。

当信道环境恶劣(如遇到障碍物阻挡)至通信中断时,信息发生丢失。采用传统数据传输技术,需要大量的反馈信息,引起传输延迟,且可能导致反馈风暴。基于喷泉码的差错控制方法具有反馈信息数据量少、信道适应性好及系统复杂度低等优点,因此更适合可见光通信信道。文献[18-19]提出了将喷泉码应用到 VLC 系统中,改善系统的传输性能,提高系统的可靠性。

为了提高用户体验,本文提出了可见光-毫米波混合系统的切换方案,该方案基于喷泉码无码率特性,基于发射端,不需要考虑信道特性,提出基于发射端传输时间的切换机制。采用不同度分布的喷泉码进行数据传输,以传输时间触发切换。与现有基于光强照度(RSS)切换方法相比,该切换机制降低了乒乓效应,提高了切换性能,为实现可见光异构网络的无缝连接提供了一种新思路。

1 室内 LED 光源环境配置

根据 IEEE 标准,设定房间体积的长宽高为 $14\text{ m}\times 14\text{ m}\times 3\text{ m}$ ^[20]。国际标准对普通办公室和住宅房间的照明照度要求是 $300\sim 500\text{ lx}$,光强分布应尽可能均匀。由于单个 LED 达不到照明的要求,通常通过配置多个 LED 来实现国际标准的要求,本文考虑在天花板上配置 4×4 个 LED 灯。

图 1 为光源布局的立体图,移动终端距离地面的高度为 0.8 m ,移动终端所在平面平行于天花板。对接收终端所在平面的光照强度进行 MATLAB 仿真,所采用的具体参数如表 1 所示,室内光照强度分布如图 2 所示。

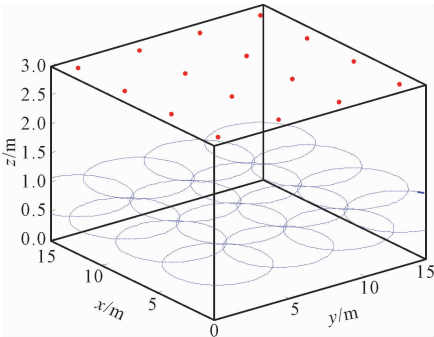


图 1 LED 光源布局立体图

表 1 LED 光源布局仿真参数

参数	数值
房间体积/ m^3	$14\times 14\times 3$
LED 半功率角度/ $(^\circ)$	53
LED 中心发光功率/ mW	20
LED 间距/ m	4
LED 与墙间距/ m	1
VLC 小区半径 r/m	2.9
相邻两个小区干扰最大长度 l/m	1.8
LED 灯个数	4×4
动终端距离地面的高度/ m	0.8

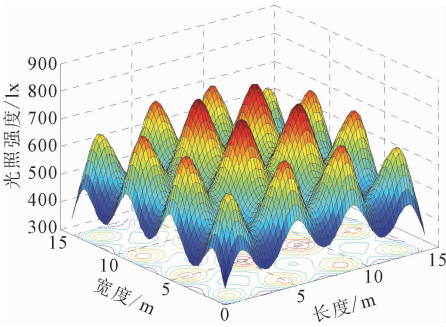


图 2 光照强度分布图

仿真结果显示,接收平面内的最小光照强度为 360.720 4 lx,最大光照强度 811.682 4 lx,满足室内工作光照要求。可见该布局的照明范围对房间形成了全面覆盖,无通信死角,但相邻小区间会存在干扰。

2 基于喷泉码的差错控制传输

LT 码是最基本的喷泉码,其编译码方法简单以及低译码开销和编译码复杂度。LT 码的编码过程如下:先根据度分布算法生成一个度值 $d(1 \leq d \leq K)$;然后在 K 个输入数据包中随机地选取 d 个数据包;对选取的 d 个数据包进行异或,生成编码包;重复上述过程,可在编码器的输出端不断生成新的编码数据包。由此可见,喷泉码的度分布是设计喷泉码的核心,它的好坏直接决定了译码性能。

2.1 LT 码的度分布

常用的度分布有理想孤波度分布 (ISD)、鲁棒孤波度分布 (RSD) 和二进制指数度分布 (BED)。

(1)理想孤波度分布 (ISD),表达式为

$$\rho(d) = \begin{cases} \frac{1}{k}, & d = 1 \\ \frac{1}{d(d-1)}, & d = 2, 3, 4, \dots, K \end{cases} \quad (1)$$

(2)鲁棒孤波度分布 (RSD)。在理想孤波度分布的基础上做了改进,设计了一个正数函数 $\tau(d)$ 并将 $\tau(d)$ 与 $\rho(d)$ 归一化处理,得到鲁棒孤波度分布函数 $\Omega(d)$ 如下

$$\Omega(d) = \frac{\rho(d) + \tau(d)}{\beta} \quad (2)$$

$$\tau(d) = \begin{cases} \frac{R}{dK}, & d = 1, 2, \dots, \frac{K}{R} - 1 \\ R \ln\left(\frac{R}{\delta}\right) / K, & d = \frac{K}{R} \\ 0, & d = \frac{K}{R} + 1, \dots, K \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\rho(d)$ 为 ISD 度分布函数; $\beta = \sum_d \rho(d) + \tau(d)$ 。正数函数 $\tau(d)$ 的表达式主要增加了较大度值的出现概率,提高了编码数据包对源数据包的覆盖性,适应范围较广。

(3)二进制指数度分布 (BED)。为增大较小度值出现的概率,提出二进制指数度分布,即

$$\rho(d) = \begin{cases} \frac{1}{2^d}, & d = 1, 2, \dots, K - 1 \\ \frac{1}{2^{K-1}}, & d = K \end{cases} \quad (4)$$

2.2 基于喷泉码的数据传输

基于喷泉码的数据传输过程如下:首先对原始数据包进行分割,然后根据度值对源数据包进行异或编码,生成源源不断的编码包发送到接收端,最后在接收端随机收到一定数量编码包之后,可恢复出原始数据。数据传输过程如图 3 所示。接收端接收编码包的数量由喷泉码特性决定,且与度分布、错误译码率、译码开销相关。

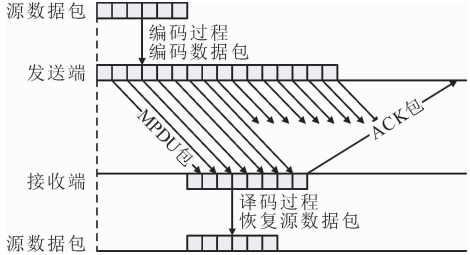


图 3 基于喷泉码的数据传输过程

假设接收端接收 $N(N > K)$ 个数据包即可恢复原始数据,则接收端发送一个反馈信息到发送端,表示此次传输任务完成。从发送端发送 MPDU 数据包到接收端发送 ACK 数据包,为数据的传输时间,如图 4 所示。

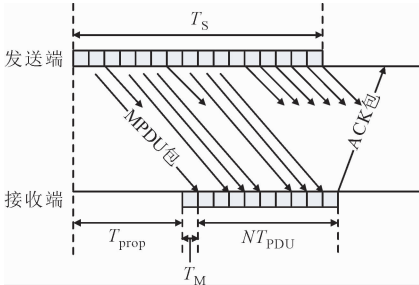


图 4 传输时间

在传输过程中,接收端无需触发开启装置。接收端接收到 MPDU 数据包之后,则数据传输过程启动。设 T_{prop} 为通信的单向传输时间延迟, T_M 为发送端发送信息到接收端开始接收信息的时间, T_{PDU} 为每个数据包传输需要的时间。根据图 4 的传输时间^[21],有

$$T_{trans} = NT_{PDU} + T_M + T_{prop} \quad (5)$$

由式(5)可知,数据包的个数 N 是影响传输时间的主要因素,而 N 很大程度上受度分布译码开销 ϵ 所影响。在丢包率为 0 的情况下,设将原始数据包分为 K 个大小相同的数据包,成功译码接收到的编码数据包个数为 N ,则

$$N = (1 + \epsilon)K \quad (6)$$

若考虑丢包率 P ,则式(6)为

$$N = \frac{K(1+\epsilon)}{1-P} \quad (7)$$

3 基于喷泉码的切换机制设计

在异构网中,为了保证用户持续通信并节约能耗,用户通信应尽可能采用 VLC 链路。当用户信道环境恶劣时(如信道衰减较大甚或链路受到遮挡时),会发生通信质量受损甚至通信中断。此时,优先考虑将用户切换至相邻 VLC 小区,若相邻小区也不能满足通信要求,则切换至毫米波网络。本文主要考虑终端移动到小区边缘和可见光受到遮挡这两种场景。

3.1 切换机制设计

本文设计的切换机制主要基于发射端,以能否在规定时间内接收到传输成功的反馈信号为依据,对是否需要进行切换进行判断。其中,切换分为水平切换和垂直切换:相连两个 VLC 小区之间的切换称为水平切换;从 VLC 网络切换到毫米波网络称为垂直切换。

基于喷泉码传输时间的切换步骤如下。

步骤 1 用户通过 VLC 网络接入当前小区。

步骤 2 采用基于喷泉码的差错控制方案对数据进行传输:首先将数据分成 K 个数据包,根据采用的度分布函数对数据包进行异或操作,同时设定切换阈值;接收端接收一定量的数据包 $N(N>K)$ 后即可实现成功译码,译码成功后发送反馈 ACK 信息到发送端。

步骤 3 利用式(1)计算传输时间 T_{trans} 。

步骤 4 比较传输时间 T_{trans} 和阈值:若传输时间小于设定的阈值,则不需触发切换;若传输时间超过设定阈值 D_{th1} ,则触发水平切换至相邻小区(目的小区)。当切换到目的小区后,当前小区就停止发送数据。若传输时间超过设定阈值 D_{th2} ,则触发垂直切换至毫米波网络,否则停留在目的小区,不需要触发切换。

步骤 5 当切换至毫米波网络后,需对切换机制的传输时间进行周期性的检测,一旦检测到传输时间未超过阈值 D_{th2} ,则立即切换至目标小区的可见光网络,检测判断公式如下

$$\left. \begin{aligned} T_{\text{trans}} > D_{\text{th1}}, & \text{ 水平切换} \\ T_{\text{trans}} > D_{\text{th2}}, & \text{ 垂直切换} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

基于喷泉码传输时间的切换机制框图如图 5 所示。

3.2 切换阈值设定

(1)水平切换阈值。令 D_{th1} 表示水平切换阈值,

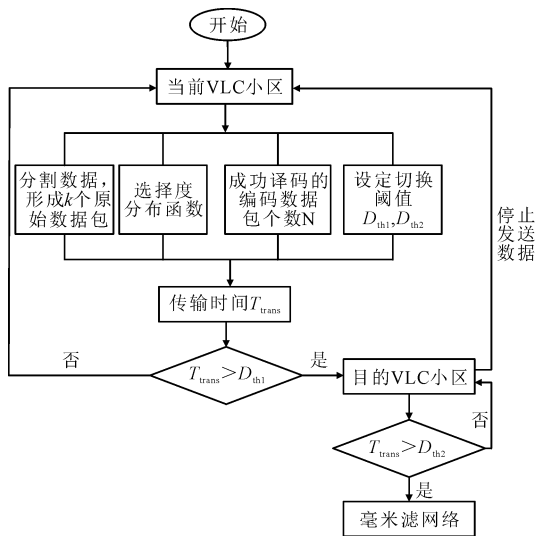


图 5 基于喷泉码传输时间的切换机制框图

r 表示小区的覆盖半径, h 表示接收机与 LED 灯的垂直距离, σ 表示业务敏感度, c 表示光速, 则有

$$D_{\text{th1}} = N_{\text{max}} T_{\text{PDU}} + T_{\text{M}} + T_{\text{prop1}} + \sigma \quad (9)$$

式中: $T_{\text{prop1}} = \frac{\sqrt{(r^2 + h^2)}}{c}$ 。

(2)垂直切换阈值。令 D_{th2} 表示垂直切换阈值, L 表示 LED 灯间距, T_{LED} 表示 LED 灯指令处理时间, σ 表示业务敏感度, 则有

$$D_{\text{th2}} = D_{\text{th1}} + T_{\text{prop2}} + \sigma \quad (10)$$

式中: $T_{\text{prop2}} = T_{\text{LED}} + 2L/c$ 。

不同业务对切换时间的要求不一致,例如:普通业务在进行切换时,可以有切换缓冲期间,超过切换阈值不必立即切换;视频通信业务流在超过切换阈值时立即切换。

3.3 平均传输时间

若考虑信道丢包率 P ,则数据总传输时间 (NT_{PDU}) 的期望为

$$E(NT_{\text{PDU}}) = \frac{K(1+\epsilon)}{1-P} T_{\text{PDU}} \quad (11)$$

若发送端第一次发送 MPDU 数据包,接收端接收成功,其发生的概率为 $1-P_s$,则 T_{M} 的期望为

$$T_{\text{M}} = (1-P_s) T_s \quad (12)$$

式中: T_s 为正确接收 MPDU 数据包所需时间。

设 P_s 为接收端第一次未接收到 MPDU 数据包的概率, k 为发送 MPDU 数据包次数, T_0 为接收到 MPDU 阈值,则 k 均值为

$$E(k) = (1-P_s)(1+2P_s+\dots+kP_s^{k-1}) \quad (13)$$

式(13)化简得

$$E(k) = \frac{1}{1-P_s} \quad (14)$$

T_M 均值为

$$E(T_M) = \left(\frac{1}{1 - P_s} - 1\right)(T_s + T_0) + T_s \quad (15)$$

综上所述,平均传输时间为

$$E(T_{trans}) = E(NT_{PDU}) + E(T_M) + T_{prop} \quad (16)$$

根据式(16)计算传输时间,并结合式(8)~式(10)对切换机制进行切换判决。

MPDU 传输次数的估计过程如图 6 所示。

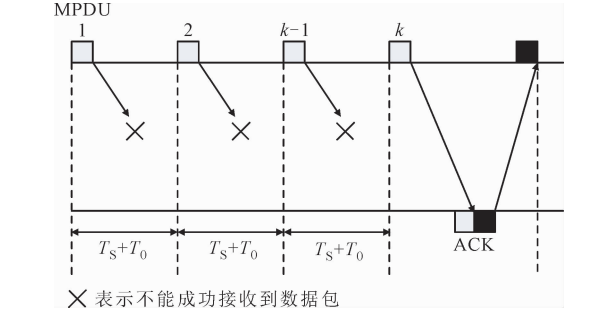


图 6 MPDU 传输次数的估计过程

4 数值分析

当实际信道情况较差时,例如信道被障碍物阻挡,会出现丢包的情况。随着丢包率的增加,传输时间必然增大。采用不同的传输方式进行数据传输,对系统的传输时间进行 MATLAB 仿真和分析。仿真参数如表 2 所示。

表 2 实际信道情况时的仿真参数

参数	数值
数据包大小/kb	500
可见光网络最大传输速率/ $\text{Mb} \cdot \text{s}^{-1}$	125
ISD 译码开销	3
RSD 译码开销	0.4
BED 译码开销	2
接收机与发射机之间的最大距离 D/m	3.6
MPDU 丢包率	0.2
MPDU 数据包大小/bit	1
$T_{\text{PDU}}/\mu\text{s}$	80
T_{LED}/s	0.001

4.1 平均传输时间

考虑信道的丢包率,根据式(16)对平均传输时间进行仿真分析,图 7 为不同传输方案成功传输所需的平均传输时间。由图 7 可见:丢包率较小时(约小于 0.1),采用反馈重传技术的传统 TCP 传输方式,重传的信息较少;采用 ISD 度分布的喷泉码接收端实现成功译码所需的编码数据包个数要远远大

于源数据包个数;采用 BED 度分布的喷泉码由于产生大度值的概率接近于 0,因此易出现译码过程中断或译码失败。因此,信道丢包率低时,基于 TCP 的数据传输的性能较好。

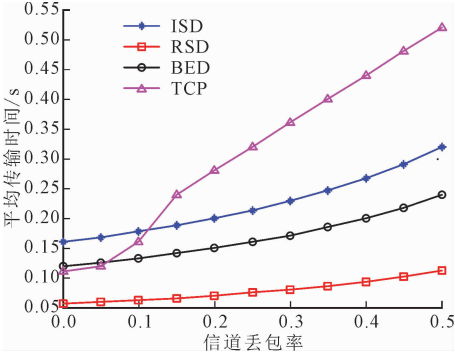


图 7 不同传输方案成功传输所需平均传输时间

当信道环境恶劣甚至通信中断时(如遇到障碍物阻挡),采用反馈重传技术需要大量的反馈信息,传输延迟较大;喷泉码只要没有接收到确认信息,发送端就可以从相同的源数据包中持续不断的产生数据包,只有当发送的信息被成功恢复,反馈信息才会传送到发送端。因此,随着丢包率的增加,采用 LT 喷泉码的传输方案与 TCP 传输方案相比优势越明显。采用不同的度分布(ISD、RSD、BED),数据的平均传输时间差距较大,其中基于 RSD 的数据平均传输时间最短,这是因为基于 RSD 的喷泉码译码开销最小。不同度分布的译码开销性能如图 8 所示。由图 8 可以看出,要达到相同的译码成功率,基于 RSD 的喷泉码译码开销最小。译码开销越小,平均传输时间越短,因此基于 RSD 的数据平均传输时间最短。

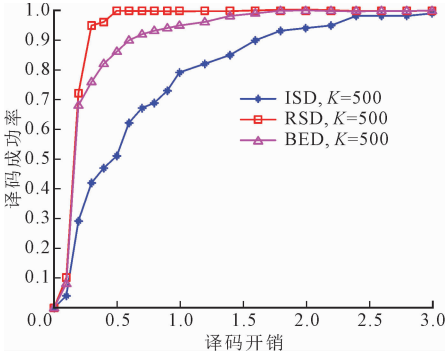


图 8 不同度分布的译码性能

4.2 切换性能

根据图 1 的室内系统模型及表 1 的仿真参数,采用蒙特卡罗实验对本文所提出的切换机制性能(切换概率和 VLC 网络的服务率)进行 MATLAB 仿真分析,其中,切换概率指切换次数与实验次数的

比值;VLC网络服务率指VLC网络为用户服务比率。对切换机制进行5 000次实验,基于RSS切换算法的切换概率为0.73,基于传输时间切换算法的切换概率如图9所示。由图9可见,在相同异构网络环境下,不同传输方案的切换概率有差异,基于LT喷泉码传输比传统传输方案的切换概率低。因此,采用基于喷泉码传输比采用传统传输方式要稳定,有利于减弱乒乓效应,基于喷泉码的数据传输适合VLC信道并且能够提高系统的抗干扰能力。

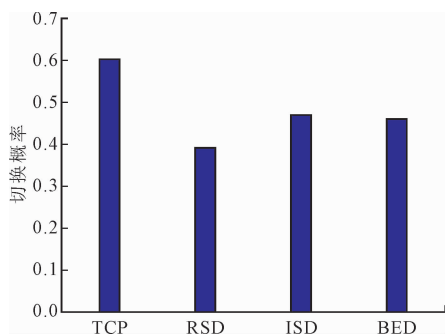


图9 切换概率

相较于毫米波网络,VLC网络兼具照明与通信,且没有电磁辐射,绿色环保,故优先考虑将用户切换至VLC网络,若VLC网络不能满足通信求,则切换至毫米波网络。图10为切换机制的VLC网络服务率,由图10可见:基于RSS、ISD、BED传输的VLC网络的平均服务率比基于TCP传输的的VLC网络的平均服务率高15.7%。此外,由于度分布的不同,致使VLC网络的服务率有差异,其中基于RSD传输的VLC网络服务率最高,均值高达83%。

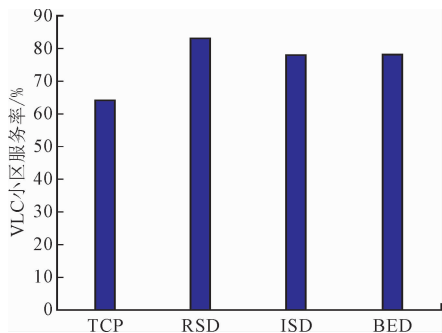


图10 VLC网络服务率

综上,采用喷泉码传输时间的切换机制,实现切换所需的次数最少,并能减弱乒乓效应,充分利用VLC网络资源。

5 总结

在可见光与毫米波组成的异构网络中,采用切

换机制保障网络间的无缝连接。本文提出一种基于发射端数据传输时间的切换机制,以传输时间为切换的评判标准,不需要考虑接收功率强度,减少了计算和切换算法的复杂度。本文系统在兼具室内照明与通信的需求,减少了系统开销并且节能环保。实验结果表明:采用本文切换机制,在室内环境下,基于鲁棒孤波的传输方式,可以实现切换概率不超过0.4,减弱了乒乓效应;另外,VLC网络平均服务率达到83%。因此,基于鲁棒孤波的喷泉码切换机制能够减少系统的开销,降低乒乓效应,提高切换的准确性并且提高VLC网络利用率。

在异构网络中,垂直切换机制涉及诸多因素,如速率、带宽、用户偏好等。本文仅以传输时间作为判决切换条件,过于单一,因此后续将对提出的切换机制进行优化,以提高切换机制的性能。

参考文献:

- [1] DEMIR M S, MIRAMIRKHANI F, UYSAL M. Handover in VLC networks with coordinated multi-point transmission [C] // 2017 IEEE International Black Sea Conference on Communications and Networking. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2017: 8277715.
- [2] KHALLAF H S, EL-FIQI A E, ELWEKEIL M, et al. Efficiency of opportunistic cellular/LiFi traffic off-loading [C] // 19th International Conference on Transparent Optical Networks. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2017: 8024976.
- [3] 陈泉润, 张涛, 郑伟波, 等. 基于白光LED可见光通信的研究现状及应用前景[J]. 半导体光电, 2016, 37(4): 455-460.
CHEN Quanrun, ZHANG Tao, ZHENG Weibo, et al. Present research situation and application prospects of VLC based on white LED [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2016, 37(4): 455-460.
- [4] 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): 1-12.
CHI Nan, LU Xingyu, WANG Can, et al. High-speed visible light communication based on LED [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(3): 1-12.
- [5] DUVNJAK F, OZEGOVIC J, KRISTIC A. Heterogeneous Wi-Fi and VLC (RF-optical) wireless access architecture [C] // 23rd International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2015: 310-314.
- [6] BAO X, ZHU X, SONG T, et al. Protocol design and capacity analysis in hybrid network of visible light

- communication and OFDMA systems [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2014, 63(4): 1770-1778
- [7] LI L, TIAN H, FAN B. A joint resources allocation approach for hybrid visible light communication and LTE system [C] // 11th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing. London, UK: IET, 2015: 1-6.
- [8] SONG J, DING W, YANG F, et al. An indoor broadband broadcasting system based on PLC and VLC [J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 2015, 61(2): 299-308.
- [9] SHAO S, KHREISHAH A, RAHAIM M B, et al. An indoor hybrid WiFi-VLC internet access system [C] // 11th IEEE International Conference on Mobile Ad Hoc and Sensor Systems. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2014: 569-574.
- [10] HUANG Z, XIONG J, LI J, et al. Efficient cross-room switch mechanism for indoor room-division-multiplexing based visible light communication network [J]. Journal of the Optical Society of Korea, 2015, 19(4): 351-356.
- [11] XIONG J, HUANG Z, ZHUANG K, et al. A cooperative positioning with Kalman filters and handover mechanism for indoor microcellular visible light communication network [J]. Optical Review, 2016, 23(4): 683-688.
- [12] NGUYEN T, CHOWDHURY M Z, JANG Y M. A novel link switching scheme using pre-scanning and RSS prediction in visible light communication networks [J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2013, 2013(1): 293.
- [13] VEGNI A M, LITTLE T D C. Handover in VLC systems with cooperating mobile devices [C] // 2012 International Conference on Computing, Networking and Communications. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2012: 126-130.
- [14] RAHAIM M B, VEGNI A M, LITTLE T D C. A hybrid radio frequency and broadcast visible light communication system [C] // 2011 IEEE GLOBECOM Workshops. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2011: 792-796.
- [15] 郑浩天, 季新生, 黄开枝, 等. 基于等效 SINR 的 VLC 与 WiFi 垂直切换算法 [J]. 计算机应用研究, 2016, 33(3): 832-835.
- ZHENG Haotian, JI Xinsheng, HUANG Kaizhi, et al. A novel vertical handoff algorithm based on equivalent SINR between VLC and WiFi [J]. Application Research of Computers, 2016, 33(3): 832-835.
- [16] 吴燕, 张申. 室内 VLC-WiFi 异构无线接入网络研究 [J]. 半导体光电, 2017, 38(6): 853-856.
- WU Yan, ZHANG Shen. Research on indoor wireless access network of hybrid VLC-WiFi system [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2017, 38(6): 853-856.
- [17] LIU R, ZHANG C. Dynamic dwell timer for vertical handover in VLC-WLAN heterogeneous networks [C] // 13th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2017: 1256-126
- [18] FENG L, HU R Q, WANG J, et al. Fountain code-based error control scheme for dimmable visible light communication systems [J]. Optics Communications, 2015, 347(5): 20-24.
- [19] DENG K, YUAN L, WAN Y, et al. Unequal error control scheme for dimmable visible light communication systems [J]. Optics Communications, 2017, 383(1): 518-524.
- [20] UYSAL M, MIRAMIRKHANI F, NARMANLIOGLU O, et al. IEEE 802.15.7r1 reference channel models for visible light communications [J]. IEEE Communications Magazine, 2017, 55(1): 212-217.
- [21] REN Z, WANG Z, GUO Q. Rateless codes based file delivery protocols in deep space communications [C] // 5th International Conference on Computing Communication and Networking Technologies. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2014: 6963018.

(编辑 刘杨)

(上接第46页)

- [15] LIN H H, WANG Jifeng, OSWALD F B, et al. Effect of extended tooth contact on the modeling of spur gear transmissions [J]. Gear Technology, 1994, 11(4): 18-25.
- [16] 方宗德. 齿轮轮齿承载接触分析(LTCA)的模型和方

法 [J]. 机械传动, 1998, 22(2): 1-3.

FANG Zongde. Model and approach for loaded tooth contact analysis (LTCA) of gear drives [J]. Journal of Mechanical Transmission, 1998, 22(2): 1-3.

(编辑 武红江)