

# 60-GHz 网络并行传输中基于顶点多着色的时隙分配算法

孙利, 尹鸿坦

(黄淮学院 信息工程学院, 河南 驻马店 463000)

**摘要:**针对 60-GHz 网络中现有并行传输算法的不足,首先分析了数据并行传输的充分条件,然后基于冲突矩阵来对网络中的顶点进行多着色,进而提出了一种基于顶点多着色的时隙分配算法.此外,考虑到两种类型的传输:组内传输(单跳)和组间传输(多跳),还提出一种基于距离的中继选择算法作为发射机和接收机之间进行直接通信还是中继通信的决策指标.在单跳和多跳场景下评估所提算法的性能,仿真结果表明,所提算法可显著提升网络吞吐量和单位时隙期间的数据流平均数量,相比于传统的 Greedy 算法和 TDMA 算法,性能提升幅度分别达到 19% 和 12%.

**关键词:**60-GHz 网络;并行传输;多着色;时隙分配;中继选择;吞吐量

**中图分类号:**TP393

**文献标志码:**A

60-GHz 作为一种新兴网络技术,可实现千兆比特的数据率<sup>[1-2]</sup>.60-GHz 网络中的链路,具有很强的方向性,且传播损耗很大.与当前蜂窝网络<sup>[3]</sup>相比,如果 60-GHz 网络载波的波长较小,则需要采用窄波束和可靠性较高的电子可控天线阵列进行部署才能克服严重的路径损失<sup>[4]</sup>.此外,60-GHz 网络中的设备和障碍物密度可能很高,干扰情况更为复杂.因此,非常有必要通过信道资源的高效利用来尽量提高网络吞吐量.

文献[5-9]对并行传输调度进行了全面研究.文献[5]提出一种混合 SDMA/TDMA 的启发式调度算法,可提高实际应用中毫米波(mmWave)系统的吞吐量.然而该方法的局限性较大,不适用于 60-GHz 通信网络.文献[6]提出一种机会空间重用算法,支持 802.15.3c 网络的并行传输.然而该方法是以缩短网络传输延时为目标,对于提高网络吞吐量的作用不大.文献[7]针对并行传输定义了互斥区域(Exclusive Region, ER)概念,并提出基于随机互斥区域(Randomized Exclusive Region, REX)的资源分配调度算法.然而,REX 以贪婪算法为基础,属于一种迭代次数不可预测的随机调度算法.文献[8]针对 mmWave WPANs 提出一种多跳并行传输算法.与单跳并行传输算法相比,该多跳传输算法虽然提升了网络吞吐量,但是也带来了很高的控制开销.文献[9]提出一种基于无线位置的并行传输算法.采集了设备的坐标和传输请求后,微型网络控制器(Piconet Network Controller, PNC)对相同信道时间分配(Channel Time Allocation, CTA)下未被干扰的数据流进行调度.然而该方法需要一个中央控制器来采集网络信息并做出决策,额外增加了网络成本.

在 60-GHz 通信网络中,发射机  $T_x$  和接收机  $R_x$  彼此之间往往相距较近,可以将网络看成是自然形成的群组,而不是随机分散的设备(Devices, DEVs),如图 1 所示.这种短距离网络的吞吐量主要取决于调度策略,而不是传输功率控制<sup>[10]</sup>.考虑到 60-GHz 通信网络的拓扑结构具有随机性,在调度决策前,每个时隙期间每个数据流的吞吐量未知,因此需要一种高效的分配算法.本文提出一种称为顶点多着色并行传输(Vertex Multi-Coloring Concurrent Transmission, MCCT)的时隙分配算法,通过利用顶点着色算法使数据流和  $(T_x, R_x)$ ,  $(T_x, R_x)$  对跨越多个色彩,提高了时隙利用率.此外,在本文研究的场景中,存在两种类型的数据传输:组内传输(单跳)和组间传输(多跳).

收稿日期:2016-01-27;修回日期:2016-06-19.

基金项目:国家自然科学基金(61401403);河南省科技厅发展计划(142102110088).

第 1 作者简介(通信作者):孙利(1972-),男,河南平舆人,黄淮学院副教授,研究方向为计算网络、软件工程,  
E-mail:1967809759@qq.com.

为此,本文还为 $(T_x, R_x)$ 间的跨组传输提出一种基于距离的中继选择算法.最后通过仿真实验验证了本文算法的有效性.

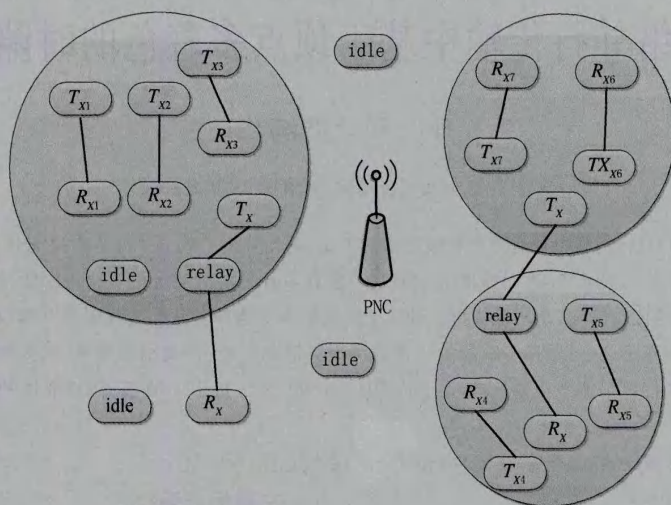


图1 系统模型

## 1 系统模型

考虑密集部署了 DEVs 的 802.15.3c 网络.开始时,DEVs 随机分布,微型网网络控制器(PNC)位于中央.随着时间的推移,由于 $(T_x, R_x)$ 对越来越远,所以 WPANs 自然形成了多个群组.

### 1.1 PNC 的半全向传输

采用 802.15.3c 标准的设备,在 60-GHz 频段上具有严重的路径损耗.因此,它们应该将辐射能量聚集于预定方向上的数据传输.类似地,它们也可以将能量聚集于具体方向上的数据接收,以便获得更高功率,因此有必要采用 60-GHz 频段上的有向通信技术.802.15.3c 标准下的 PNC 应该向所有方向广播信标,因为与 PNC 相连的每个设备均应接收信标然后采取相应操作.半全向传输属于有向传输,但它通过对其传输方向做  $360^\circ$  连续旋转来模拟全向传输<sup>[12]</sup>.在 802.15.3c WPANs 中,PNC 在广播报文时可采用半全向传输方式.

### 1.2 天线模型

本文模型考虑强方向性天线.有向天线分为两种:一种是扇形/切换天线阵列,由一定数量提供方位角全覆盖的固定波束构成;另一种是自适应天线阵列,可智能地将主要波束聚集于目的信号方向,并抵消干扰方向.文中考虑自适应平顶天线阵列模型,该模型中的信号直接到达接收器天线上.其中,每个 DEV 采用包含  $N$  个波束的天线,每个波束覆盖的角度为  $2\pi/N$  个弧度.发射机和接收机总是使波束互相对准.有向天线的特征主要在于可描述角度为  $\phi$  时功率增益  $G(\phi)$  的模式函数.正规化模式函数可定义为:

$$g(\phi) = \frac{G(\phi)}{G_{\max}}, \quad (1)$$

其中,  $G_{\max} = \max_{\phi} G(\phi)$  在平顶天线模型中,天线增益是恒定的,即波束宽度内为单位增益,波束宽度外为 0.

当  $|\phi| \leq \Delta\phi/2$  时,  $g(\phi) = 1$ , 否则为 0, 其中,  $\Delta\phi = \frac{2\pi}{N}$  表示天线的波束宽度.在本文模型中,发射机和接收机均采用有向天线进行数据传输,因此在波束宽度内发射机和接收机的天线增益  $G_t = G_r = 1$ , 波束宽度外为 0.

### 1.3 mmWave 传输模型

假设带宽干扰服从高斯分布的加性高斯白噪声(AWGN)信道容量可表示为:

$$C = W \log_2 \left[ 1 + \frac{P_r}{(N_0 + 1)W} \right], \quad (2)$$



其中  $P_r$  表示接收信号的功率,  $W$  表示系统带宽,  $N_0$  和  $I$  分别表示高斯噪声和带宽干扰的单边功率谱密度. 如果传输率低于信道容量, 则可利用 Friis 传输方程来计算接收信号的功率:

$$P_r(d) = P_t G_r G_t \left(\frac{1}{4\pi}\right)^2 \left(\frac{1}{d}\right)^n, \quad (3)$$

其中,  $P_t$  表示发射功率,  $G_r$  和  $G_t$  表示接收机和发射机的天线增益,  $\lambda$  表示波长(通常为 5 mm),  $d$  表示  $(T_x, R_x)$  对间的传输距离,  $n$  表示路径损耗指数(对室内场景往往在 2 和 6 之间). 通过综合(2)式和(3)式, 数据率可表示为:

$$R \leq C = W\beta \log_2 \left[ 1 + \frac{P_t G_r G_t d^2}{16\pi^2 (N_0 + 1) W d^n} \right], \quad (4)$$

其中,  $\beta$  表示时间隙资源不连续导致的数据率损失, 且  $0 \leq \beta \leq 1$ . 从(4)式中可以看出, 由于其带宽较大, 波长较小, 所以在 60-GHz 网络中数据流吞吐量随着距离的下降现象更为严重. 网络吞吐量可计算为:

$$R_{NW} = \sum_{i=1}^j R_i, \quad (5)$$

其中,  $j$  表示活跃数据流总数.

## 2 本文算法

针对 60-GHz 网络中现有并行传输算法的不足, 本文提出一种基于顶点多着色的时隙分配算法. 通信发生于  $(T_x, R_x)$  对. 将  $(T_x, R_x)$  对看成是一个数据流, 本文研究的数据流中接收机和发射机是明确分离的, 不存在共享式收发机.

### 2.1 并行传输的条件

与传统的串行 TDMA 技术相比, 并行传输可能受到其他发射机的干扰. 图 2 给出了 60-GHz 网络的两种并行传输场景. 从图 2 中可以看出, DEV A 向 DEV B 传输, 而 DEV C 也在同一时隙期间向 DEV D 传输数据. 如 1.2 节所述, 本文采用波束宽度为  $\theta$  的平顶天线模型. 于是,  $(A, B)$  对和  $(C, D)$  对间并行传输的充分条件 1 如下.

并行传输充分条件 1:

$$\angle DAB > \theta/2 \text{ 且 } \angle BCD > \theta/2, \quad (6)$$

其中  $\angle DAB$  和  $\angle BCD$  可从余弦定理获得:

$$\begin{cases} \angle DAB = \arccos\left(\frac{\overline{AD}^2 + \overline{AB}^2 - \overline{BD}^2}{2 \overline{AD} \times \overline{AB}}\right), \\ \angle BCD = \arccos\left(\frac{\overline{BC}^2 + \overline{CD}^2 - \overline{BD}^2}{2 \overline{BC} \times \overline{CD}}\right). \end{cases} \quad (7)$$

即使两个数据流发生干扰, 只要它们之间的距离达到一定阈值, 便仍可实现并行传输. 60-GHz 网络中路径损耗严重, 容易发生干扰, 但干扰的影响主要是局部影响. 阈值距离定义为可将相互干扰看成背景噪声的区域. 为此, 文献[8]定义了以接收机为中心的互斥区域(ER), 该区域允许互相干扰的数据流进行并行传输. 因此, 获得  $(A, B)$  和  $(C, D)$  之间并行传输的第 2 个充分条件.

并行传输充分条件 2:

$$\begin{cases} \overline{AD} > R_{ER} \left( \angle DAB < \frac{\theta}{2} \right), \\ \overline{BC} > R_{ER} \left( \angle BCD < \frac{\theta}{2} \right), \end{cases} \quad (8)$$

其中:

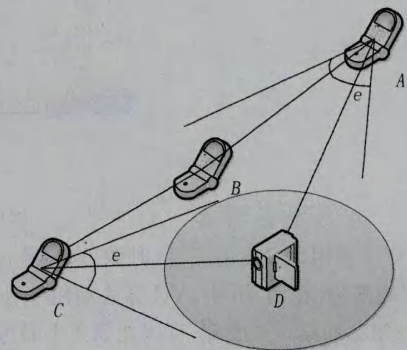


图2 并行传输场景

$$R_{ER} = \left( \frac{k_1 G_t G_r}{N_0 W} \right)^{1/n}, \tag{9}$$

$R_{ER}$  表示  $ER$  的半径,如图 2 所示(在  $DEV D$  周围), $k_1 \propto (1/4\pi)^2$  表示取决于波长  $\lambda$  的恒定系数, $G_t$  和  $G_r$  分别表示发射机和接收机的天线增益, $P_t$  表示发射机功率, $n$  表示路径损耗指数.这里,条件 2 可保证网络的累积干扰低于一个可接受阈值.因此,从并行传输条件 1 和条件 2 可获得不同数据流的并行传输概率.如图 2 所示,接收机  $B$  位于发射机  $C$  的波束宽度之外,接收机  $D$  位于发射机  $A$  的波束宽度内,但是  $A$  和  $D$  间的距离大于  $R_{ER}$ ,因此  $(A, B)$  对和  $(C, D)$  对仍可实现并行传输.

### 2.2 基于 VC 的初始时隙分配

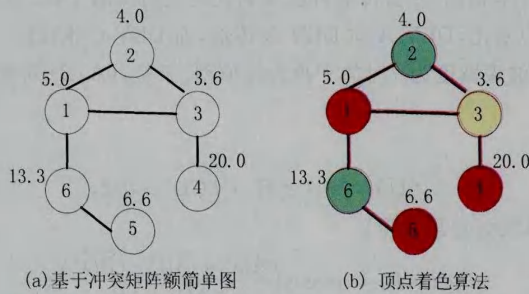
利用前面讨论的并行传输条件,可以构建一个  $V_a \times V_a$  冲突矩阵,其中  $V_a$  表示并行数据流总量.冲突矩阵元素为 0 或 1,其中 1 表示相应数据流间存在冲突.例如,如果房间内有 6 个活跃数据流,则其冲突矩阵如图 3 所示.

其中,第  $m$  行第  $n$  列的元素 1,表示第  $m$  个数据流会对第  $n$  个数据流造成干扰.因此,它们之间不允许进行并行传输.冲突矩阵还可表示为图 4b 所示的冲突图,其中数据流被表示为顶点,它们之间的冲突被表示为边.请注意,图 4 中的冲突图为无向图.因此,虽然顶点 1 和 3 间的边没有对应于冲突矩阵中的第 1 行,但是第 3 行却可证明该关系的存在.图 3 中加亮显示的元素对应于顶点 1 的相邻节点.

$$I_{\text{冲突矩阵}(6 \times 6)} = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

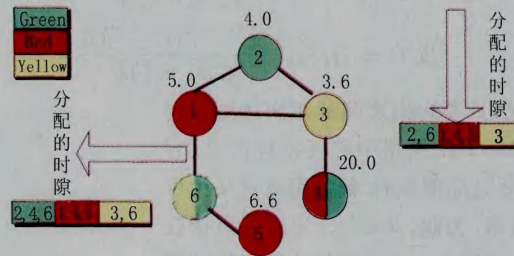
图3 存在6个活跃数据流的冲突矩阵

在 60-GHz 网络中,用于数据传输的时隙属于稀缺资源,如何在尽量少的时隙内实现所有数据流的调度,对于提升网络吞吐量至关重要.本文采用顶点着色(Vertex Coloring, VC)算法来解决上述问题.



(a) 基于冲突矩阵额简单图

(b) 顶点着色算法



(c) 优化算法

图4 VC和VMCCT的冲突图表示

VC 算法利用尽量少的颜色(时隙)来覆盖冲突图中的所有顶点(数据流).冲突图中互相连接的相邻顶点均被清晰着色.在图 4b 中,VC 算法利用 3 种颜色对所有 6 个顶点全部着色.利用绿色、红色和黄色分别表示第 1、第 2 和第 3 个时隙,可以在第 1 个时隙内传播数据流 2 和 6,在第 2 个时隙传输数据流 1、4、5,在第 3 个时隙期间传输数据流 3.

### 2.3 改进型时隙分配算法

基于 VC 的初始时隙分配算法,由于在时隙分配时比较保守,因此效率较低.本文提出一种基于顶点多

着色的改进型时隙分配算法(VMCCT),该算法在时隙分配时更为合理,因此可提升网络吞吐量.算法1给出了本文算法的详细内容.

算法1:顶点多着色并行传输算法

1:PNC接收到 $V_a$ 个数据流请求

2: for  $R=1$  to  $V_a$  个数据流 do

3: for  $R=1$  to  $V_a$  个数据流 do

4: if  $R! = C$  then

5: 寻找数据流( $R,C$ )间的波束张角;

6: 计算数据流间的( $T_x, R_x$ )距离

$$D = \text{distance}(R, C)$$

7: if  $\alpha < \theta/2$  且  $D < ER$ , 如果波束重合且在互斥区域内, then

8: 利用算法寻找中继站, 计算 $\alpha$ 和 $D$ . 如果这样的中继站未找到, 则

9:  $CM(R, C) = 1$

10: else

11:  $CM(R, C) = 0$

12: end if

13: end if

14: end for

15: end for

16: 将冲突矩阵 $CM$ 转换为冲突图

$$\text{Color\_Graph} = \text{Function\_VC}(CM)$$

17: 对每个顶点着色, 以使

$$C_{V(i)} = C_A - N_{(i)}$$

18: 检测具有潜在多色能力的数据流, 寻找数据流( $MC\text{-flows}(k)$ )

19: 寻找  $x = \text{Max}(w)$ , 其中  $w = \text{distance}[MC\text{-flows}(k)]$  表示根据  $MC\text{-flows}(k)$  数据流中( $T_x, R_x$ )距离而确定的权重

20: 根据最大权重, 向数据流分配多种颜色, 以使  $C_{V(x)} = C_A - C_{N(x)}$ .

结合图2来阐述本文算法. 从图2b可以看出, 如果每个顶点分配一种颜色, 则数据流4、5、6将会分配到多种颜色. 定义集合 $C_A$ 表示基本VC算法获得的所有颜色, 集合 $C_{N(i)}$ 表示分配给顶点 $i$ 相邻节点的颜色集合, 集合 $C_{V(i)}$ 表示分配给顶点 $i$ 的颜色集合. 一个顶点具有多种颜色的基本原理与传统VC算法相同, 即: 相连顶点间的颜色应该不同. 于是, 某一顶点的潜在颜色不应该包含其相邻顶点的匹配颜色, 这可表示如下:

$$C_{V(i)} = C_A - C_{N(i)}. \quad (10)$$

利用(10)式, 可以获得所有顶点的多色结果. 多色策略的顶点选择不同, 数据流的数据率便会不同, 进而对网络吞吐量产生重大影响. 例如, 在图2b中, 顶点5和6可被分配黄色. 此时由于只有一个顶点可被分配黄色, 所以需要一种颜色选择机制. 为了提升网络吞吐量, 根据目标数据率为每个顶点分配一个权重. 由于存在一定距离且传播损耗较大, 所以互扰低于背景噪声, 因此可将传输距离作为颜色选择的一个指标:

$$w(i) = \frac{\sum_{i=1}^{V_a} d(i)}{d(i)}, \quad (11)$$

其中,  $V_a$ 表示顶点数量,  $d(i)$ 表示数据流 $i$ 发射机和接收机之间的距离. 因为路径损耗较大, 所以数据流的传输距离越小, 数据率越高,  $w(i)$ 也越大. 为使VMCCT实现顶点的多色效果, 根据权重对顶点降序排列. 图4b中, 权重在每个顶点的上方给出, 从图4中可获得 $C_A$ 集合及经过排序的权重集合.

$$C_A = (\text{RED}, \text{GREEN}, \text{YELLOW}), \quad (12)$$

$$W = \{20.0(4), 13.3(6), 6.6(5), 5.0(1), 4.0(2), 3.6(3)\}. \quad (13)$$



因此,将会首先考虑权重最高的顶点4.利用(10)式,可对顶点4分配颜色如下:

$$C(4) = (\text{RED}, \text{GREEN}, \text{YELLOW}) - (\text{YELLOW}) = (\text{RED}, \text{GREEN}). \quad (14)$$

这将为顶点4分配红色和绿色.类似地,顶点6将被分配绿色和黄色.于是, $C_N(6)$ 将被更新为(GREEN, YELLOW),因此顶点5只可被分配红色.同理,可获得数据流1、2、3的最终结果.

## 2.4 基于距离的中继选择算法

在60-GHz网络中,由于 $(T_x, R_x)$ 对有互相接近的趋势,所以WPANs可迅速形成.当中继站数量较少时,可进行单跳通信;而当中继站数量较多时,需进行多跳通信.为此,本文还提出一种基于距离的中继选择算法作为 $(T_x, R_x)$ 对进行直接通信还是中继通信的决策指标(见算法2).假设网络中的群组总量为 $M$ .于是, $i=1, \dots, M$ 时每个 $G_i$ 包含的DEV,互相之间进行通信时(群组成型的原因),平均链路长度基本为 $D_{G_i}$ .如果 $T_x$ 和 $R_x$ 均属于 $G_i$ ,则倾向于直接通信(算法2第2行).否则,PNC将为所有潜在DEVs分配权重,以评估最优中继DEV.假设 $T$ 可作为中继站的潜在DEV总数( $P_l$ ).根据链路长度和流量负载分配权重(算法2的第6~9行).将流量负载计算为 $DEVP_l$ 上的流量负载与该群组内所有DEV的流量负载之和的比值.在(4)式中,数据率是 $d^n$ 的函数,本文算法也引入该函数(第8行).权重最小的节点作为最优中继.

算法2:基于距离的中继选择算法

- 1: 存在 $(T_x, R_x)$ 对
- 2: if  $T_x \in G_i$  且  $R_x \in G_i$  then
- 3: 直接通信
- 4: else
- 5:  $T_x \in G_i$  且  $R_x \in G_j, \forall i, j = (1, 2, \dots, M) // M$ 表示群组总数
- 6: for  $l = 1$  to  $T$  do
- 7:  $w(T_x, R_x) = \frac{D^n(T_x, P_l) + D^n(P_l, R_x)}{E[D^n(G_i, G_j)]} + \frac{F(P_l)}{E[G_g]}$
- 8: 其中  $g = i$  or  $j, w(T_x, R_x)$ 表示针对 $(T_x, R_x)$ ,分配给潜在在中继站的所有权重构成的集合
- 9: end for
- 10: 选择权重为  $\min[w(T_x, R_x)]$ 的  $R \in P_l$ , 且  $\forall l = (1, 2, \dots, T)$
- 11: end if

## 3 性能评估

为了评估本文VMCCT的性能,假设30个DEVs在 $15 \times 15$  m房间里随机分布.所有DEVs在放置时采用极坐标,因此来自PNC的关于DEVs的位置和距离信息已知.DEVs可采取ad hoc方式将它们的数据传输给任何其他DEVs,且与其位置无关.通过改变波束宽度和数据流密度,评估了本文算法在单跳和多跳场景下的性能.假设在超级帧期间,DEVs位置保持不变.其他仿真参数见表1.

### 3.1 单跳场景

下面评估本文VMCCT算法及传统单跳Greedy算法和TDMA算法的性能,各算法采用相同假设和系统模型.图5给出了波束宽度为 $30^\circ$ 和 $60^\circ$ 时,每个时隙的数据流平均数量变化情况.可以看出,传统的TDMA算法每个时隙只能传递一个数据流.与Greedy算法相比,采用VMCCT时每个时隙期间的数据流平均数量更优.当波束宽度为 $30^\circ$ 和 $60^\circ$ 时,每个时隙期间的数据流平均数量提升了1个左右.图6给出了网络中数据流数量增加时,网络吞吐量的变化情况.可以看出,VMCCT的结果优于Greedy算法,因此可支持更多数据.这对于高清(HD)TV、在线游戏和无压缩视频等对带宽和质量要求较高的应用来说,具有重要意义.另一方面,TDMA算法在某一具体时间只进行一次传输,所以数据率恒定.平均来说,与Greedy算法相比,当波束宽度分别为 $60^\circ$ 和 $30^\circ$ 时,本文算法可使网络吞吐量分别提升2 Gbps和3 Gbps.当波束宽度为 $30^\circ$ 时性能增益更高,是因为带宽越大,对其他DEVs的干扰越严重,因此当每个时隙的数据流数量固定时(图5),网络吞吐量在波束宽度为 $60^\circ$ 情况下反而会下降.如果用百分比表示,则与Greedy算法相比,VMCCT算法使网络吞吐量平均上升19%,每个时隙的数据流平均数量平均上升12%.

表 1 仿真参数设置

参数	数值
系统带宽 $W$	1800 MHz
传输功率 $P_t$	0.1 mW
背景噪声 $N_0$	-134 dBm/MHz
路径损耗指数 $V_n$	3
相对距离 ( $d_{ref}$ dB)	1.5 m
距离 $d_{ref}$ 的路径损耗 $PL_0$	71.5 dB
时隙 $\Delta t$	18 $\mu$ s
超级帧中的时隙数量	1000

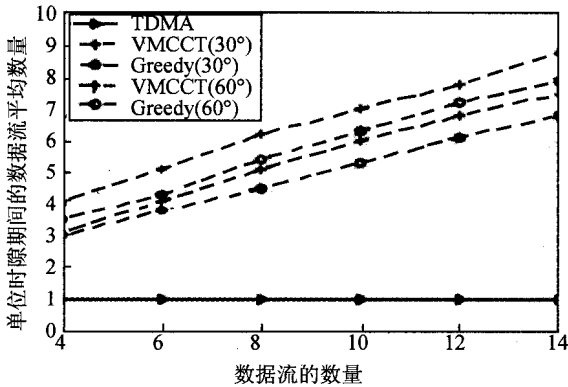


图5 数据流密度增加时单位时隙期间的平均数据流数量的变化情况

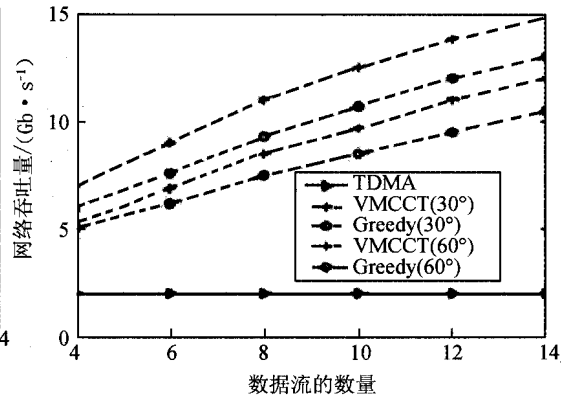


图6 数据流密度增加时网络吞吐量的变化情况

还在图 7 和图 8 中比较了波束宽度上升时 VMCCT 算法的性能. 通过增加波束宽度, 信号可以覆盖更广范围. 这将加重干扰现象, 降低并行传输的机会. 评估了数据流密度为 8 和 14 时增加波束宽度对网络吞吐量的影响. 图 7 给出了波束宽度变化时每个时隙的数据流平均数量. 可以看出, 与 Greedy 算法相比, VMCCT 算法在每个时隙期间可多传输 1 个数据流. 图 8 表明, 当波束宽度增加时, 由于干扰更加严重, 所以网络吞吐量下降. 相比之下, 当数据流数量分别为 14 个和 8 个时, VMCCT 算法的性能总是优于 Greedy 算法, 且平均增益分别达 1.5 和 2.0  $\text{Gb} \cdot \text{s}^{-1}$ . 当房间内活跃设备/数据流数量增多时, 由于干扰更加严重, 所以每个数据流的平均数据率下降. 然而, 因为并行传输次数增多, 所以网络吞吐量上升. 由于 TDMA 算法的简洁性, 吞吐量在不同波束宽度条件下保持不变. 如果在同一时刻只允许一次传输, 则干扰不会产生影响. 总体来说, 本文 VMCCT 算法在每个时隙内的数据流平均数量更多, 数据率更高, 所以性能优于 Greedy 算法.

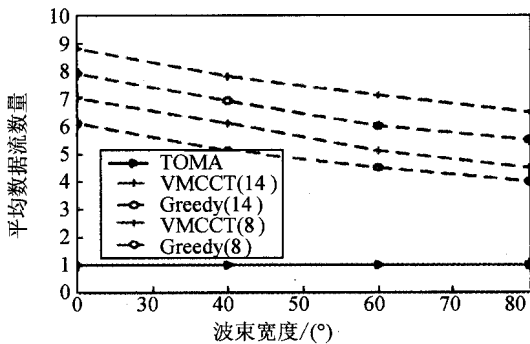


图7 波束宽度增加时单位时隙期间的平均数据流数量的变化情况

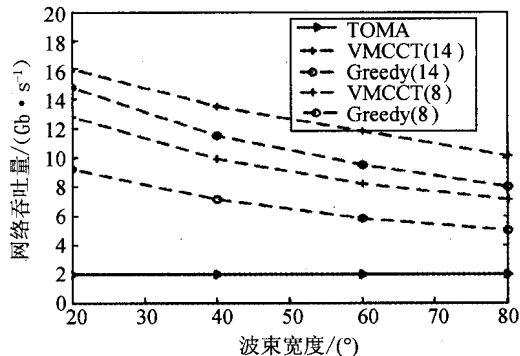


图8 波束宽度增加时网络吞吐量的变化情况

3.2 多跳场景

60-GHz 网络的多跳传输可促进并行传输, 有助于提高网络吞吐量. 然而, 它会影响各个数据流的端到端数据率. 在多跳场景下评估了本文算法的性能, 并与 TDMA 算法和 Greedy 算法做比较. 图 9 给出了数据

流数量增加时,网络吞吐量的变化情况.从图9中可以看出,随着数据流的数量增加,TDMA算法的性能基本不变,Greedy算法和VMCCT算法的网络吞吐量都在增加,但VMCCT算法的性能更优.这主要是因为本文算法采取时分和空分策略,通过利用顶点着色算法和基于距离的中继选择算法等手段,有效地提高了时隙利用率,因此取得了更好的结果.此外,注意到,当数据流数量不变,数据传输的跳数增加(从30跳到60跳)时,Greedy算法和VMCCT算法的网络吞吐量都在下降.这是由于60-GHz网络的数据率要求较高,跳数太多会对各个数据流的并行传输产生干扰.而本文VMCCT算法利用中继站与链路长度高于各自群组平均链路长度的DEVs进行通信,在一定程度上可缓解网络干扰,促进并行传输.

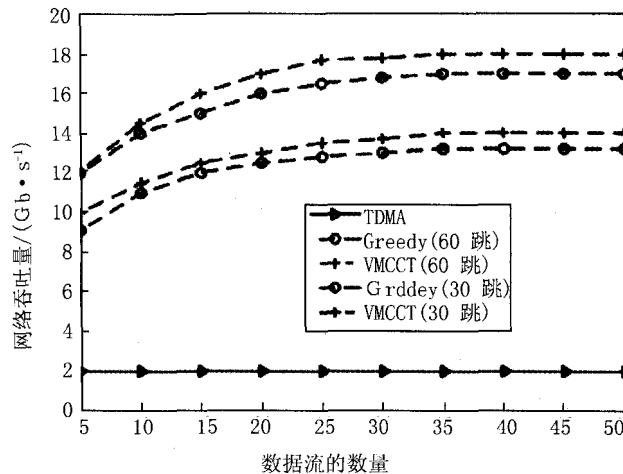


图9 数据流密度增加时网络吞吐量的变化情况

## 4 结束语

为了提高60-GHz网络的通信质量,文中提出一种基于顶点多着色的时隙分配算法VMCCT.仿真结果表明,该算法在网络吞吐量和单个时隙期间平均数据流吞吐量方面,性能优于Greedy和TDMA,提升幅度分别达到19%和12%.在下一步工作中,将对蜂窝网络中的节能机制进行研究,利用非协作博弈理论,提出一种基于机会型开关策略的基站自适应工作机制.

## 参 考 文 献

- [1] An X, Prasad R V, Niemegeers I. Impact of antenna pattern and link model on directional neighbor discovery in 60 GHz networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2011, 10(5): 1435-1447.
- [2] 张芳, 邹卫霞, 杜光龙, 等. 60-GHz毫米波无线网络中基于归一化分阶效用函数功率控制算法[J]. 电子与信息学报, 2013, 35(2): 291-296.
- [3] Qiao J, Cai L X, Shen X, et al. Enabling multi-hop concurrent transmissions in 60 GHz wireless personal area networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2014, 10(11): 3824-3833.
- [4] Singh S, Mudumbai R, Madhoo U. Interference analysis for highly directional 60-ghz mesh networks: The case for rethinking medium access control [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking (TON), 2014, 19(5): 1513-1527.
- [5] Baykas T, Sum C S, Lan Z, et al. IEEE 802. 15. 3c: the first IEEE wireless standard for data rates over 1 Gb/s [J]. IEEE Communications Magazine, 2011, 49(7): 114-121.
- [6] Sum C S, Harada H. Scalable heuristic STDMA scheduling scheme for practical multi-Gbps millimeter-wave WPAN and WLAN systems [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2012, 11(7): 2658-2669.
- [7] Jin S, Choi M, Kim K, et al. Opportunistic spatial reuse in IEEE 802. 15. 3c wireless personal area networks [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2013, 62(2): 824-834.
- [8] Cai L X, Cai L, Shen X S, et al. REX: a randomized exclusive region based scheduling scheme for mmWave WPANs with directional antenna [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2015, 9(1): 113-121.
- [9] Qiao J, Cai L X, Shen X, et al. STDMA-based scheduling algorithm for concurrent transmissions in directional millimeter wave networks



- [C]//2012 IEEE International Conference on Communications (ICC). Canada: IEEE Press, 2012:5221-5225.
- [10] Yang Z, Cai L, Lu W S. Practical scheduling algorithms for concurrent transmissions in rate-adaptive wireless networks[C]//29th IEEE International Conference on Computer Communications (INFOCOM). San Diego: IEEE Press, 2010:1-9.
- [11] Goratti L, Wysocki T, Akhavan M R, et al. Optimal beamwidth for beacon and contention access periods in IEEE 802.15.3c WPAN [C]//2010 IEEE 21st International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC). Turkey: IEEE Press, 2010:1395-1400.
- [12] Mudumbai R, Singh S, Madhow U. Medium access control for 60 GHz outdoor mesh networks with highly directional links[C]//28th IEEE International Conference on Computer Communications (INFOCOM). Brazil: IEEE Press, 2009:2871-2875.

## Time Slot Allocation Algorithm Based on Vertex Multi-Coloring in Concurrent Transmission of 60-GHz Networks

SUN Li, YIN Hongtan

(School of Information Engineering, Huanghuai University, Zhumadian 463000, China)

**Abstract:** Aiming at the shortcomings of the existing parallel transmission algorithms in 60-GHz networks, the sufficient conditions for the data parallel transmission are analyzed in this paper firstly, and then the vertexes of network are multi-color based on the conflict matrix, and further a time slot allocation algorithm based on vertex multi-coloring is proposed. In addition, we take into account two types of transmission: intra group transmission (single hop) and inter group transmission (multi hop), and a relay selection algorithm based on distance is proposed as a decision index for direct communication or relay communication between transmitter and receiver. We evaluate the proposed algorithm in single-hop and multi-hop scenarios, the simulation results show the proposed algorithm can significantly improve the network throughput and the average number of data flow during the period of time slot. Compared with the traditional Greedy algorithm and the TDMA algorithm, the performance improvement is achieved by 19% and 12% respectively.

**Keywords:** 60-GHz networks; concurrent transmission; multi-coloring; time slot; relay selection; throughput