

基于冲突图的毫米波无线个域网并行调度方案

王一兵, 牛勇, 丁玮光, 吴昊

(北京交通大学电子信息工程学院, 北京 100044)

摘要: 毫米波的定向天线和波束赋形技术使得多条数据流之间的并行传输成为可能, 但并行传输也可能造成更高的多用户干扰。因此在时隙资源有限且请求传输的数据流数较多时, 如何对数据流进行有效的并行调度以提高网络性能, 仍然是一项重要挑战。针对这些问题, 提出了一种基于网络全局冲突图的并行调度算法 (CB-STDMA)。为保证用户的服务质量 (QoS) 需求, 该算法以最大化网络中满足 QoS 需求的流数为目标, 考虑了流之间的冲突干扰, 并且优先对所用时隙数较少的流进行调度来节省资源。通过仿真验证了该算法性能的优势。

关键词: 通信与信息系统; 毫米波通信; 并行调度; 无线个域网; 冲突图

中图分类号: TN929

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-436x.2019010

Contention graph based concurrent scheduling algorithm in millimeter wave WPAN

WANG Yibing, NIU Yong, DING Weiguang, WU Hao

School of Electronics and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China

Abstract: The directional antennas and beamforming techniques in millimeter wave (mmWave) bands are used to make concurrent transmission between multiple flows become possible. However, higher mutual interference may be caused by concurrent transmission. Therefore, when the time slots were limited and the number of data flows was large, how to schedule the concurrent flows efficiently was solved by proposed algorithm. The contention graph based spatial-time division multiple access (CB-STDMA) concurrent scheduling algorithm guaranteed the quality of service (QoS) of users, and aimed at maximizing the number of flows with their QoS requirements satisfied. It considered the interference between different flows, and a higher priority was given to the flow with fewer time slots requirement. Extensive simulations demonstrated that the proposed CB-STDMA algorithm increased the number of flows with their QoS requirements satisfied and the network throughput by 50% and 20% respectively compared with the existing algorithms.

Key words: communication and information system, millimeter-wave communications, concurrent scheduling, WPAN, contention graph

1 引言

随着移动数据业务需求的急剧增长, 位于 30~300 GHz 的毫米波频段在第五代 (5G) 移动通

信系统中逐渐受到了广泛的关注。其中, 60 GHz 毫米波 (以下简称毫米波) 频段是研究中使用较多的一个频段。一方面, 毫米波较大的带宽和较高的发射功率, 为高清视频、即时音乐、高清图像传输等

收稿日期: 2018-05-02; 修回日期: 2018-11-06

通信作者: 牛勇, niuy11@163.com

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61801016); 中国博士后科学基金资助项目 (No.2018T110041); 轨道交通控制与安全国家重点实验室 (北京交通大学) 自主研究课题基金资助项目 (No.RCS2017ZT009)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.61801016), China Postdoctoral Science Foundation (No.2018T110041), The State Key Lab of Rail Traffic control & safety of Beijing Jiaotong University (No.RCS2017ZT009)

无线个域网 (WPAN, wireless personal area network) 中带宽密集型多媒体服务的实现提供了可能^[1-2]。另一方面, 对于毫米波的高传播损耗, 实际中一般采用定向天线和波束赋形技术加以克服。将发射机和接收机的波束相互对准^[3], 这种定向通信使不同链路之间的干扰大大减小, 因此, 通过合适的调度算法, 可以充分利用空分复用技术来进行并行传输^[4], 进而提高整个网络的性能。

2 相关工作

在之前针对毫米波无线网络调度问题的研究中, 许多基于时分复用 (TDMA, time division multiple access) 的方案被用于传输调度^[5-6]。后来由于定向天线和波束赋形技术的发展, 传播损耗对系统的影响得以改善^[7-8]。并且定向通信可以减少链路之间的干扰, 因此采用并行传输的方式可以提高系统吞吐量^[9]。在现有的相关工作中, 文献[5-6]的方案都是基于 TDMA 提出的, 其目的是提高系统的传输速率和整个网络的吞吐量, 尽管这 2 种方案在一定程度上提高了网络性能, 但与并行传输所能达到的传输速率和网络吞吐量相比, 还是远远不够的。文献[10]提出了一种在速率自适应无线网络中的双重更新并行调度算法, 但并未考虑毫米波的特性所带来的影响。文献[4]在毫米波条件下提出了基于最大 QoS 独立集的并行调度算法, 但是该算法是在小小区回传网络的场景下得出的。文献[11]提出了一种基于独占区的调度算法, 确保了毫米波无线个域网内的并行传输总是比顺序的时分复用算法性能更佳。文献[12]提出了一种在考虑了流的吞吐量需求的前提下, 以最大化网络中总流数为目标的翻转性算法, 但是并未考虑网络中关于流之间冲突干扰的全局性信息。文献[13]提出了一种分布式传输功率控制解决方案, 用于设备到设备 (D2D, device-to-device) 链路之间的并行传输调度, 增大同时调度流的速率和并进一步提高网络吞吐量, 但并没有考虑传输效率问题, 无法实现对资源的充分有效利用。文献[14]提出了一种用于毫米波网络的能量有效调度方案, 该方案利用并行传输来实现更高的能量效率, 但没有对网络中的冲突干扰做出应对。因此, 在 60 GHz 的无线个域网场景中, 如何在时隙资源有限的情况下实现对资源的充分有效利用, 以实现网络性能的全局最优, 仍然存在一定的挑战。

本文提出了一种基于冲突图的空时分多址接入调度算法 (CB-STDMA, contention graph based spatial-time division multiple access)。该算法对相同级别的流进行调度, 一方面让所用时隙数较少的流优先被调度, 从而节省出宝贵的时隙资源来调度更多的流; 另一方面, 只有被调度的流之间没有冲突, 即不是相邻链路且相互干扰小于某个门限值时才能被同时调度, 使被调度的流保持较高的速率, 从而进一步增加了网络中满足吞吐量需求的流数以及网络的总吞吐量。本文中最低吞吐量需求称为服务质量 (QoS, quality of service) 需求。

3 系统模型

本文考虑基于 IEEE 802.15.3c 协议的 60 GHz 室内无线个域网场景。场景中包括一个微微网控制 (PNC, piconet controller) 和几个无线节点 (WN, wireless node)。无线节点之间可能有数据流需要进行传输, 每条流都有自己的最低吞吐量需求, 即 QoS 需求。PNC 可以对网络中的数据流进行同步和协调^[15], 并且可以获得每条流的 QoS 需求以及各个无线节点的位置。每个无线节点都装有电子导向定向天线, 从而使收发器之间可以进行定向传输来提高天线增益^[16]。另外, 假设各无线节点之间进行视距 (LOS, line of sight) 传输, 从而尽量降低路径损耗。对于无线节点的发射机和接收机, 则都假设是半双工的, 即同一时刻只允许一条流进行传输 (发送或接收)。

3.1 MAC 层帧结构

在 IEEE802.15.3c 协议中, 网络时间被划分成一系列的超帧^[17], 其介质访问控制层 (MAC, media access control) 帧结构如图 1 所示。每一个超帧由 3 部分组成: 信标周期 (BP, beacon period)、竞争访问周期 (CAP, contention access period)、信道时间分配周期 (CTAP, channel time allocation period)。在 BP 中, 主要对来自 PNC 的网络同步和控制信息进行广播, 如将对各流的调度决策广播给网络中所有的无线节点。在 CAP 中, 设备通过载波监听多点接入/冲突避免 (CSMA/CA, carrier sense multiple access with collision avoidance) 技术将自己的传输请求发送给 PNC。在 CTAP 中, 划分出许多时隙 (TS, time slot), 在每一个时隙, 无线节点之间可以根据 BP 周期中接收到的调度命令进行有效的数据传送。在本文提出的方案中, 因为毫米波的定向传输特

性, 每个时隙可以选择对多个流进行并行调度, 即空时分多址接入 (STDMA, spatial-time division multiple access) [18]。

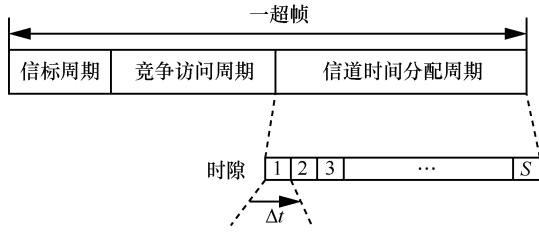


图 1 IEEE802.15.3c 的 MAC 层帧结构

3.2 路径损耗模型

对于毫米波 WPAN 来说, 本文假设节点之间可以进行视距传输, 采用文献[14]中的路径损耗模型。流 i 的接收机 r_i 接收到的来自对应发射机 s_i 的信号功率可以表示为

$$P_r(i, i) = kP_t G_t(i, i) G_r(i, i) d_{ii}^{-n} \quad (1)$$

其中, k 是与 $\left(\frac{\lambda}{4\pi}\right)^2$ 成正比的常数因子, P_t 代表发射机的发射功率, $G_t(i, i)$ 代表发送天线增益, $G_r(i, i)$ 代表接收天线增益, d_{ii} 代表流 i 的发射机与接收机之间的距离, n 为路径损耗指数。

类似地, 流 j 的发射机对流 i 的接收机造成的干扰则可以表示为

$$P_r(j, i) = mkP_t G_t(j, i) G_r(j, i) d_{ji}^{-n} \quad (2)$$

其中, m 是与不同用户信号间的互相关有联系的多用户干扰因子(MUI, multi-user interference)。

3.3 数据传输速率

在高斯加性白噪声(AWGN, additive white Gaussian noise)信道中, 流 i 可达的数据传输速率可以根据香农公式得到, 如式(3)所示。

$$R_i = \eta W \log \left(1 + \frac{P_r(i, i)}{N_0 W + \sum_j P_r(j, i)} \right) \quad (3)$$

其中, η 是描述收发机设计效率的因子, 取值范围为(0,1); W 为信道带宽; N_0 为高斯白噪声的单边功率谱密度。

4 问题建立与分析

假设网络中 PNC 一共收到 F 条流的传输请求, 每条流 i 都有自己的 QoS 需求 q_i 。每个超帧的 CTAP

中包含 S 个时隙, 每个时隙可以同时多个流并行调度。在第 s 个时隙中, 用一个调度向量 H_s 来表示在该时隙有哪些流被调度。全部时隙共 S 个调度向量构成调度矩阵 $H_{F \times S}$, 若该矩阵中与流 i 对应的元素 $e_i^s = 1$, 则代表流 i 在第 s 个时隙中被调度; 若 $e_i^s = 0$, 则代表流 i 在第 s 个时隙中未被调度。

因为用户之间的相互干扰, 只有当调度向量确定以后, 流 i 的实际传输速率才能被确定。因此, 根据式(3)在第 s 个时隙中流 i 的实际传输速率可以表示为

$$R_i^s = \eta W \log \left(1 + \frac{e_i^s P_r(i, i)}{N_0 W + e_j^s \sum_j P_r(j, i)} \right) \quad (4)$$

经过 T 个时隙后, 流 i 已经达到的吞吐量可以表示为

$$T_i = \frac{\sum_{s=1}^T R_i^s \Delta t}{T_{BP} + T_{CAP} + T \Delta t} \quad (5)$$

其中, Δt 代表 CTAP 中时隙的时长, T_{BP} 代表信标周期的时长, T_{CAP} 则代表竞争访问周期的时长。

出于公平与效率的折中考虑, 并且考虑到 5G 场景中各种带宽密集型应用对服务质量的要求, 本文以最大化网络中满足 QoS 需求的流数为目标。满足 QoS 需求是指, 通过调度满足了该流的最低吞吐量需求。只有满足了数据流的 QoS 需求, 才能保证各种带宽密集型应用的服务质量。二进制变量 F_i 表示流 i 的 QoS 需求是否被满足。 $F_i = 1$ 表示流 i 的 QoS 需求已经被满足, $F_i = 0$ 则表示尚未满足。据此, 最优调度问题可以被定式化为问题 P, 如式(6)~式(9)所示。

$$\max \sum_{i=1}^F F_i \quad (6)$$

约束条件为

$$F_i = \begin{cases} 1 & T_i \geq q_i \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (7)$$

$$T \leq S \quad (8)$$

$$e_i^s + e_j^s \leq 1 \text{ 如果流 } i \text{ 和流 } j \text{ 是相邻的} \quad (9)$$

式(8)表示该流的 QoS 需求必须在 CTAP 中给定的时隙数之内能够满足。如果该流在所有的时隙中都被调度, 但其 QoS 需求仍无法满足, 则不予调度。式

(9)表示由于发射机和接收机节点的半双工特性，同一节点在同一时刻只能对一条流进行传输（发射或接收）。当流 i 和流 j 有共享节点（即 $s_i = s_j$ 或 $s_i = r_j$ 或 $r_i = s_j$ 或 $r_i = r_j$ ）时，定义流 i 和流 j 是相邻的。

相邻的流不能被同时调度。

问题 P 是一个整数非线性规划问题，它是 NP-hard 问题^[4]。每条流在每个时隙都可以被调度或者不被调度，如果使用穷举法来计算它的解，当流数为 F 且时隙数为 S 时，计算的复杂度为 $2^{F \times S}$ 。当流数较多时，采用穷举法是非常耗时的。因此，本文提出了一种基于冲突图的并行调度算法来解决这个问题，以降低它的复杂度。

5 基于冲突图的 STDMA 并行调度算法

本节提出了一种基于冲突图的 STDMA 调度算法，即 CB-STDMA 算法，用来提高被调度的流的数量。首先定义了相对干扰、冲突图、预调度集和调度集的概念。

5.1 相对干扰

为了最大化被调度流的数量，尽可能地使被调度的数据流保持一个较高的速率，从而使调度更加有效，在对流 i 进行调度决策时，如果已经决定要调度的流中存在流 j 对流 i 的干扰大于给定的门限 σ ，则对流 i 不予调度。2 条流之间的相对干扰 RI_{ji} 可以定义为

$$RI_{ji} = \frac{N_0W + P_r(j,i)}{P_r(i,i)} \quad (10)$$

其中， $P_r(i,i)$ 、 $P_r(j,i)$ 在式(1)和式(2)中已给出， N_0 为高斯白噪声的单边功率谱密度， W 为信道带宽。

5.2 冲突图

冲突图 $G=(N,E)$ 反映了各个流之间的冲突关系，是网络全局信息的一种表现形式。图中的节点 N ($N=1,2,3,4$) 代表网络中的流；节点之间的边 E 代表着流之间是否存在冲突。称 2 条流之间是有冲突的，当且仅当至少满足以下一个条件：1) 2 条流之间有共享节点；2) 2 条流之间的相对干扰大于给定门限 σ ，相对干扰由式(10)可得。可以用一个方阵 $A=(a_{ij})_{F \times F}$ 来表示冲突图。这个方阵称为对应冲突图的邻接矩阵。当流 i 和流 j 之间有冲突时，矩阵中对应元素 a_{ij} 为 1，否则 a_{ij} 为 0。该定义用式(11)表示。

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, & i \neq j \text{ 且流 } i \text{ 和流 } j \text{ 之间有冲突} \\ 0, & i = j \text{ 或流 } i \text{ 和流 } j \text{ 之间没有冲突} \end{cases} \quad (11)$$

以图 2 为例，图中 4 个节点代表 4 条流，流 1 与流 2 之间有边，代表流 1 与流 2 之间存在冲突，可能是由于 2 条流之间有共享节点或 2 条流之间干扰超过门限值导致的，所以流 1 与流 2 不能同时调度。流 1 与流 4 同理。而流 1 与流 3 之间没有边，说明不存在共享节点和干扰等问题，可以同时调度。此时对应冲突图的邻接矩阵 A 中对应元素 a_{12} 、 a_{21} 、 a_{41} 和 a_{14} 均为 1，其余元素为 0。

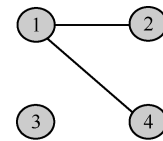


图 2 冲突图实例

5.3 预调度集与调度集

在本文的算法中，并不是所有请求传输的流都可以被调度。为了解决式(6)中的最优调度问题，使大多数流的 QoS 需求得以满足，提高整个网络传输效率，会有很小一部分流被舍弃不参与调度。因为 CTAP 中时隙的个数是有限的，如果该流在所有的时隙中都被调度时，仍然不能满足它的 QoS 需求，则对该流的调度实际上是一种对时隙资源的浪费。因此，对这部分流不予调度，从而把时隙用于对其他流进行有效的调度。为了增加调度的流数，在剩余的流中应当优先对所用时隙数少的流进行调度。当某条流的 QoS 需求被满足后，就认为它的服务质量已经得到保证，继续调度该流，对服务质量的增加也不明显。因此，需求被满足的流在以后的时隙中都不会再被调度，从而把时隙资源供给更多的流使用。然后，将那些可以在给定的 S 个时隙内满足其 QoS 需求的流按照传输所用时隙数的从小到大进行排序，这样得到的可以被调度的流的集合称为预调度集 (PSS, pre-schedule set)，即准备调度的流的集合。具体地，流 i 传输所用的时隙数可以按照式(12)进行计算。

$$\xi_i = \frac{q_i(T_{BP} + T_{CAP} + S\Delta t)}{R_i\Delta t} \quad (12)$$

需要注意的是，式(12)中 R_i 是在没有其他流干扰情况下得到的自身传输速率，即式(3)中去掉 $\sum_j P_r(j,i)$ 项得到的速率； Δt 代表每个时隙的时长。

此外, 把第 s 个时隙中被调度的流的集合叫作第 s 个时隙的调度集 (SS, schedule set), 即调度向量 H_s 中等于 1 的元素对应的流所组成的集合。CB-STDMA 算法对于第 s 个时隙调度的流的数量没有明确的限制, 只要满足可以同时传输的条件, 便可以同时使用第 s 个时隙传输。

事实上, 根据 5.2 节中的冲突图来确定单个时隙调度的流, 虽然没有确定的条数限制, 但相对干扰的门限值会对流的数量进行制约, 同一时隙调度的流的条数不会太多。因为同时调度数量过多时, 必然无法满足相对干扰低于门限值的条件。所以单个时隙调度的流的个数无法确定, 要由本文提出的算法根据实际情况来计算。

5.4 调度算法设计

下面对 60 GHz 无线个域网中的 CB-STDMA 算法进行详细描述。该调度算法的伪代码见算法 1, 其中第 1)行~第 8)行是初始化工作, 第 9)行~第 23)行是算法的主要部分。

首先, 在某一超帧的 CAP 中, 各个无线节点将自己的位置以及数据流的传输请求发送给 PNC, 每条流都有自己的 QoS 需求 q_i 。PNC 收到各条流的传输请求后, 计算各条流传输所用的时隙数 ξ_i , 将 ξ_i 大于 CTAP 中最大时隙数 S 的流舍弃, 剩下的流按照 ξ_i 从小到大的顺序排序, 作为预调度集。然后, 判断可进行同时调度的流。上述过程如算法 1 中的 1)~8)行所示。

CB-STDMA 算法判断可同时调度的流是由 PNC 根据 5.2 节所描述的方法, 生成包含预调度集中所有流的冲突图 $G=(N,E)$, 即生成预调度集的对应冲突图的邻接矩阵, 根据式(10)计算流之间的相对干扰, 然后考虑流之间是否存在共享节点和相对干扰是否超过门限值, 来判断能否同时调度, 确定矩阵中各个元素的值。

本文调度算法为了实现式(6)中的优化目标, 即尽可能提高满足 QoS 需求被调度流的个数, 除了选择并行传输的传输方式本身就可以提高性能外, 算法中选择了不间断的数据流调度方案也是实现优化的关键。在每一个时隙结束时, 都要检查是否有某些流的 QoS 需求已经被满足。当一个流的 QoS 需求已经被满足时, 就将调度向量 H_s 中对应的元素设为 -1, 表示该流在以后的时隙中都不能被调度, 并在下一时隙选择满足条件的新的

流加入调度集合。对于没有完成其 QoS 需求的流, 下一时隙中则继续调度。这一过程如算法 1 中 20)行~22)行所示。算法中调度向量 H_s 中值为 -1 的元素越多, 表示有越多的被调度流已经满足 QoS 需求, 越能体现出算法的优越性。

对于每一个时隙, 如果是第一个时隙或者在上一个时隙中有新的流达到了其 QoS 需求, 就开始一轮新的调度决策。对预调度集中的每一条流按顺序进行判断, 如果这条流以前没有被调度过, 并且与当前调度集中的流 (即已经决定被调度的流) 之间没有冲突, 则接着对调度这条流的收益进行评估。评估的标准是, 如果把它加到当前调度集中可以增加网络的总吞吐量, 就把该流添加进来, 否则放弃对该流的调度, 继续对下一条流进行判断。这一部分如算法 1 中的 11)行~17)行所示。直到所有时隙都做出了调度决策, 从而得出了 S 个时隙的调度矩阵 $H_{F \times S}$ 。

算法 1 CB-STDMA 并行调度算法

- 1) PNC 接收各个节点的位置以及带有 QoS 需求 q_i 的 F 个流的传输请求, 并初始化 $F \times 1$ 的预调度集 $PSS = 1$
- 2) 初始化调度矩阵 $H_{F \times S} = 0$
- 3) 计算每个流传输所用的时隙数 ξ_i , 并将 PSS 中的流按所用时隙数从小到大顺序排列, $I =$ 排序后的序号
- 4) **if** $\xi_i > S$ **then**
- 5) $F = i - 1$
- 6) 更新 $F \times 1$ 的 PSS 以及 $H_{F \times S}$
- 7) **end if**
- 8) 构建 F 个流的冲突图 G , 初始化 $change = 1$
- 9) **for** 时隙 $i (1 \leq i \leq M)$
- 10) **if** $change = 1$ **then**
- 11) **for** 流 $f (1 \leq f \leq F)$ **do**
- 12) **if** $S_i(f) = 0$ 且 i 与当前调度集中其他流没有冲突 **then**
- 13) **if** 加入流 f 可以增加网络总吞吐量 **then**
- 14) $S_i(f) = 1$
- 15) **end if**
- 16) **end if**
- 17) **end for**
- 18) **end if**
- 19) $change = 0, H_{s+1} = H_s$

- 20) **if** 存在 $T_i \geq q_i$ **then**
- 21) **change** = 1, $H_{s+1}(i) = -1$
- 22) **end if**
- 23) **end for**

6 性能评估

本节对本文提出的调度算法进行了仿真，并与文献[4]提出的 MQIS 并行调度算法、文献[12]中提出的 STDMA 并行调度算法和 TDMA 调度算法进行了对比。在 TDMA 算法中，CTAP 的每一个时隙中只允许一条流进行传输。

6.1 仿真参数设置

假设 60 GHz 无线个域网中有 10 个无线节点随机分布在 10 m×10 m 的方形区域内，PNC 位于区域的中央。每个节点所配置的定向天线产生的波束宽度为 60°，并且使用文献[15]中的实际定向天线模型。每条流的源节点和目的节点都是随机选择的，节点之间的平均距离是 1 m。每条流的 QoS 需求是在 1 Gbit/s 到 3 Gbit/s 之间均匀分布的随机变量。仿真中其他的一些主要参数如表 1 所示。

表 1 仿真参数设置

参数名称	参数符号	参数值
系统带宽	W	1 200 MHz
发送功率	P_t	0.1 mW
白噪声单边功率谱密度	N_0	-134 dBm/MHz
时隙时长	Δt	18 μ s
BP 时长	T_{BP}	50 μ s
CAP 时长	T_{CAP}	850 μ s
CTAP 中时隙数	S	2 000
路径损耗指数	n	2

在不同任务数时都是影响系统性能的关键因素。而存储服务器 CPU 性能和磁盘性能则在不同任务数时对系统 I/O 响应时间的影响都很小，属于非关键性能影响因素。上述网络 RAID 存储系统因素的一种有效手段，在优化系统性能时，可基于上述分析结果着重考虑改善关键性能影响因素，忽略非关键性能影响因素，以达到事半功倍的效果。

6.2 性能指标

为了验证所提出的调度方案的性能，本文主要

从满足 QoS 需求的流数以及系统的吞吐量这 2 个方面进行评估。系统的吞吐量是指网络中所有流的吞吐量总和。

分别改变网络中发出传输请求的总流数、CTAP 中时隙的个数以及判断相对于干扰时所用的判决门限 σ ，观察满足 QoS 需求的流数和系统吞吐量的变化情况。所有仿真结果图中的每个点是 100 次随机仿真后的平均值。

6.3 仿真结果与分析

满足 QoS 需求的流数和系统吞吐量随着网络中总流数的变化分别如图 3 和图 4 所示。此时时隙数为 2 000，判决门限为 10^{-1} 。

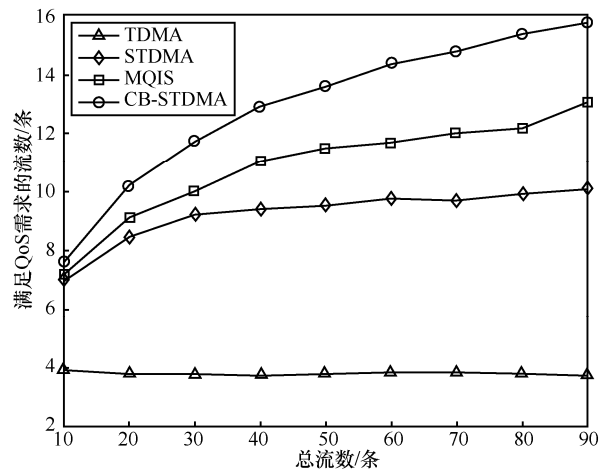


图 3 不同流数下满足 QoS 需求的流数

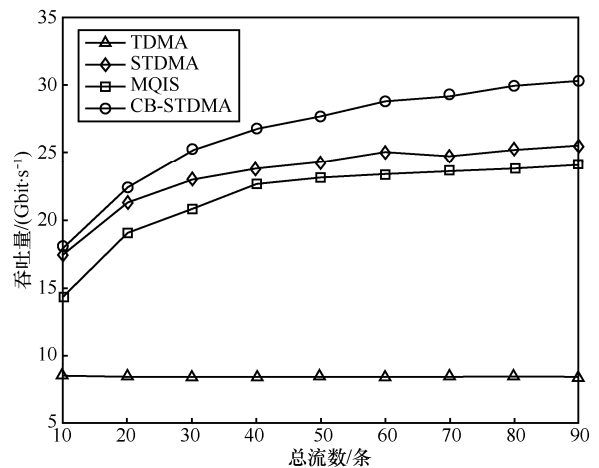


图 4 不同流数下的系统吞吐量

从图 3 和图 4 可以看出，当网络中流的总数增长时，本文提出的 CB-STDMA 算法、MQIS 算法和 STDMA 算法满足 QoS 需求的流数和系统吞吐量这 2 个指标都随之增长，但是 TDMA 算法的

2 个指标却几乎不变。这是因为 TDMA 算法在每个时隙只能对一个流进行调度，所以不管流的总数如何变化，它所能满足的流数是有限的。而 CB-STDMA 算法、MQIS 算法和 STDMA 算法允许多条流之间的并行传输，所以流的总数越多，进行并行调度的机会越大，能满足需求的流数和系统吞吐量也越大。但由于系统容量和时隙资源的限制，增长趋势逐渐趋于平缓。此外，CB-STDMA 算法比 MQIS 算法和 STDMA 算法性能更优越。特别地，当流总数为 90 时，MQIS 算法能成功满足 13 条流，吞吐量约为 24 Gbit/s，STDMA 算法能成功满足约 10 条流，吞吐量约为 25 Gbit/s，CB-STDMA 算法则可以成功满足约 16 条流，吞吐量达到约 30 Gbit/s。与 MQIS 和 STDMA 相比，CB-STDMA 满足 QoS 需求的流数分别增长了约 23% 和 60%，吞吐量分别增长了约 25% 和 20%。造成这种现象的原因主要来自于以下 2 个方面。

1) MQIS 算法中，只利用并行传输和 QoS 需求来判定优先级，没有舍弃部分需求过大的流，也没有考虑调度流的条数和传输效率，会造成部分资源浪费。STDMA 算法中，只要将流加入调度集可以增加网络的吞吐量，就决定调度该流，没有考虑调度集中其他流对该流的干扰。而 CB-STDMA 中，将网络中所有流的冲突关系都用冲突图表示出来，根据流之间的冲突关系进行调度，使得调度集中不同流间相互干扰减小，从而增加了所调度的流的传输速率。

2) 在 CB-STDMA 算法中，按照所需时隙数由少到多的优先级顺序对流进行选择调度，并不是所有请求传输的流都可以被调度，若 CTAP 中所有时隙都不够满足该流的传输需求，则直接舍弃该流不予调度，这样便能节省出时隙，供给那些可以实现其 QoS 需求的流利用，使整个网络的传输效率得到明显提高。综上所述，CB-STDMA 算法在优化问题，即被调度流的数量和网络总吞吐量方面有着明显的优势。

满足 QoS 需求的流数和系统吞吐量随着 CTAP 中时隙数目的变化如图 4 和图 5 所示。此时网络中的总流数为 90，门限值仍取 10^{-1} 。

从图 5 和图 6 中可以看出，CB-STDMA 算法的 2 种指标仍然都优于 MQIS 算法、STDMA 算法和 TDMA 算法。特别地，在时隙数为 5 000 时，

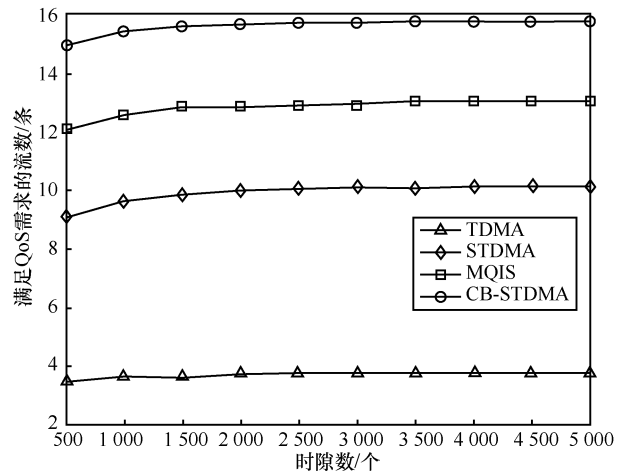


图 5 不同时隙数下满足 QoS 需求的流数

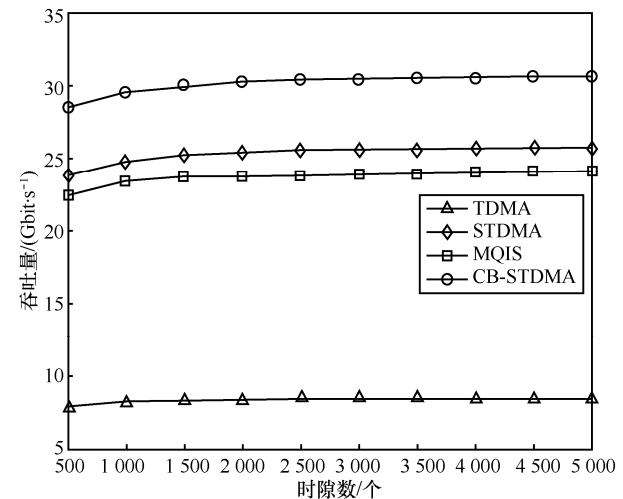


图 6 不同时隙数下的系统吞吐量

CB-STDMA 与 MQIS 相比，成功满足的流数增加了超过 23%，系统吞吐量增加了约 25%；而 CB-STDMA 比 STDMA 成功满足的流数增加了超过 60%，系统吞吐量增加了约 20%。但是，这 4 种算法都只在时隙数为 500 到 2 000 时性能有增长趋势，当时隙数超过 2 000 时，性能几乎没有变化。这是因为在时隙资源较少时，时隙数是影响网络性能的主要限制因素，有限的资源无法满足较多流的 QoS 需求，因此增加时隙数使更多的流成功调度并且增加网络的吞吐量。而时隙数目继续增加时，由式(5)可知，吞吐量与时隙数的关系不大，因此总吞吐量并没有太大变化，满足最小吞吐量需求的流数也没有太大变化。所以，想要达到理想的优化目标，获得更多被调度的流，并且保证资源的充分利用，必须选择合适的时隙数目。在本文其他仿真中，只要选择时隙数在 2 000 时就足够得到接近最

优的性能。

改变冲突图中的干扰判决门限 σ ，相应的指标变化如图 7 和图 8 所示。图中的横坐标是将门限值以 10 为底取对数的值(如门限值为 10^{-1} 时，则横坐标为 -1)。此时流的总数取 90，时隙数取 2 000。

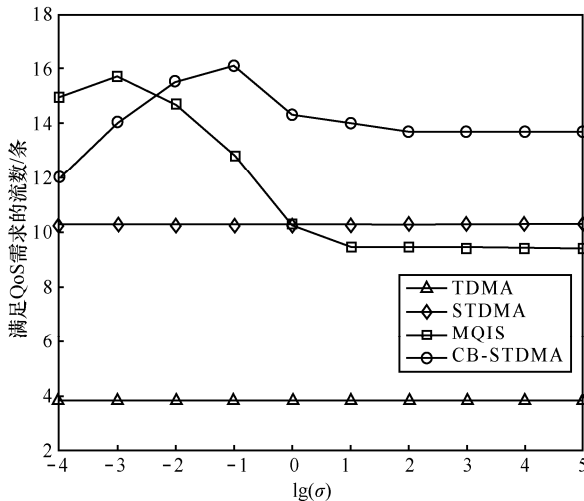


图 7 不同门限值下满足 QoS 需求的流数

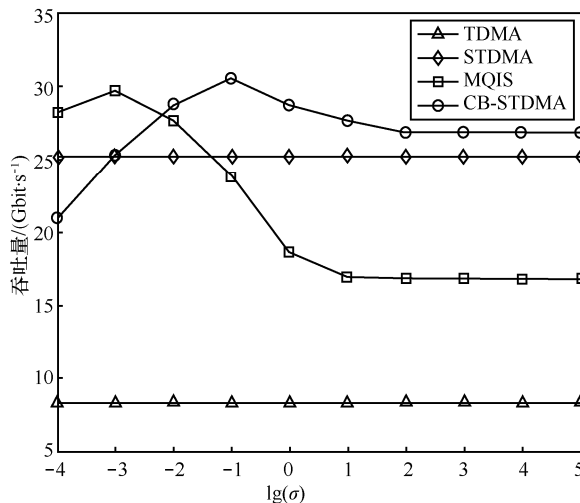


图 8 不同门限值下的系统吞吐量

从图 7 和图 8 中可以看出，TDMA 与 STDMA 因为不涉及冲突图中的干扰判断门限，因此网络性能并不随着门限值变化。而对于 CB-STDMA 和 MQIS，若门限设置过小，则 2 条流之间有很小干扰时就认为它们之间有冲突，不利于对流进行充分的调度。此时，门限值是限制网络性能的主要因素，增大门限值有利于增加满足 QoS 需求的流数和网络的总吞吐量，因此曲线在门限值为 $10^{-4} \sim 10^{-1}$ 时呈上升趋势。当门限值继续增大

时，即使各条流之间有较大的干扰，也认为它们之间不存在冲突，这时将受到干扰较大的流加入调度集中，对于增加网络的性能是不利的，因此门限值为 $10^{-1} \sim 1$ 时，曲线出现下降。在门限值 10^{-1} 时，本文提出的 CB-STDMA 算法性能最优，这也是在之前仿真中将门限值设为 10^{-1} 的原因。门限值大于 10 时，由于流之间的相对干扰根本达不到这么大，门限值失去了它的约束作用，因此 CB-STDMA 的相应指标曲线也变得平坦。

7 结束语

本文为毫米波无线个域网场景设计了一种基于冲突图的并行调度算法。在进行调度决策时，考虑了网络全局的冲突条件，包括流之间的互干扰条件和半双工限制条件，并优先调度容易满足 QoS 需求的流，从而最大化满足 QoS 需求的流数和网络吞吐量。仿真结果表明，本文提出的 CB-STDMA 算法与 STDMA 算法和 TDMA 算法相比，在满足 QoS 需求的流数和网络吞吐量方面均有大幅提升。此外，通过仿真还发现，通过优化冲突判决时的门限值可提升算法的性能。

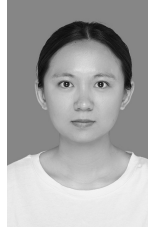
参考文献:

- [1] YONG S K, XIA P, VALDES-GARCIA A. 60GHz technology for Gbps WLAN and WPAN: from theory to practice[M]. Chichester: John Wiley & Sons Ltd., 2011: 1-6.
- [2] ISLAM M N, SAMPATH A, MAHARSHI A, et al. Wireless backhaul node placement for small cell networks[C]//The 48th Annual Conference on Information Sciences and Systems. 2014: 1-6.
- [3] WANG J, LAN Z, PYO C W, et al. Beam codebook based beamforming protocol for multi-Gbps millimeter-wave WPAN systems[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2009, 27(8): 1390-1399.
- [4] ZHU Y. QoS-aware scheduling for small cell millimeter wave mesh backhaul[C]//IEEE International Conference on Communications. 2016: 1-6.
- [5] SUM C, LAN Z, FUNADA R, et al. Virtual time-slot allocation scheme for throughput enhancement in a millimeter-wave multi-Gbps WPAN system[J]. IEEE Journal on Selected Areas Communications, 2009, 27(8): 1379-1389.
- [6] SUM C, ZHOU L, RAHMAN M A, et al. A multi-Gbps millimeter-wave WPAN system based on STDMA with heuristic scheduling[C]//IEEE GLOBECOM. 2009: 1-6.
- [7] TSANG Y, POON A, ADDEPALLI S. Coding the beams: improving beamforming training in mmWave communication system[C]//IEEE Global Telecommunications Conference. 2011: 1-6.
- [8] XIAO Z, HE T, XIA P, et al. Hierarchical codebook design for beamforming training in millimeter-wave communication[J]. IEEE

- Transactions on Wireless Communications, 2016, 15(5): 3380-3392.
- [9] SON I K, MAO S, GONG M X, et al. On frame-based scheduling for directional mmWave WPANs[C]// The 31st Annual IEEE International Conference on Computer Communications. 2012: 2149-2157.
- [10] YANG Z, CAI L, LU W S. Practical scheduling algorithms for concurrent transmissions in rate-adaptive wireless networks[J]. IEEE International Conference on Computer Communications, 2010, 10(9): 1-9.
- [11] CAI L X, CAI L, SHEN X, et al. Rex: a randomized exclusive region based scheduling scheme for mmWave WPANs with directional antenna[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2010, 9(1): 113-121.
- [12] QIAO J, CAI L X, SHEN X, et al. STDMA-based scheduling algorithm for concurrent transmissions in directional millimeter wave networks[C]//IEEE International Conference on Communications. 2012: 5221-5225.
- [13] LI Y, ZHANG Z, WANG W, et al. Concurrent transmission based stackelberg game for D2D communications in mmWave networks[C]// IEEE International Conference on Communications. 2017:1-6.
- [14] NIU Y, GAO C, LI Y, et al. Energy-efficient scheduling for mmWave backhauling of small cells in heterogeneous cellular networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 66(3):2674-2687.
- [15] NIU Y, LI Y, JIN D P, et al. A survey of millimeter wave (mmWave) communications for 5G: opportunities and challenges[J]. Wireless Networks, 2015, 21(8):1-20.
- [16] RAPPAPORT T. Wireless communications: principles and practice[M]. New Jersey: Prentice Hall PTR, 1996.
- [17] TOYODAI T, SEKI T, IIGUSA K, et al. Reference antenna model with sidelobe for TG3c evaluation[Z].IEEE document, 2006: 802-15.
- [18] NELSON R, KLEINROCK L. Spatial TDMA—a collision-free

multihop channel access protocol[J]. IEEE Transactions on Communications, 1985, 33(9):934-944.

[作者简介]



王一兵（1995- ），女，黑龙江大庆人，北京交通大学博士生，主要研究方向为毫米波通信和媒体访问控制。



牛勇（1988- ），男，山西太原人，博士，北京交通大学教授，主要研究方向为毫米波通信无线网络资源分配与性能优化无线网络 MAC 层协议设计、高速铁路移动通信和车联网通信。

丁玮光（1994- ），女，河北秦皇岛人，北京交通大学硕士生，主要研究方向为毫米波通信和媒体访问控制。

吴昊（1973- ），女，北京人，博士，北京交通大学教授，主要研究方向为网络安全、宽带移动通信系统和专用移动通信。