

基于 TDMA 的分布式全双工链路调度算法研究

史 琰, 郁威威

(西安电子科技大学综合业务网理论及关键技术国家重点实验室, 陕西西安 710071)

摘 要: 为了解决无线 Ad hoc 网络在负载较重时网络性能差等问题, 提出了一种将 TDMA (Time Division Media Access) 与 CCFD (Co-time Co-frequency Full Duplex) 相结合的分布式全双工 MAC (Media Access Control) 协议. 数据传输前节点首先在链路共存准则的基础上进行抑制检查, 随后主链路按一定的优先级筛选二级链路并发起调度请求, 调度所需的四次握手过程在业务时隙头部完成. 本协议在不影响传统 TDMA 半双工通信的条件下, 增加同一时隙中可以共存的链路数, 改善网络的吞吐量和时延性能.

关键词: 时分多址技术; 全双工; 链路调度; 分布式网络

中图分类号: TN915 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2018)02-0507-06

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2018.02.034

Study of a Distributed Link Scheduling Algorithm in TDMA Networks Using Co-time Co-frequency Full Duplex

SHI Yan, YU Wei-wei

(State Key Lab. of ISN, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

Abstract: Traditional wireless Ad hoc networks have the problem of poor network performance under the circumstances of high traffic load. To solve this problem, a distributed full duplex MAC protocol, which combines TDMA and CCFD together, is proposed. In this protocol, all nodes need to do suppression inspecting according to link co-existing schemes before data transmission begins. Then, primary TDMA links start searching secondary links according to the scheduling priority, and send out corresponding requests. The four times hand-shaking process of scheduling process is accomplished within the head of the traffic slot. With no affect on the half-duplex transmissions of traditional TDMA networks, it can increase as many links coexisting with originla links in the same slot as possible. The simulation results show that this protocol actually improves throughput and time delay performances of the wireless Ad hoc networks.

Key words: TDMA (time division media access); full duplex; link scheduling; distributed networks

1 引言

在分布式无线 Ad hoc 网络中, 为了减少节点共享无线信道的冲突和开销, 时分多址技术 (TDMA) 作为一种无冲突、高系统容量的媒质接入控制 (MAC) 协议被广泛使用. TDMA 的点对点链路采用时分双工 (TDD: Time Division Duplex) 的方式传输, 在同一频率的两个不同时隙中完成发送和接收, 利用了时间的正交性, 但这仍属于半双工通信, 网络吞吐量仍有较大的提升空间.

相关研究表明^[1-5], 随着天线和数字干扰消除技术的发展, 同时同频全双工 (CCFD) 的出现使得真正意义

上的全双工通信变为可能. CCFD 降低节点的发送对自身接收的干扰, 允许节点同时接收和发送数据, 实现吞吐量的翻倍. 目前应用 CCFD 的 MAC 协议大多基于 IEEE 802.11 CSMA/CA^[6-11] 设计, 比较典型的有 FD-MAC^[6] 和 ContraFlow^[7] 两种. 在 FD-MAC 中, 收到占用信道节点所发数据包的节点快速搜索是否有反向数据包, 有则建立反向链路, 没有则发送忙音. ContraFlow 在 FD-MAC 的基础上, 通过计算信干比, 挑选可以建立二级传输链路的节点. 无论对于 FD-MAC 还是 ContraFlow, 单一的调度机制都使得链路建立的成功率较低, 且基于竞争的接入机制存在冲突问题, 限制了 CCFD 给网络吞吐量带来的增益.

相较于 CSMA/CA 这类竞争多址技术, TDMA 更适合网络负载重的场景, 通过将 TDMA 与 CCFD 结合, 本文提出了一种新型分布式全双工 TDMA 协议 (FD-TDMA). 该协议利用全双工节点同时收发能力, 调度同一时隙中可以和半双工链路共存的链路, 提高时隙复用率和网络吞吐能力. 此外, FD-TDMA 无接入冲突, 改善了竞争型全双工协议因接入冲突导致的吞吐能力低的问题.

2 链路共存条件分析

2.1 半双工 TDMA 的链路共存准则

传统 TDMA 节点采用半双工通信, 为了避免占用相同时隙的链路之间的干扰, 需建立相应的时隙复用准则.

定义 t 时隙中节点 i 的射频状态为 $S_{i,t}$, 则有:

$$S_{i,t} = \begin{cases} 00, & \text{idle} \\ 01, & \text{rx} \\ 10, & \text{tx} \end{cases} \quad (1)$$

式(1)表示, 半双工节点只有空闲, 接收和发送三种状态. 定义节点 i 的邻居节点集合为 N_i , 如果 i 占用时隙 t 向任一节点 $j \in N_i$ 发送数据, 则链路 (i, j) 可以成功传输的充要条件为: (a) $S_{i,t} = 10$; (b) $S_{j,t} = 01$; (c) 对 $\forall n \in N_j - \{i\}$, $S_{n,t} = 0X$, 其中, X 取 0 或 1.

根据半双工系统的特点, 上述充要条件的成立是显而易见的, 由此可得下述定理 1.

定理 1 在一个由全向传输的半双工节点组成的网络中, 同一时隙任意两个发送节点的距离 (定义为两个节点的最短跳数) 至少为 3.

证明 设 i 和 k 为 t 时隙两个处于发送状态的节点, 且 i 与 k 的距离 $D(i, k) < 3$. (1) $D(i, k) = 0$, 表示节点 i 同时处于收发状态, 这与条件 (a) 矛盾; (2) $D(i, k) = 1$, 表明 $k \in N_i$ 且为发送状态, 则不满足条件 (b); (3) $D(i, k) = 2$, 表明至少存在 $j \in N_i$, 满足 $k \in N_j$, 则不满足条件 (c), 证毕. 定理 1 说明在一个由全向传输的半双工节点组成的网络中, 时隙的空间复用距离为 3, 该距离限制了网络的吞吐能力.

2.2 全双工时分多址协议

基于半双工链路共存准则, FD-TDMA 调度同一时隙中可以和原半双工链路共存的链路, 记其为二级链路.

2.2.1 共存链路分析

在式(1)的基础上添加 $S_{i,t} = 11$, 表示节点 i 的全双工模式. 记链路 (k, l) 与主链路 (i, j) 占用同一时隙, 则一定有 $k \neq i$ 且 $l \neq j$; 为确保两条链路不互相干扰, 至少应满足彼此的发送节点不在对方接收节点的一跳范围内, 即:

$$\begin{cases} D(k, j) \neq 1, & k \neq i \\ D(l, i) \neq 1, & l \neq j \end{cases} \quad (2)$$

在一个由全向传输的全双工节点组成的网络中, 存在三种可以被调度的二级链路. 下面结合式(2)进行证明:

(1) $D(k, j) = 0$, 即 $k = j$.

节点 j 作为二级链路的发送节点, 则有 $D(l, i) \leq 2$, 又因为 $D(l, i) \neq 1$, 所以 $D(l, i)$ 只能等于 0 或 2, 对应以下两种情况:

(a) 如果 $D(l, i) = 0$, 即 $(k, l) = (j, i)$, 则 $S_{i,t}$ 和 $S_{j,t}$ 均等于 11, 此时 i 和 j 均实现全双工通信, 如图 1, (j, i) 可以被调度, 记为反向链路 (RL: Reverse Link).

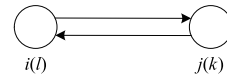


图 1 反向链路示意图

(b) 如果 $D(l, i) = 2$, 即 $(k, l) = (j, l)$, 则 $S_{j,t} = 11$, j 实现全双工通信, 如图 2, 此时 (j, l) 可以被调度, 记为下游链路 (DL: Downstream Link).

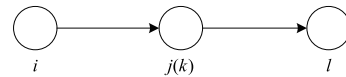


图 2 下游链路示意图

(2) $D(k, j) \neq 0$, 即 $k \neq j$.

由式(2)可知 $D(k, j) \neq 1$, 于是有 $D(k, j) \geq 2$, 又 $D(l, i) \neq 1$, 则根据 $D(l, i)$ 的值分两种情况讨论:

(a) 如果 $D(l, i) = 0$, 即 $(k, l) = (k, i)$, 则 $S_{i,t} = 11$, i 实现全双工通信, 如图 3, (k, i) 可以被调度, 记为上游链路 (UL: Upstream Link).

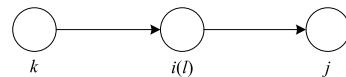


图 3 上游链路示意图

(b) 如果 $D(l, i) \geq 2$, 则 $S_{i,t} = S_{k,t} = 10$, $S_{j,t} = S_{l,t} = 01$. 此时, (k, l) 和 (i, j) 是两条独立的半双工链路, 如图 4, 根据 $D(k, i)$ 的取值存在两种不同的 (k, l) .

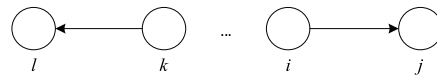


图 4 非全双工链路示意图

当 $D(k, i) > 1$ 时, i 与 k 无法直接通信, 因此 (k, l) 很难被 (i, j) 调度, 特别地, 若 $D(k, i) > 2$, 则 (i, j) 和 (k, l) 符合半双工时分复用准则. 当 $D(k, i) = 1$ 时, 理论上 (k, l) 可以被调度, 但它是一条与 (i, j) 独立的链路, 没有利用 CCFD 的全双工能力, 因此, 不在本协议的考虑范围内. 经以上分析, FD-TDMA 存在 RL、DL 和 UL 三种二级链路. 记主链路发送节点 i 为 PT (Primary Transmit-

ter),接收节点 j 为 PR (Primary Receiver);记二级链路发送节点 k 为 ST (Secondary Transmitter),接收节点 l 为 SR (Secondary Receiver).

2.2.2 调度优先级

由上节分析可知,一条半双工链路在同一时隙中至多可以调度一条二级链路.

对于 RL 链路(j, i), j 通过(i, j)上传的数据帧获取调度所需的信息,且 i 的两跳范围内没有占用相同时隙 t 的节点,无需考虑 i 的接收干扰,因此 RL 的调度开销较小;对于 DL 链路(j, l),为了避免 l 处产生干扰, j 需要与 l 交互来获取 l 的邻居节点的射频状态,相比 RL 耗费更多的开销;而对于 UL 链路(k, i),时隙 t 中可能存在多个节点有数据帧要向 i 发送,如果 i 不与邻居交互则可能造成接收冲突,进行交互则会耗费较大的开销.综合考虑调度耗费的开销和调度的成功率,对 RL、DL 和 UL 三种链路设定由高到低的调度优先级.

3 分布式调度算法

3.1 抑制检查

3.1.1 发送抑制检查

为了确保二级链路不影响其它链路的接收,由可能被干扰的节点发送冲突抑制信息 CSI (Collision Suppression Information) 进行发送抑制.网络中可能被干扰的节点只有 PR 和 DL 的接收节点,记后者为 SR_d 节点.

用 CR_p 记录接收 PR 节点发送的 CSI 的情况, A_j 为节点 j 一跳范围内的 PR 节点数,则 CR_p 的可能值如式(3).

$$CR_p = \begin{cases} 0, & A_j = 0 \\ 1, & A_j = 1 \\ 2, & A_j \geq 2 \end{cases} \quad (3)$$

同样地,用 CR_s 记录接收 SR_d 节点发送的 CSI 的情况, B_j 为节点 j 一跳范围内的 SR_d 节点数,则 CR_s 可能的值如式(4).

$$CR_s = \begin{cases} 0, & B_j = 0 \\ 1, & B_j \geq 1 \end{cases} \quad (4)$$

除 PT 外所有 CR_p 或 CR_s 不等于 0 的节点的发送都将被抑制.每个业务时隙结束时刻节点都要更新 CR_p 和 CR_s ,以确保抑制信息的时效性.

3.1.2 接收抑制检查

二级链路的接收节点包括 PT 和 SR_d 节点.两跳范围不冲突的时隙复用准则保证了 PT 节点处的接收无干扰,只需对 SR_d 节点的接收进行抑制检查.由于 RL 的优先级高于 DL,因此 SR_d 节点周围可能存在的发送节点有 PT 和 PR 节点.通过检查记录的 CR_p , SR_d 节点判断是否存在其它邻居 PR 节点,如果 CR_p 大于 1,则本节点的接收被抑制;此外,通过检查邻居节点占用的时

隙可以判断是否存在邻居 PT 节点,如果有节点占用了当前时隙,则本节点的接收也将被抑制.

3.2 链路调度

对于任一业务时隙 t ,记标记为 k 且占用该时隙的节点为 n_k .定义 L_k 为 n_k 的所有非空业务子队列构成的集合,用 $|L_k|$ 表示集合中的元素个数,则 $|L_k| \in \{0, 1, 2, \dots, N\}$,其中 N 为最大邻居节点数.

二级链路的调度可分为以下四个过程:

(1)时隙 t 起始时刻,节点 n_k 从 L_k 中随机选取一个子队列,将对应的邻居节点作为 PR 节点,向其发送主链路建立信息 RTS (Request To Send).

(2)接收到 RTS 的 PR 节点广播 CSI,所有节点接收 CSI 并更新 CR_p 值.

(3)PR 节点根据其 CR_p 值、 L_{PR} 集合和时隙占用信息判断可以调度的二级链路类型,根据调度优先级发送相应的调度请求.

(4)接收到调度请求的节点根据链路类型进行相应的操作,完成二级链路的调度.

调度过程如图 5 所示, $t_1 \sim t_2$ 和 $t_3 \sim t_4$ 段对应过程(1)和(2),SR 和 ST 仅表示 DL 接收节点和 UL 发送节点,GP 为保护间隔.

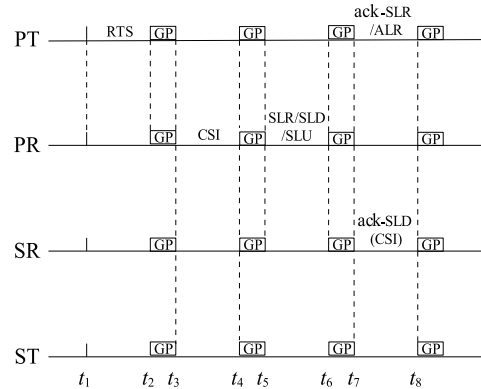


图 5 二级链路调度过程的示意图

过程(3)中,在 t_5 时刻,PR 节点检查本地 CR_p 值,如果 CR_p 不等于 0,则当前节点的发送被抑制,只能调度 UL,向 PT 节点发送 UL 调度请求 SLU (Secondary Link Upstream);如果 CR_p 等于 0,检查 L_{PR} 中是否有到 PT 节点的子队列,有则向其发送 RL 调度请求 SLR (Secondary Link Reverse),没有则调度 DL,从满足 DL 调度条件的节点集合 U_d 中随机挑选一个,并向其发送 DL 调度请求 SLD (Secondary Link Downstream).如果集合 U_d 为空,则向 PT 节点发送 SLU.其中,任一节点 $i \in U_d$ 需满足以下条件:(a) L_{PR} 中包含 i 的子队列;(b)任一节点 $n \in N_i$ 不占用当前时隙进行业务传输.

对应过程(4)中可能接收的请求,节点将进行以下操作:

(a) PT 节点接收 SLR,则在 t_7 时刻向 PR 节点反馈确认信息(ack-SLR),RL 调度成功.

(b) 节点接收到 SLD,则检查本地 CR_p 值,如果 CR_p 等于 1,则一跳范围内没有其它 PR 节点,在 t_7 时刻向 PR 节点发送确认信息(ack-SLD),DL 调度成功;如果 CR_p 不等于 1,则节点静默.ack-SLD 即相当于 CSI,凡是接收到该信息的节点置 CR_s 的值为 1,在该时隙的剩余调度时间内将不能成为发送节点.

(c) PT 节点接收到 SLU,则在 t_7 时刻广播 UL 建立通知 ATS(Allow To Send),除 PR 节点外接收到 ATS 的任一节点 $i \in N_{PT}$ 进行自查,如果满足以下任一条件:(I) CR_p 不等于 0;(II) L_i 中没有 PT 节点的子队列;(III) CR_s 不等于 0,则节点保持静默;否则,节点以概率 $P(0 < P < 1)$ 向 PT 节点发送数据. P 的设置是为了减小多个符合条件的节点同时发送的概率, P 的大小由业务强度和节点密度确定.

3.3 TDMA 网络的初始化

FD-TDMA 基于传统 TDMA 的时隙结构,为了满足调度需求,划分业务时隙头部的一小部分作为调度子时隙,剩余部分为数据子时隙,如图 6 所示.

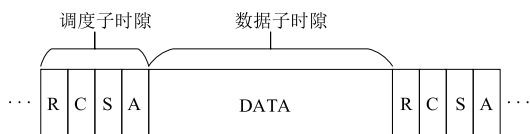


图6 业务时隙结构的示意图

图 6 中,调度子时隙又可分为 R,C,S,A 四个微时隙,对应链路调度的四次握手. R 时隙中,节点选择 PR 节点,发送 RTS,建立主链路;C 时隙中,PR 节点发送 CSI,各节点接收 CSI 并记录抑制情况;S 时隙起始,PR 节点筛选可调度的二级链路,随后发送调度请求;A 时隙中,节点根据接收的请求类型进行相应的处理.

数据子时隙起始时刻,所有主链路和二级链路同时发起传输,下一业务时隙则重复以上过程.

3.4 算法开销、复杂度与性能分析

(1) 开销分析 本算法的开销主要包括链路开销和存储开销.

FD-TDMA 的调度子时隙中需要传输约 550 比特的数据.定义链路开销为调度子时隙与业务时隙中传输比特数的比值,用 γ 表示.以传输以太网报文为例,一个业务时隙需要传输 1518 字节,则计算得 γ 约等于 4.5%,可见本算法只耗费很少的链路开销.

存储开销包括算法执行前必需的初始数据所占的存储空间和算法执行过程中所需的额外空间.初始数据即同步时隙中节点间交互的邻居表,如表 1.

其中,queue 记录子队列号,BS_used 记录一跳范围内的同步时隙占用情况,nei_ID 记录邻居节点的 ID, N

表示最大邻居节点数,则初始数据占 $N * (7N + 20)$ 比特的空间.假设取 $N = 100$,则初始数据为 9000 字节,对于节点的存储能力来说是很小的开销.算法执行过程中,节点上保存的用于抑制检查的 CR_p 和 CR_s 占据额外的存储空间,但相比初始数据,这部分的开销可以忽略不计.

表 1 邻居表

ID	BS_ID	clock	queue	BS_used	nei_ID
6b	6b	4b	4b	Nb	$N * 6b$

(2) 复杂度分析 本算法的复杂度主要源于计算复杂度.在 2.2 节的过程(1)中,非空子队列集合的计算需要遍历所有邻居的子队列,其复杂度用 $O(N)$ 表示;过程(3)在调度 DL 时要计算集合 U_d ,其中条件(b)的确定需要遍历邻居表以获得两跳范围内的时隙占用情况,而邻居表的规模由 N 决定.因此,本算法的计算复杂度为 $O(N)$.

(3) 性能分析 假设半双工 TDMA 网络的信道容量为 C ,复帧由 1 个长度为 τ_a 的同步时隙和 m 个长度为 τ_b 的业务时隙构成.其中,一个数据子时隙的长度为 $\alpha * \tau_b(0 < \alpha < 1)$,可发送一个数据分组.

网络中 m 个节点各占用一个业务时隙,令节点上的分组到达流满足均值为 λ 的 Poisson 过程,且队列中总有数据要发送,记该 TDMA 网络的最大吞吐量为 S ,则有:

$$S = C \frac{m\alpha\tau_b}{\tau_a + m\tau_b} \quad (5)$$

对于 FD-TDMA,一个业务时隙可能存在不止一条链路,记二级链路调度成功率为 $\beta(0 < \beta \leq 1)$,则等效数据子时隙长度为 $(1 + \beta)\alpha * \tau_b$,在足够大的业务负载下,FD-TDMA 的最大吞吐量 S_{fd} 为:

$$S_{fd} = C \frac{(1 + \beta)m\alpha\tau_b}{\tau_a + m\tau_b} \quad (6)$$

由式(5)和式(6)可知,相比半双工 TDMA,FD-TDMA 可以提升的吞吐量大小与 β 的值相关.理想情况下,如果 β 值能达到 1,则 FD-TDMA 可以实现相较于传统 TDMA 的最大吞吐量的翻倍.

4 仿真结果与分析

本文采用 OPNET 仿真工具对所提出协议的性能进行评估,文中所使用的曲线图上的每个样点值均取自 5 次实验的平均值.

在 $10 * 10 \text{ km}^2$ 的区域中分布了 16 个全双工节点,一个复帧包含 16 个业务时隙,每个节点固定占用一个业务时隙.节点的最大通信距离为 3.5 km,时隙长度等参数见表 2.

表 2 FD-TDMA 仿真参数

参数	取值
信道速率 (Mbps)	10
复帧长度 (ms)	19.25
同步时隙 (μs)	51.7
调度子时隙 (μs)	55
数据子时隙 (μs)	1145
仿真时间 (min)	2

图 7 和图 8 给出了不同业务负载下 FD-TDMA 与传统 TDMA 的吞吐量和平均时延对比。

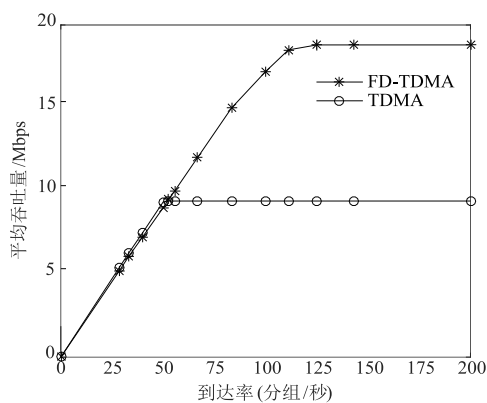


图7 FD-TDMA和TDMA的吞吐量对比曲线

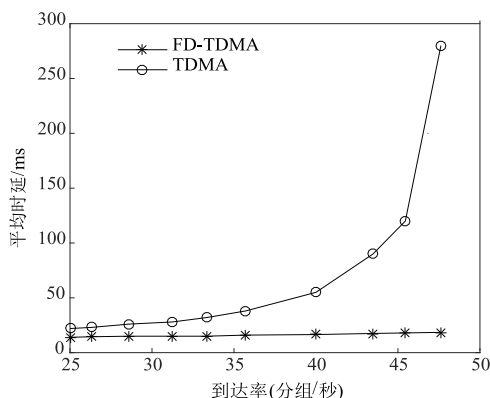


图8 FD-TDMA和TDMA的时延对比曲线

当分组到达率小于半双工节点的服务率时,此时网络业务负载较小,FD-TDMA 与 TDMA 的吞吐量几乎相同,尽管前者具备更强的服务能力,但此时队列中没有分组堆积,所以吞吐量提升不明显;当到达率逐渐增大至半双工节点的服务率时,TDMA 的吞吐量很快达到极限值,而 FD-TDMA 的吞吐量则呈现出了一个明显的增长过程;而当到达率增大至接近半双工节点服务率的两倍时,FD-TDMA 的吞吐量趋于一个最大值,图 7 的仿真结果显示,相比半双工的最大吞吐量提高了约 98.63%。

轻负荷场景下,FD-TDMA 和 TDMA 的平均时延都较低;随着到达率逐渐增长,后者的平均时延呈明显上

升趋势,而前者的时延维持稳定,这是因为 FD-TDMA 的等效服务速率远大于 TDMA 的服务速率;当到达率增大至半双工节点的服务率时,TDMA 的平均时延趋于无穷,而 FD-TDMA 的平均时延仍处于较低水平。

以上结果基于网络中不存在空间复用的假设,图 9 给出了存在空间复用的情况下 FD-TDMA 网络性能的变化。

从图 9 中可以发现,FD-TDMA 在增加了空间复用后,网络吞吐量明显提升,且复用的节点越多,吞吐量提升越多。空间复用带来的直接影响是在同一时隙中有多个节点可以建立全双工链路,提高了时隙的分组分发能力。

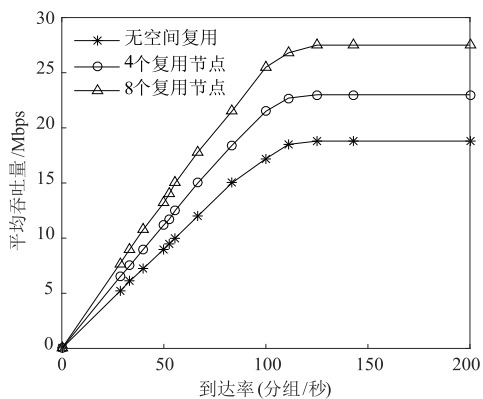


图9 不同空间复用度下的吞吐量

另外,为了验证 FD-TDMA 与竞争型 CCFD 的性能差异,将本协议与一种基于 CSMA/CA 的全双工 MAC 协议^[12]进行比较,仿真在全连通、重负荷的场景下进行,相关参数见表 3,吞吐量的对比结果如图 10 所示。

表 3 全连通 FD-TDMA 仿真参数

参数	取值
信道速率 (Mbps)	54
复帧长度 (ms)	6.35
同步时隙 (μs)	22.7
调度子时隙 (μs)	47.5
数据子时隙 (μs)	151.7
同步时隙数	30
仿真时间 (min)	2

由图 10 可知,基于竞争的全双工 MAC 协议的吞吐量随着节点数的增多呈下降趋势,这是因为 CSMA/CA 是无法完全避免接入冲突的,网络中节点数越多,产生冲突的几率越大。该场景固定分配业务时隙,当节点较少时将有较多的时隙空闲,导致网络吞吐量较低。但是,随着节点增多,更多的空闲时隙被利用,吞吐量明显增大。实际应用中,一般采用时隙动态分配的方式,从而可以充分发挥 FD-TDMA 的性能优势。总体上,FD-TDMA 的吞吐量性能明显优于基于 CSMA/CA 的竞争型全双

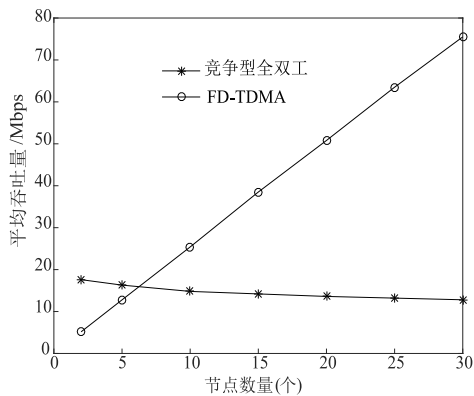


图10 FD-TDMA与竞争型CCFD的吞吐量对比曲线

工 MAC 协议.

5 结束语

为了提高传统 TDMA 在负载较重时的吞吐能力,提出一种将 TDMA 与 CCFD 技术相结合的分布式全双工 MAC 协议.该协议在半双工链路正常工作的基础上,调度额外的可以共存的二级链路,增加相同时隙中的传输链路数,进而提高网络的吞吐能力.

参考文献

- [1] 谢显中,等.基于干扰对齐的多用户全双工通信中干扰消除方法[J].北京邮电大学学报,2015,38(6):91-96.
XIE Xian-zhong, et al. Interference cancellation based on interference alignment for multiuser full-duplex communications[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2015, 38(6): 91-96. (in Chinese)
- [2] 吴飞,邵士海,唐友喜.一种基于多天线波束成形的全双工自干扰抵消算法[J].电子学报,2017,45(1):8-15.
WU Fei, SHAO Shi-hai, TANG You-xi. A novel self-interference cancellation algorithm using multi-antenna beamforming in full-duplex system[J]. Acta Electronica Sinica, 2017, 45(1): 8-15. (in Chinese)
- [3] Elaheh Askari, Sonia Aissa. Single-band full-duplex MAC protocol for distributed access networks[J]. IET Communications, 2014, 8(10): 1663-1673.
- [4] Xin Yongchao, Ma Meng, Zhao Zijun, Jiao Bingli. Co-channel interference suppression techniques for full duplex cellular system[J]. China Communications, 2015, 12(Supplement): 18-27.
- [5] Zhou Zhengjuan, Zhang Xing. Directional antenna-based single channel full duplex[J]. IET Communications, 2015, 9(16): 1999-2006.
- [6] M Jain, J I Choi, T Kim, et al. Practical, real-time, full duplex wireless[A]. Proceedings of the 17th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking [C]. Las Vegas, NV, USA: ACM, 2011. 301-312.
- [7] Nikhil Singhtl, Dinan Gunawardena, Alexandre Proutiere, et al. Efficient and fair MAC for wireless networks with self-interference cancellation[A]. 2011 International Symposium on Modeling and Optimization of Mobile, Ad Hoc, and Wireless Networks [C]. Princeton, NJ, USA: IEEE, 2011. 94-101.
- [8] Sanghoon Kim, Wayne E. Stark. On the performance of full duplex wireless networks[A]. 2013 47th Annual Conference on Information Sciences and Systems [C]. Baltimore, MD, USA: IEEE, 2013. 1-6.
- [9] Rahman Doost-Mohammady, M. Yousof Naderi, Kaushik Roy Chowdhury. Performance analysis of CSMA/CA based medium access in full duplex wireless communications[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2016, 15(6): 1457-1470.
- [10] Le Thanh Tan, Long Bao Le. Distributed MAC protocol design for full-duplex cognitive radio networks[A]. 58th IEEE Global Communications Conference [C]. San Diego, CA, USA: IEEE, 2015. 1-6.
- [11] J D Kim, D I Laurenson, J S Thompson. Fair and efficient full duplex MAC protocol based on the IEEE 802.11 DCF [A]. 27th IEEE Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications, PIMRC 2016 [C]. Valencia, Spain: IEEE, 2016. 1-6.
- [12] Sanjay goyal, Pei Liu, Ozgur Gurbuz, et al. A distributed MAC protocol for full duplex radio[A]. 2013 47th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers [C]. Pacific Grove, CA, USA: IEEE, 2013. 788-792.

作者简介



史 琰 男,1975 年 1 月生于河南省洛阳市,西安电子科技大学博士、副教授,主要研究方向为认知网络、分布式组网与计算,近年来承担了多项国家自然科学基金、移动通信重大专项课题的研究,发表论文 30 余篇,授权国家发明专利 12 项,申请国家发明专利 20 项。
E-mail: yshi@xidian.edu.cn



郁威威(通信作者) 男,1992 年生于江苏省盐城市,现为西安电子科技大学通信工程学院硕士研究生,研究方向为分布式组网与计算。
E-mail: yuweiwei0815@163.com