

改进的紫外光通信时分复用组网方法

李济波¹ 刘锡国¹ 王红星^{1,2} 吴晓军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 针对目前紫外光通信组网采用的时分复用(TDM)技术随着节点增加存在排队等待时延长、链路利用率低、网络吞吐量不理想等问题,提出了改进的时分复用组网方法。该方法基于紫外光通信垂直收发模型,通过考虑功率因素的加权算法选取中心节点辐射成相邻小区,用分段时隙方法给相邻小区分配不同时隙段,让相距较远小区内的节点对时隙重复使用,解决了节点增加与时隙有限的矛盾。仿真分析表明,该方法相比 TDM 在网络节点数为 40 时的信息排队等待时延降低了 4 ms,链路利用率提高了 2.7%,网络吞吐量增加了 1800 bit/s。

关键词 光通信; 紫外光通信; 组网方法; 时分复用; 加权算法

中图分类号 TN929.12 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.1105003

Improved Ultraviolet Communication Time Division Multiplexing Network Method

Li Jibo¹ Liu Xiguo¹ Wang Hongxing^{1,2} Wu Xiaojun¹

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 An improved time division multiplexing network method is proposed to solve such problems as the long queuing delay time, the low link utilization ratio and the non-ideal network throughput which are caused by the increased nodes when time division multiplexing(TDM) technology is used in the ultraviolet communication network at present. Based on the model of ultraviolet communication vertical transceiver, this method selects the central node to radio into the adjacent cell by taking weighted algorithm of power factor into consideration, and distributes the adjacent cell different slot sections by using piecewise slot method to achieve the goal that the nodes in the far area can use time slot repeatedly and the contradiction between the increased nodes and the limited time slot can be solved. The simulation analysis indicates that, compared with TDM, when the network node number is 40, this method can decline 4 ms in the queuing delay time, raise 2.7% in the link utilization ratio, and increase 1800 bit/s in the channel throughput.

Key words optical communications; ultraviolet communication; network method; time division multiple; weighted algorithm

OCIS codes 060.4510; 060.4250; 040.7190

1 引言

与传统通信方式相比,紫外光(UV)通信具有背景噪声小、抗干扰能力强、低窃听率、全方位、非直视通信和全天候工作的优点,利用 UV 垂直收发全

向通信的性质进行 UV 通信技术组网可以弥补 UV 通信发射功率低、大气衰减严重、存在大量单向信道等固有缺陷^[1-3]。近年来,国内外学者对 UV 通信组网技术进行了大量研究,针对 UV 通信中探测器

收稿日期: 2014-05-12; **收到修改稿日期**: 2014-06-25

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@cumail.com

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

件对接收波长具有一段响应范围^[4],不能严格区分不同波长,频分技术在 UV 通信中使用不够成熟的问题,文献[5]指出使用充分利用带宽资源的时分复用(TDM)技术,把时间分割成周期性的帧,每一帧再分割成若干个时隙,然后根据一定分配原则指定固定时隙。文献[6]基于 TDM 技术研究了 UV 组网中的一些主要规则,包括路径损耗、误码率、覆盖范围、大气衰减等。文献[7]提出了将 UV 通信和无线 Mesh 网络相结合,并对 MAC 协议和路由协议进行了改进以满足 UV 通信的需求。文献[8]尝试让 UV 通信和 Ad Hoc 相结合,节点可以随时加入网络或者离开网络,既是终端设备又具有转发功能。但是上述文献中基于固定时隙分配的 TDM 方法,由于节点通信所用时隙与节点数呈线性反比的关系,时隙划分会随着节点数的增多变得越来越窄,进而产生在节点发送信息时排队等待时延变长、链路利用率降低、吞吐量不理想等问题,造成网络的整体性能变差。

针对上述问题,为了解决网络节点数增加与正常通信使用时隙有限的矛盾,本文借鉴了蜂窝结构^[9]与无线传感器网络(WSN)簇划分^[10]思想。利用蜂窝结构里解决功率有限的蜂窝网形成,结合 UV 通信网络里存在节点功率受限、确保正常通信所需的固定分配时隙有限的特点,可以对 UV 通信网络节点进行选取中心节点的小区划分。而 UV 在大气中传输衰减非常快、信道对天气状况非常敏感、用户终端频繁移动,WSN 中进行距离参数设定的簇首算法显然不能满足 UV 大气通信的要求,因此,需要研究适合 UV 波段信道的小区划分算法完

成 UV 通信自组织网络。

基于这种思想,本文提出了一种改进的 UV 通信 TDM 组网方法(Improved-TDM),其思想是以 UV 通信垂直收发模型为物理基础确定节点接收功率和通信半径,各节点通过考虑功率因素的加权算法竞选中心节点,以中心节点辐射半径形成相邻小区,优化算法确定最优节点度数,将时隙划分成 m 个时隙段,每个时隙段细分成 n 个时隙,各小区中心节点负责竞争本区使用时隙段且要求相邻小区时隙段相异,相距较远的节点可以重复使用同一时隙且不干扰。相比于 TDM 技术,该方法能很好地解决伴随节点用户增加带来的时隙划分过窄、排队等待时延变长、网络吞吐量不理想等问题,增加了 UV 通信网络的动态适应性、可扩展性。

2 紫外光通信垂直收发模型

在 UV 通信中,收发仰角对其影响很大,垂直收发模型(收发仰角均为 90°)覆盖范围小但全方位性好,非直视通信模型(收发仰角均小于 90°)覆盖范围大但有很强的方向性^[7]。组网就是要弱化对方向性的需求,通过链路连接来解决单个节点传输距离近的缺陷,使得在网络覆盖范围内信息传送可以有多种跳路径到达,增加通信的可靠性,因此一般采用全方位性好的垂直收发模型^[11-13],如图 1 所示。图中 Tx、Rx 表示发射端和接收端,俯仰角和半波束角 $(\beta_t, \beta_r, \theta_t, \theta_r) = (90^\circ, 90^\circ, 45^\circ, 45^\circ)$, r 表示收发端直线距离, $\varphi_1 = \beta_r - \frac{1}{2}\theta_r$, $\varphi_2 = \beta_t - \frac{1}{2}\theta_t$, $\theta_s = \varphi_1 + \varphi_2$ 。

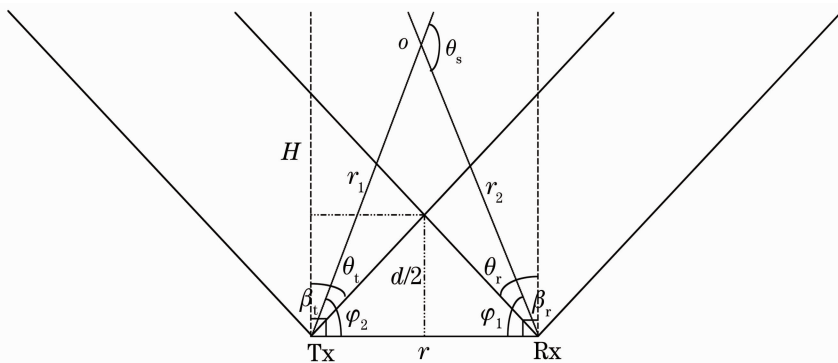


图 1 UV 通信垂直收发模型

Fig. 1 UV communication model of vertical transmission

若发射功率为 P_t , 能量衰减为 L , 则接收功率 $P_r = P_t/L$, 其中能量衰减 L 表示为^[11]

$$L \approx 4\pi r^4 \sin^2 \theta_t \sin^2 \varphi_1 \sin^2 \varphi_2 \exp\{k_e r [\sin \varphi_1 + \sin \varphi_2] / \sin \theta_s\} / [k_s P(\mu) A_r \sin^4 \theta_s V], \quad (1)$$

式中 k_e 为大气信道衰减系数, $k_e = k_a + k_s$, k_a 为大气的吸收系数, k_s 为大气的散射系数; A_r 为接收孔径面积; V 为有效散射区域体积; $\mu = \cos \theta_s$, $P(\mu)$ 为单散射相位函数, 表示为

$$P(\mu) = \frac{k_s^{\text{Ray}}}{k_s} P^{\text{Ray}}(\mu) + \frac{k_s^{\text{Mie}}}{k_s} P^{\text{Mie}}(\mu), \quad (2)$$

式中 $k_s = k_s^{\text{Ray}} + k_s^{\text{Mie}}$, $P^{\text{Ray}}(\mu)$ 和 $P^{\text{Mie}}(\mu)$ 分别为瑞利散射相位函数和米氏散射相位函数, 计算公式如下:

$$\begin{cases} P^{\text{Ray}}(\mu) = \frac{3[1 + 3\gamma + (1 - \gamma)\mu^2]}{16\pi(1 + 2\gamma)}, \\ P^{\text{Mie}}(\mu) = \frac{1 - g^2}{4\pi} \left[\frac{1}{(1 + g^2 - 2g\mu)^{3/2}} + \right. \\ \left. f \frac{0.5(3\mu^2 - 1)}{(1 + g^2)^{3/2}} \right], \end{cases} \quad (3)$$

式中 γ, g, f 为模型参数。

满足通信需求的误码率公式为^[13]

$$R_{\text{BE}} = 0.5 \exp\left(-\frac{P_t \eta_t \eta_r \lambda}{LRhc}\right), \quad (4)$$

式中 η_t 为滤波器透射率, η_r 为接收器量子转换效率, λ 为通信波长, R 为传输速率, h 为普朗克常量, c 为光速, 设定模型参数, 联解(1)~(4)式可得到 UV 通信节点距离 r 的函数: $r = f(P_t, R_{\text{BE}})$ 。

3 改进的时分复用组网方法

对于 TDM 方法中通信时隙与节点数呈线性反比的关系使得时隙划分越来越窄的问题, 改进的 TDM 组网方法以实现时对隙的重复使用作为出发点, 来解决网络中节点数增加与正常通信使用时隙有限的矛盾。方法的整体实现主要有三个关键技术点: 1) 小区中心节点选取, 在组网中应基于消息/事件驱动、按需自适应选择、方法准确高效; 2) 最优节点度数算法, 既充分利用链路资源又不能造成网络拥塞; 3) 网络时隙分配, 做到相邻小区内节点使用时隙相异、相距较远小区节点重复使用同一时隙。

3.1 小区中心节点选取

选取小区中心节点采用符合 UV 通信特点的引入功率因素加权算法, 权重计算公式为

$$I_n = c_1 D_n + c_2 M_n + c_3 T_n + c_4 L_n, \quad (5)$$

式中:

1) D_n 表示节点度数(邻居节点数目) d_n 与最优节点度数(小区中心节点能支持的最优节点个数) ζ 之差, 记为 $D_n = |d_n - \zeta|$, d_n 计算公式如下:

$$d_n = \sum_{v', v \in V, v' \neq v} \{\text{sum}(v, v')\}, \quad (6)$$

式中 v' 为本地节点, v 为邻居节点。

2) M_n 表示该节点发射功率与其对所有一跳邻居节点的接收功率差值, 记为 $M_n = |P_t - P_r^{\text{sum}}|$, 其中 P_r^{sum} 计算公式如下:

$$P_r^{\text{sum}} = \sum_{v' \in N_v} \{P_t(v, v')\}, \quad (7)$$

式中 N_v 为所测节点的所有一跳邻居节点集合。

3) T_n 表示节点与其一跳邻居节点的链路保持时间。如果一个节点能够和其他节点通信, 则必须处于其他节点的覆盖范围内。在移动通信中, 节点的移动伴随着通信功率的变化, 接收功率的大小与变化的快慢体现节点间的距离与相对运动速度关系。本文中, 节点的移动特性为节点 A 与邻居节点 $B_i (i = 1, 2, \dots, l)$ 的平均相对速度, l 是邻居节点数, 参考最低移动性分群算法中平均相对速度的思想^[14], 以先后接收邻居节点功率的比值的对数作为参考, 按(8)式进行计算:

$$v_t = \frac{1}{l} \sum_{i=1}^l 10 \lg \frac{P_{r(B_i \rightarrow A)}^{\text{new}}}{P_{r(B_i \rightarrow A)}^{\text{old}}}, \quad (8)$$

式中 $P_{r(B_i \rightarrow A)}^{\text{new}}$ 表示当前节点 A 收到 B_i 的接收功率, $P_{r(B_i \rightarrow A)}^{\text{old}}$ 表示上一个测量点 A 收到 B_i 的接收功率。

如果 $P_{r(B_i \rightarrow A)}^{\text{new}} > P_{r(B_i \rightarrow A)}^{\text{old}}$, $v_t > 0$, 说明节点 A 与邻居节点总趋势在相向运动, 此时连通时间 $T_n = (d + r)/v_t$ (d 为最大通信半径, r 为两节点距离); $P_{r(B_i \rightarrow A)}^{\text{new}} < P_{r(B_i \rightarrow A)}^{\text{old}}$, $v_t < 0$, 说明节点在反向运动, 此时连通时间 $T_n = -(d - r)/v_t$; 若 $P_{r(B_i \rightarrow A)}^{\text{new}} = 0$, 说明节点离开了彼此的通信范围, 此时连通时间 $T_n = 0$; 若 $P_{r(B_i \rightarrow A)}^{\text{new}} = P_{r(B_i \rightarrow A)}^{\text{old}}$, 此时 $v_t = 1$, 说明节点相对静止, 连通时间 $T_n = \infty$ 。

4) L_n 表示该节点在网络中的重要程度, 通常为肩负的任务情况、地理位置等, 可以根据实际情况分为 x 个等级, 级数越低表明其节点越重要。

5) $c_i (i = 1, 2, 3, 4)$ 为向量权重因子的四个分量, 大小由影响程度确定, 满足 $\sum_{i=1}^4 c_i = 1, (c_i > 0)$ 。

3.2 最优节点度数算法

一个区域内总节点数为 N 的优化网络, 确定最优节点度数情况下的每个节点吞吐量均为 $\theta(W/\sqrt{N})$, 单位为 bit/s, 其中 W 为信道带宽, θ 为 Knuth 符号^[15-16]。假设 K 为 UV 通信网络中的总节点数目, k 为网络中的连通小区数, W 为 UV 信道带宽, 网络流量均匀分布, 则可以得到小区内各节点的通信量 R_1 和小区中心节点的通信量 R_2 表达式为

$$R_1 = \theta\left(\frac{W_1}{\sqrt{K/k}}\right), \quad (9)$$

$$R_2 = \theta\left(\frac{W_2}{\sqrt{k}}\right). \quad (10)$$

一个中心节点的信息传输通信量应占小区内节点通信量的 $(k-1)/k$ 。为了避免小区内发生拥塞, 这个值应该小于小区中心节点通信量, 即有

$$\frac{k-1}{k}R_1 \leq R_2. \quad (11)$$

令优化 $k = K^*$, 根据(9)式和(10)式, $\frac{k-1}{k}R_1$

和 R_2 的上限各自分别为 $\frac{K^*-1}{K^*} \sqrt{\frac{8}{\pi}} \frac{W_1}{\Delta} \sqrt{\frac{K}{K^*}}$ 和 $\sqrt{\frac{8}{\pi}} \frac{W_2}{\Delta} \sqrt{K^*}$, $\Delta > 0$ 表示保证节点正常通信的前提^[15] 在优化的小区内,

$$\frac{K^*-1}{K^*} \sqrt{\frac{8}{\pi}} \frac{W_1}{\Delta} \sqrt{\frac{K}{K^*}} = \sqrt{\frac{8}{\pi}} \frac{W_2}{\Delta} \sqrt{K^*}. \quad (12)$$

解得,

$$K^* = \frac{W_1}{W_2} \sqrt{K} + 1. \quad (13)$$

本文中,UV 通信使用同一频带 $W_1 = W_2$, 因此有最优节点度数

$$\zeta = K/K^* \approx \sqrt{K}. \quad (14)$$

根据上述最优节点度数算法, 当网络中节点总数 $K = 40$ 时, 优化小区个数 $K^* \approx 7$, 最优节点度数 $\zeta \approx 7$, 小区节点拓扑结构如图 2 所示。

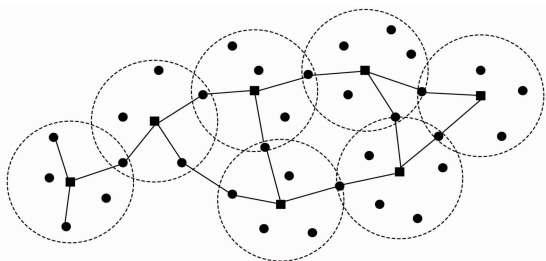


图 2 优化小区拓扑图

Fig. 2 Optimizing cell topology

3.3 网络时隙分配

TDM 技术把时间分割成周期性的帧, 每一帧再分割成若干个时隙, 然后根据一定的时隙分配原

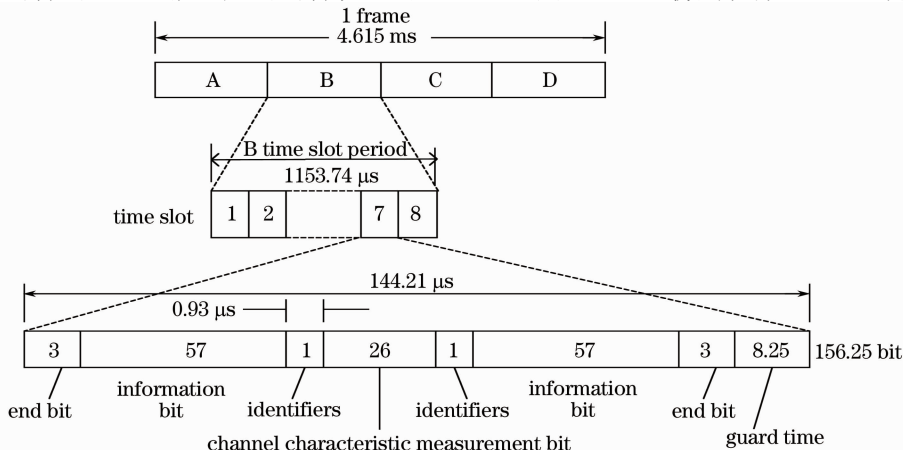


图 3 网络时隙分配

Fig. 3 Time-slot distribution of network

则, 使各个子站在每帧内只能按指定的时隙向主站发送信号^[5]。在满足定时和同步的条件下, 主站可以分别在各时隙中接收到各子站的信号而不混扰。

Improved-TDM 方法中也是将时间分割成周期性的帧, 不同的是运用了小区思想将每帧时间划分为 m 个时隙段, 各中心节点竞争到 m 中与相邻小区不同的一个时隙段, 再细化为 n 个时隙分配给小区内各节点通信使用, 其中, $n = \max\{l_1, l_2, \dots, l_k, \zeta\}$, $l_i (i \leq k)$ 为 i 小区内的节点数。各个节点的通信都按顺序安排在预定的时隙中传输, 各邻居节点只要在指定的时隙内接收, 就能在合路信号中把发给它的信号区分出来, 不相邻的两个小区可以竞争到一帧时间中的同一个时隙段分配的段内时隙给区内节点使用而不会引起干扰。节点时隙划分不会随着网络规模的扩大而线性变窄, 在时隙的利用上做到了真正的“时分复用”, 有效解决了用户量增加与时隙资源有限的矛盾。

工作过程如下: 当网络源中心节点发出组网信息后, 本区优先获得一个时隙段, 由源中心节点开始向外辐射, 各小区中心节点从相邻小区已占用时隙段之外的剩余时隙段中竞争, 并且将竞争到的时隙段号向邻居小区广播声明该时隙段已被占用。如果相邻两小区同时竞争到相同时隙段, 将由 ID 号小的小区获得, 另一个小区更新时隙表头, 继续从剩余可用时隙段中争取, 直到获取到该时隙段为止。取 $m = 4, n = 8$ 的网络时隙分配如图 3 所示。

4 仿真实验

4.1 仿真场景

用 OPNET 仿真软件, 设置区域大小为 $250 \text{ m} \times$

250 m, 波长 $\lambda=260$ nm, 发射功率 $P_t=50$ mW, 垂直收发模式, 散射系数 $(k_a, k_s^{Ray}, k_s^{Mie})=(0.9 \text{ km}^{-1}, 0.24 \text{ km}^{-1}, 0.25 \text{ km}^{-1})$, 模型参数 $(\gamma, g, f)=(0.017, 0.72, 0.5)$, 接收孔径面积 $A_r=1.77 \text{ cm}^2$, 滤波器透射率 $\eta_f=0.1$, 接收器量子转换效率 $\eta_r=0.2^{[14]}$, 开关键控 (OOK) 调制方式, 通信误码率为 10^{-5} , 传输速率 $R=800$ bit/s, 节点对网络影响程度 x 在 $1\sim 4$ 中随机取值, 权重系数 $(c_1, c_2, c_3, c_4)=(0.2, 0.3, 0.4, 0.1)$, 网络节点数 $K=40$, 最优节点数 $\zeta=7$, 一帧为 4 个时隙段, 每个时隙段划分成 8 个小时隙, 发包类型恒定比特率 (CBR), 数据包大小 1024 bit, 控制包大小 200 bit, 发包率为 2 s^{-1} , 仿真基于在可扩充性、移动性、稳定性、支持单向链路等方面的性能更满足 UV 通信组网需求的 AODV 反应式路由协议, 仿真时间为 1500 s。

4.2 仿真结果

从数据传输排队等待时延 (见图 4)、链路利用率 (见图 5)、网络吞吐量 (见图 6) 三个方面对两种方法进行仿真比较, 图中横坐标为仿真时间, 蓝色曲线表示常用的 TDM 技术, 红色曲线表示本文提出的 Improved-TDM 方法。

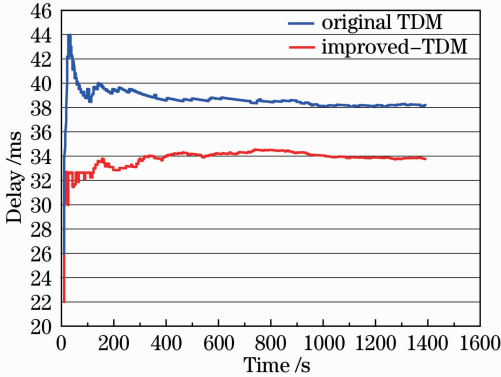


图 4 排队等待时延

Fig. 4 End-to-end transmission delay

由图 4 可知, 趋于仿真稳定时, 常用 TDM 技术节点排队等待时延为 38 ms, Improved-TDM 方法为 34 ms, 降低了 4 ms。常用 TDM 中节点通信时隙宽度与网络总节点数呈线性反比关系, 在节点量不大时的分配时隙可以满足通信需求。然而, 当网络规模扩大时, 伴随节点增加, 网络中生成数据变大, 相应的时隙宽度却变得越来越窄, 造成数据传输排队等待时间延长, 而 Improved-TDM 方法通过小区划分让相距较远的节点可以重复使用时隙, 节点通信时隙宽度不会随着节点线性变化, 因而减小了等待时延。

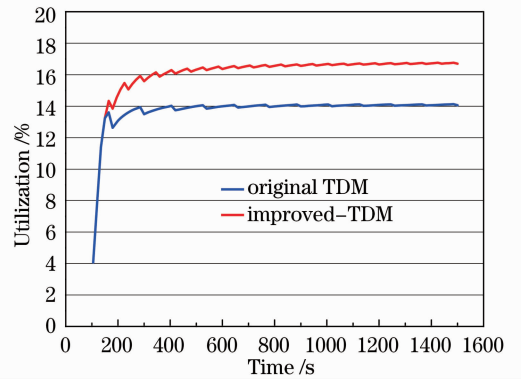


图 5 节点链路利用率

Fig. 5 Node link utilization

图 5 中, 仿真 150 s 之前属于组网初始化时间, 没有建立稳定的网络系统进行数据传输, 因此没有链路利用率值。当网络完成组网初始化, 各节点正常通信, 开始传输数据信息, 产生了占用链路与释放链路, Improved-TDM 方法优势逐渐体现出来, 相比于常用 TDM 的链路利用率提高了 2.7%。这是因为常用 TDM 时隙宽度由节点数线性决定, 节点数量大则时隙窄, 传输相同数据流所需时间变长, 完成通信任务的节点长期占用信道, 降低了链路的使用率。Improved-TDM 方法中节点分配时隙宽度也会随着节点的增加而变窄, 但是极为缓慢, 相比常用 TDM 技术在节点通信时隙内可以传输更多数据流, 完成通信任务所需时间变短, 可以尽早释放链路, 提高了利用率。

图 6 仿真结果用“time_average”显示, 仿真初期属于网络组建时期, 网络的吞吐量体现在控制信息上, 两种方法都是采用询问式, 因而两条曲线一致。在完成网络组建后, 节点间通信包含有数据信息和控制信息, 两种方法的网络吞吐量都急剧上升, 但是采用了小区划分进行时分复用的 Improved-TDM 方法节点传输数据排队等待时延更小、链路利用率更高,

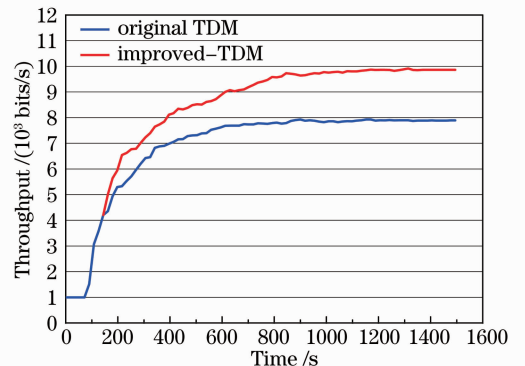


图 6 网络吞吐量

Fig. 6 Network throughput

在相同时帧内网络可以传输更多的数据流信息,吞吐量更大,比常用 TDM 增加了 1800 bit/s。

综合以上分析可知,当网络中节点数量小时,两种方法的网络性能大体一致,随着节点数增加,Improved-TDM 方法逐渐体现出在时延、链路利用率、吞吐量等方面的优势。这是因为改进方法加入了小区中心节点选取、最优节点度数算法、网络时隙分配等技术,使得节点可以对时隙进行重复使用,而代价就是增加了节点的计算量和组网实现的复杂度,特别是在节点数少时,计算量的增加没有相应提升网络性能。所以本文方法更适用于网络节点数多的情况下通过较小的计算开销来换取较好的系统性能。

5 结 论

UV 通信组网研究是近年来无线通信的热点,针对网络规模扩大时常用的 TDM 技术存在不足,提出了 Improved-TDM 方法,引进的小区划分思想使得相距较远的节点可以重复使用同一时隙通信,提高了时隙利用率,解决了节点增加与确保正常通信时隙有限的矛盾问题,并给出了方法的具体实现。仿真结果表明,该方法降低了网络时延,提高了链路利用率、增加了网络吞吐量。进一步的工作将在方法中引入一些自适应的机制使得节点能够调节发送的数据流数,提高通信效率。

参 考 文 献

- 1 A S Gary, N Melissa, I Mrinal, *et al.*. NLOS UV communication for distributed sensor systems[C]. SPIE, 2000, 4126: 83-96.
- 2 Shen Yi, Liu Dongmei, Fu Xiuhua, *et al.*. Research and preparation of the ultraviolet communication filters[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(12): 1207005.
沈 羿, 刘冬梅, 付秀华, 等. 紫外光通信滤光膜的研制[J]. 中国激光, 2011, 38(12): 1207005.
- 3 Kong Xiaohui, Bai Tingzhu, Yang Yali. Optical system design and simulation of LED line source for ultraviolet curing[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(2): 0222002.
孔晓慧, 白廷柱, 杨雅丽. 紫外光固化 LED 线光源的光学系统设计及仿真[J]. 光学学报, 2013, 33(2): 0222002.
- 4 X Bai, D McIntosh, H Liu, *et al.*. Ultraviolet single photon

- detection with Geiger-mode 4H-SiC avalanche photodiodes[J]. IEEE Photonics Technol Lett, 2007, 19(22): 1822-1824.
- 5 Hong L, Hong F, Guo Z W. A TDMA based MAC protocol in underwater sensor networks[C]. Dalian: The 4th International Conference on Wireless Communications, Networking, and Mobile Computing(WICOM'08), 2008. 1-4.
- 6 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.
- 7 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.
- 8 Sun B L, Chen H, Li L Y. A reliable multicast routing protocol in mobile Ad Hoc networks[C]. Beijing: Proceedings of the 16th International Conference on Computer Communication, 2004. 1123-1129.
- 9 Fan Changxin, Cao Lina. Communication Principles [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007.
樊昌信, 曹丽娜. 通信原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.
- 10 Li Xiangyang, Wan Penjun, Frieder O. Coverage in wireless Ad Hoc sensor networks [J]. IEEE Trans on Computer, 2003, 52(6): 753-763.
- 11 Fan Jingtao, Ding Ying, Jiang Huilin, *et al.*. Study of atmospheric scatter short model for UV communication [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(4): 1028-1033.
范静涛, 丁 莹, 姜会林, 等. 紫外光通信的散射信道简化模型[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(4): 1028-1033.
- 12 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.
- 13 Wu Ting, Li Tangjun, Jian Nan, *et al.*. Suppression of intrachannel four-wave mixing by strong dispersion management in 160 Gb/s OTDM transmission [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(1): 0105002.
吴 婷, 李唐军, 贾 楠, 等. 强色散管理抑制 160 Gb/s 光时分复用传输系统中的带内四波混频效应[J]. 中国激光, 2013, 40(1): 0105002.
- 14 Basu P, Khan N, Little T D C. A mobility based metric for clustering in mobile Ad Hoc networks[C]. Proceedings of IEEE ICDCS 2001 Workshop on Wireless Networks and Mobile Computing, 2001. 413-418.
- 15 P Gupta, P R Kumar. The capacity of wireless networks[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2000, 46(2): 388-404.
- 16 Xu Kaixin, Hong Xiaoyan, Gerla Mario. An Ad Hoc network with mobile backbones[C]. IEEE International Conference on Communications, 2002. 3138-3143.

栏目编辑: 王晓琪