

# 无线 MIMO 网络中一种改进的 CSMA/CA 协议设计

朱 林<sup>1</sup>, 孙 璐<sup>2</sup>, 邹洪森<sup>2</sup>, 齐玉峰<sup>3</sup>

(1. 国网宁夏电力有限公司, 银川 750002; 2. 国网宁夏电力有限公司超高压公司, 银川 750002;  
3. 无锡物联网创新中心有限公司, 江苏 无锡 214000)

**摘要:** 针对当前各类应用场景中物联网终端因数量剧增、体积小化趋势而带来对传输并发性能和低功耗的需求, 提出一种基于物理层 MIMO(多输入多输出)技术的改进 MAC(媒体接入控制)层 CSMA/CA(载波侦听多路访问/冲突避免)协议设计。协议分别通过简化终端执行 CSMA/CA 协议复杂度、采用 MIMO 实现多终端并发接入的方式进行跨层设计, 使得终端设备可简单、便捷接入网络系统。对所提协议吞吐量性能进行分析, 通过仿真验证改进协议的有效性和理论分析的准确性, 不仅为 CSMA/CA 协议的重新设计提供了理论研究补充, 也为工程应用提供了实践指导。

**关键词:** MIMO(多输入多输出); CSMA/CA(载波侦听多路访问/冲突避免); 吞吐量; 性能分析

**中图分类号:** TP393 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2025)05-0072-06

无线网络作为一种重要的通信方式, 已经广泛应用于各个产业领域<sup>[1-2]</sup>。在电力物联网中, 各类智能终端设备(如传感器、控制器、智能电表等)均需实时、准确地传输电力系统运行数据<sup>[3]</sup>。然而, 随着终端设备数量日趋增多, 且设备朝着小型化、无缘等方向的发展, 使得传统媒体接入控制层(media access control, MAC)层载波侦听多路访问/冲突避免(carrier sense multiple access with collision avoidance, CSMA/CA)无线接入协议因执行算法复杂、无法进行并行传输等原因, 导致其无法较好地适应大规模设备并发数据的传输及耗电要求。现如今, 多输入多输出(multiple input multiple output, MIMO)物理层技术因可通过在发送端和接收端使用多个天线、允许接收端同时与多个发送端通信等特点, 其可实现在提高信传输质量的同时, 显著提高频谱效率和网络容量, 提升设备并发数据传输能力, 因此已被各个应用场景广泛采用<sup>[4-6]</sup>。然而, 在复杂的电力物联网环境下, 传统的 MAC 层 CSMA/CA 协议在 MIMO 物理层技术背景下, 因两者并未进行充分融合与联合设计, 使得 CSMA/CA 协议依然无法充分利用物理层 MIMO 带来的技术便利性。因此, 有必要对 CSMA/CA 协议进行重新设计, 以此适应新物理层技术的发展, 提高无线网络性能和效率。

CSMA/CA 协议执行方式包括两种: 基本模式

和请求发送/清除发送(request to send/clear to send, RTS/CTS)模式。现有在 MIMO 物理层技术下重新设计 CSMA/CA 协议的研究工作中, 据调研所知, 为了简化协议设计复杂性和理论性能分析过程, 大部分均集中在针对后者的研究中。例如, Kou 等<sup>[7]</sup>针对 MU-MIMO(multiple user-MIMO)无线网络提出了一种基于 RTS/CTS 模式的 MAC 层接入协议设计。在该设计中, 与传统的 RTS/CTS 模式一致, 竞争节点通过发送 RTS 帧来实现信道的预留。与传统 RTS/CTS 模式不同, AP 将通过 CTS 帧一方面告知对应节点信道预留成功, 同时也告知全网当前可并行接入信道的机会数量。通过该种方式, 可以实现让已获得竞争胜利的节点在传输数据的同时, 其他节点依然可以继续竞争信道, 以此实现系统吞吐量的提升。Hu 等<sup>[8]</sup>也采用了与 Kou 等<sup>[7]</sup>相似的协议设计, 并进行了协议的性能分析工作。Shahanaghi 等<sup>[9]</sup>期望提出一种可实现更高系统吞吐量的并行传输接入协议设计。他们的设计包含两轮竞争, 在第 1 轮竞争中, 所有节点按传统方式仅向 AP 发送 RTS 帧, 在第 2 轮竞争中, AP 通过广播的形式发送 CTS 帧, 以此告知可接入系统的节点和对应的传输速度。最终, 在数据传输阶段, 相应节点按给定的速度进行并行数据传输。朴德江等<sup>[10]</sup>则在移动自组织网络中, 对物理层 MIMO 技

**收稿日期:** 2024-09-05

**基金项目:** 国网宁夏电力有限公司科技项目(5229CG23000G)

**作者简介:** 朱林(1977—), 男, 宁夏吴忠人, 高级工程师, 研究方向为电力变电运检; 孙璐(1992—), 女, 宁夏固原人, 工程师, 研究方向为电网设备监控; 邹洪森(1982—), 男, 湖北宜昌人, 硕士, 正高级工程师, 研究方向为电力系统自动化; 通信作者 齐玉峰(1980—), 男, 河北石家庄人, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电子信息系统、物联网。

术与 MAC 层接入技术展开联合跨层设计,并重点对网络分配向量(network allocation vector, NAV)回避算法做了改进研究。

与以上聚焦上行传输协议设计不同,Karabulut 等<sup>[11]</sup>在下行车载传输网络中提出了基于 MIMO-RTS/MIMO-CTS 的 MAC 层协议设计,并进行了系统吞吐量分析。在该协议中,发送节点和接收节点首先通过发送 MIMO-RTS 帧和 MIMO-CTS 帧的方式完成信道的预留,然后发送方同时在多个子载波上并行传输多个数据包,以此完成数据的并行发送。除此以外,也有部分研究工作集中在针对 CSMA/CA 基本模式下的协议设计。这些工作<sup>[12-15]</sup>均针对基本模式下的 MU-MIMO 场景进行了协议性能分析。在他们的设计中,数据包均被切分成标准长度的片段,以此确保需要传输的数据包片段可在一个 ACK(确认字符) timeout 周期内完成。与此同时,鲍晶晶和董华锋<sup>[16]</sup>针对多跳虚拟 MIMO 网络提出了一种基于 ALOHA 协议的改进 MAC 协议设计,其通过划分时隙的方式完成了每一跳时的无线资源分配,并通过理论分析进行了系统性能验证。吴秋尘等<sup>[17]</sup>则针对不同的无人机编队场景形态,采用经典的马尔科夫模型进行编队自组网容量性能分析。王旭东等<sup>[2]</sup>在新能源场景下针对每个终端节点电量消耗不均衡问题,通过引入熵权法与 CSMA/CA 算法建立电池健康等效模型,并通过动态调控充放电任务,实现新能源集控电量的均衡消耗。

现有研究工作中基于基本模式和 RTS/CTS 模式的设计<sup>[7-17]</sup>对有缘、功耗不敏感的场景均较为恰当,但考虑到现实电力物联网场景中设备的数量规模大、部署环境存在危险性、运维条件风险大等特点,设计一种执行简单、功耗不高、实时较强的 MAC 层接入协议则变得更加实用和必要。由于基本模式相对 RTS/CTS 模式效率较高,为此,提出一种针对 CSMA/CA 基本模式的改进协议设计,使其在兼顾实际场景中节点对低功耗、高实时传输需求的同时,也可让发送节点更加方便执行。然后,针对所提出的改进协议展开系统吞吐量计算分析,由于本协议不再强行要求节点执行片段化数据包,所以每个节点传输结束的时间均不一致,因此现有的理论分析模型无法直接复用于本协议中。最后,通过仿真实验验证所提出协议的可行性和理论分析的精确性。本协议设计的提出,在学术研究方面可为物理层 MIMO 技术下的 CSMA/CA 协议的研究工作填补了设计空缺,在实际工程方面可以提供可行性更高的落地设计思路。

## 1 协议设计

在传统的 CSMA/CA 协议中,网络系统每次仅允许传输一个数据包,如图 1 所示,图中 PHY Header 为物理层头部;Defer Access 为推出接入。在 CSMA/CA 协议中,每个需要传输数据的节点首先需要进入竞争阶段,竞争方式为维护一个 Backoff 计时器,并在每次进入竞争阶段之前随机选择一个值进行倒计时。当监听到信道为空闲时,Backoff 计时器便减小 1,反之则悬挂计时器数值不变化,直到计时器递减至 0 时,则在下一个时隙(Slot)内开始发送数据包。当 AP 接收到该数据包并成功解调之后,则会在等待 SIFS(short inter-frame spacing,短帧间间隔)后广播 ACK,以此告知本次数据发送成功。所有节点可在等待 DIFS(distributed inter-frame spacing,分布式帧间间隔)之后,重新启动 Backoff 计时器进行信道监听和倒计时,并进入新一轮传输周期。

与传统 CSMA/CA 协议不同,为提高网络系统性能,本协议将采用物理层 MIMO 技术,实现多个节点的同时接入,即本协议允许多个节点同时向 AP 发送数据。为实现多个节点同时发送,本协议要求每个节点需维持一个传输计数器,以便可以通过解调信道中数据包中 Preamble 的方式知道当前信道中正在传输的数据包数量。如果当前信道中正在传输的数据包数量小于网络允许传输的最大值时,其他节点可继续通过侦听 Preamble 的方式进行信道监听,直到发现信道中正在传输的数据包数量与系统允许并行传输的最大值相同时,所有其他未发送数据的节点将全部悬挂计时器,直到收到 AP 广播的 ACK 帧之后,可在等待 DIFS 之后再次进入新一轮竞争过程。若所有节点在固定时间内均未收到 ACK,则认为当前所有并行传输的数据包均冲突,则需重新竞争信道进行原数据包重传。为降低冲突概率,与 CSMA/CA 协议相似,本协议依然执行二进制指数退避(binary exponential backoff, BEB)算法,即每个节点将现有的竞争窗口值按指数增大。

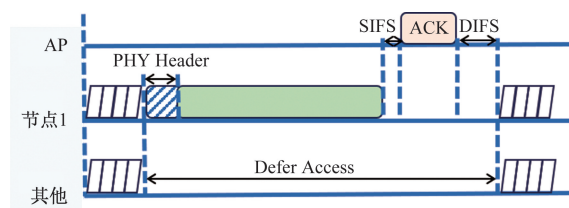


图 1 传统 CSMA/CA 协议工作流程

图 2 展示了本协议的工作流程示例。为便于理解,假设 AP 具有 3 根天线,即允许最多 3 个节点的数据进行传输,而每个节点依然采用传统的硬件配置方式,即每个节点仅有一根天线。在进入竞争周期之后,节点 1 首先 Backoff 倒计时为 0,并成功接入信道。其他节点在侦听信道过程中,当侦听到节点 1 的 Preamble 之后,默认将传输计时器由 0 改成 1。由于当前传输数量还未达到最大值 3,所以其他节点在等待节点 1 的物理层 Header 传输完成后,继续侦听信道。节点 2 在第 2 轮竞争中首先 Backoff 倒计时为 0,所以其他节点在侦听到节点 2 的 Preamble 之后,继续将传输计时器由 1 改成 2。直到其他节点将自己的传输计时器修改成 3 时,此时已达到系统最大并行传输数量,因此其他所有节点均悬挂 Backoff 计时器,并在 AP 广播 ACK 之后的 DIFS 时间间隔,所有节点重新进入新一轮数据竞争传输过程。

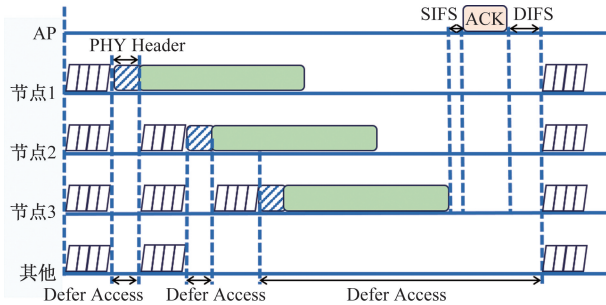


图 2 本文所提出的改进协议的工作流程

需要注意的是,AP 会在两种情况下广播 ACK。一种是当信道中正在传输的数据包数量不小于最大并行传输数量时,AP 将会在所有节点完成传输之后的 SIFS 间隔内,统一广播 ACK;另一种是即使信道中传输数据包数量小于最大并行传输数量,但在所有节点完成传输的 SIFS 间隔内,依然没有其他节点进行数据发送,此时为防止信道被闲置,提高信道利用率,AP 依然会中断当前竞争周期,并及时广播 ACK。

## 2 性能分析

假设网络中包含 1 个 AP 和  $N$  个节点,其中 AP 具有  $m$  根天线,即允许同时  $m$  个节点进行并行

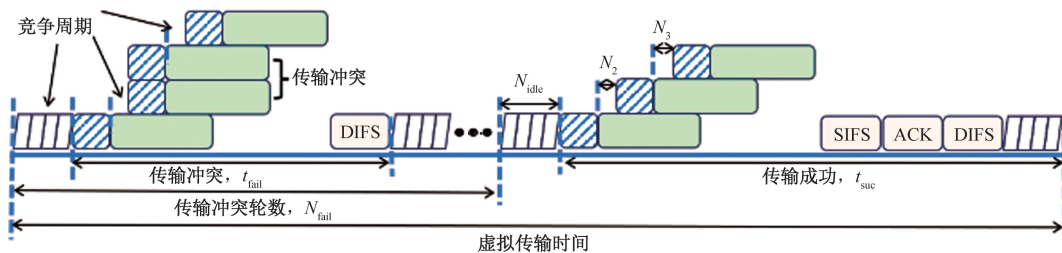


图 3 协议中的多个传输状态

传输。定义吞吐量为一个虚拟传输周期<sup>[12]</sup>内所传输的字节数量,其中虚拟传输周期如图 3 所示。根据已有研究工作可知,系统吞吐量  $\rho$  为

$$\rho = \frac{Ms}{E[N_{fail}]t_{fail} + t_{suc} + (E[N_{fail}] + 1)E[N_{idle}]t_{slot}} \quad (1)$$

式中:  $M = \min\{N, m\}$  为系统所允许的最大并行传输数量;  $s$  为单次传输的数据包大小,为简化分析,假设每个节点每次发送的数据包大小均相同;  $t_{slot}$  为一个时隙时长;  $E[N_{fail}]$  为在一个虚拟传输周期中平均发生冲突的传输次数;  $t_{fail}$  为发生冲突所持续的时长;  $t_{suc}$  为标书成功传输的时长;  $E[N_{idle}]$  为相邻两个系统传输冲突之间的平均随机等待时间。接下来,分别解释分母中因子  $E[N_{fail}]$ 、 $t_{fail}$ 、 $t_{suc}$ 、 $E[N_{idle}]$  的物理意义。

$N_{fail}$  为在一个虚拟传输周期中发生冲突的传输次数,如图 3 所示即表示一次传输冲突。 $E[N_{fail}]$  为  $N_{fail}$  的期望值,即在一个虚拟传输周期中平均发生冲突的传输次数。在计算  $N_{fail}$  之前,先计算系统并行传输成功概率  $P_s(M, N)$ 。

在  $M$  个并行传输中,若要确保每个传输均成功,则需系统执行  $M$  轮竞争,且每轮竞争中有且仅有一个节点能成功接入信道。假设用  $A_j$  表示在第  $j$  轮中有且仅有一个节点竞争成功,则有

$$P_s(M, N) = P(A_1)P(A_2 | A_1)P(A_3 | A_1, A_2) \cdots P(A_M | A_1, A_2, \dots, A_{M-1}) \quad (2)$$

式中:  $P(A_i)$  为时间  $A_i$  发生的概率;  $P(A_i | A_j)$  为在事件  $A_j$  发生的条件下,时间  $A_i$  发生的概率。

用  $\tau$  表示节点接入信道概率,所以式(2)可表示为

$$P_s(M, N) = \frac{N\tau(1-\tau)^{N-1}}{1-(1-\tau)^N} \frac{(N-1)\tau(1-\tau)^{N-2}}{1-(1-\tau)^{N-1}} \cdots \frac{(N-M+1)\tau(1-\tau)^{N-M}}{1-(1-\tau)^{N-M+1}} \quad (3)$$

关于对式(3)中  $\tau$  的计算,根据 Bianchi<sup>[18]</sup> 的分析模型结果可知

$$\tau = \frac{2(1-2p)}{(1-2p)(W+1) + pW[1-(2p)^e]} \quad (4)$$

式中:  $p$  为系统内的冲突概率;  $W$  为竞争窗口大小;  $e$  为指数值。由于本协议允许多个节点同时串行传输数据, 所以在本协议中  $p$  的计算与传统 Bianchi<sup>[18]</sup> 分析模型稍有出入。由文献[18]可知,  $p$  的计算方式为

$$p = 1 - \frac{\frac{M}{N}P_s(M, N)}{1 - \frac{\left(1 - \frac{M}{N}\right)P_s(M, N)}{P_s(M', N-1)}} \quad (5)$$

式中:  $M' = \min\{M, N-1\}$ 。联立式(3)~式(5)即可计算出  $P_s(M, N)$ 。

另外, 针对式(4),  $e=0$  则表示每个节点遇到传输冲突时, 将不在采用 BEB 算法让竞争窗口  $W$  值按指数倍增大, 即始终维持当前竞争窗口值不变化。此设置也可作为对分析和后续仿真实验的一种简化。而当  $e=0$  时, 式(4)可简化为

$$\tau = \frac{2}{W+1} \quad (6)$$

根据协议设计规则以及变量定义,  $N_{\text{fail}}$  的值服务一个变量为  $1 - P_s(M, N)$  的几何分布, 即

$$P(N_{\text{fail}} = k) = [1 - P_s(M, N)]^k P_s(M, N), \quad k \in N \quad (7)$$

所以  $N_{\text{fail}}$  的均值  $E[N_{\text{fail}}]$  为

$$E[N_{\text{fail}}] = \frac{1 - P_s(M, N)}{P_s(M, N)} \quad (8)$$

接下来, 计算式(1)分母中的第 2 个因子  $t_{\text{fail}}$ 。根据图 3 所示, 当一次冲突传输发生时, AP 将不会在所有节点完成传输之后, 再等待 SIFS 间隔之后向网络广播 ACK, 所以  $t_{\text{fail}}$  仅包含接入  $M$  个数据包的物理 header 传输时间  $Mt_{\text{phy}}$ 、最后一个节点数据包传输时长  $T_M$ 、DIFS 间隔, 以及第 2 至  $M$  个数据包在接入信道之前的平均随机等待时间  $E[N_j]$  ( $2 \leq j \leq M$ )。因此,  $t_{\text{fail}}$  为

$$t_{\text{fail}} = Mt_{\text{phy}} + t_{\text{slot}} \sum_{j=2}^M E[N_j] + T_M + \text{DIFS} \quad (9)$$

注意在式(9)中的  $N_j$ , 当  $j=1$  时,  $N_1$  既表示在  $M$  个并行传输中的第 1 个节点接入信道之前的随机等待时间, 同时也表示相邻两个系统传输冲突之间的随机等待时间。在第 1 个节点竞争信道时, 此时系统内一共有  $N$  个节点同时参与, 且每个节点接入信道的概率均为  $\tau$ , 所以  $N_1$  的值服从变量为  $(1-\tau)^N$  的几何分布, 因此  $N_1 = k, k \geq 0$  的概率  $P(N_1 = k)$  为

$$P(N_1 = k) = [(1-\tau)^N]^k [1 - (1-\tau)^N] \quad (10)$$

用  $E[N_{\text{idle}}]$  表示相邻两个系统传输冲突之间的平均随机等待时间, 所以有  $E[N_{\text{idle}}] = E[N_1]$ , 即

$$E[N_{\text{idle}}] = \frac{(1-\tau)^N}{1 - (1-\tau)^N} \quad (11)$$

对于  $N_j, j \geq 2$  时, 即在  $M$  个并行传输中的第  $j$  次传输竞争时, 系统内将有  $N-j+1$  个节点共同参与此次竞争。需注意的是, 由于此时所有  $N-j+1$  个节点的 backoff 值均不为 0, 所以此时所有参与竞争的节点均不会在第  $j$  次传输的第 1 个 slot 内开始传输数据, 即对于所有  $N_j, j \geq 2$  的情况, 均有  $N_j \geq 1$ 。因此, 与式(10)中  $N_1$  不同,  $N_j (j \geq 2)$  的分布可表示为

$$P(N_j = k) = [(1-\tau)^{N-j+1}]^{k-1} [1 - (1-\tau)^{N-j+1}], \quad j \geq 2 \quad (12)$$

相应的,  $N_j (j \geq 2)$  的均值  $E[N_j]$  为

$$E[N_j] = \frac{1}{1 - (1-\tau)^{N-j+1}} \quad (13)$$

将式(13)代入式(9), 即可计算出  $t_{\text{fail}}$ 。

基于  $t_{\text{fail}}$  的计算过程, 最后计算式(1)中的最后一个因子, 系统内  $M$  个并行传输成功的时间  $t_{\text{suc}}$ 。如图 3 所示, 与  $t_{\text{fail}}$  的计算相似, 当执行一轮成功传输时, AP 将在等待 SIFS 间隔之后向网络广播 ACK, 所以  $t_{\text{suc}}$  包含接入  $M$  个数据包的物理 header 传输时间  $Mt_{\text{phy}}$ 、最后一个节点数据包传输时长  $T_M$ 、DIFS 间隔、SIFS 间隔、ACK 传输时间, 以及第 2~ $M$  个数据包在接入信道之前的平均随机等待时间  $E[N_j]$  ( $2 \leq j \leq M$ )。因此,  $t_{\text{suc}}$  为

$$t_{\text{suc}} = Mt_{\text{phy}} + t_{\text{slot}} \sum_{j=2}^M E[N_j] + T_M + \text{SIFS} + \text{ACK} + \text{DIFS} \quad (14)$$

分别将式(8)、式(9)、式(11)、式(14)代入式(1), 即可求解系统吞吐量  $\rho$ 。

### 3 实验验证

通过实验仿真的方式对本文协议的设计和理论分析进行验证, 并与传统 CSMA/CA 协议做性能对比分析。在网络拓扑方面, 假设存在 1 个 AP 和  $N = 5, 10, \dots, 50$  个节点, 且 AP 的天线数量  $n = 3, 5, 7, 9$  根。另外, 为方便实验验证, 在每次实验时设置节点的竞争窗口值  $W = 100, 200, \dots, 800$  恒定, 即发生网络冲突时, 不执行 BEB 算法 ( $e=0$ )。其他实验参数配置见表 1。

表 1 网络参数配置

参数	取值	参数	取值
DIFS/ $\mu\text{s}$	34	ACK/ $\mu\text{s}$	39
SIFS/ $\mu\text{s}$	16	L/B	1 500
$t_{\text{PHY}}/\mu\text{s}$	20	$T_M/\mu\text{s}$	1 000
$t_{\text{slot}}/\mu\text{s}$	9	$e$	0

图 4 和图 5 分别展示了系统吞吐量  $\rho$  随节点数量  $N$  和节点竞争窗口大小  $W$  变化而变化的仿真结果和理论计算结果。在该两幅图中, sim\_CSMA/CA、sim\_n=3、sim\_n=5、sim\_n=7、sim\_n=9 分别代表原始 CSMA/CA 协议和改进的 CSMA/CA 协议分别使用 3、5、7、9 根天线时的仿真结果; ana\_n=3、ana\_n=5、ana\_n=7、ana\_n=9 分别代表本文协议分别使用 3、5、7、9 根天线时的理论计算结果, 其他详细内容解释如下。

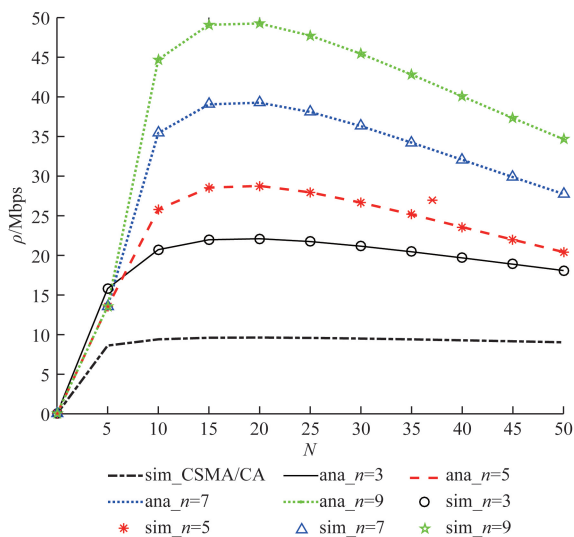


图 4 固定竞争窗口  $W = 300$  时, 本文协议与传统 CSMA/CA 协议吞吐量对比验证

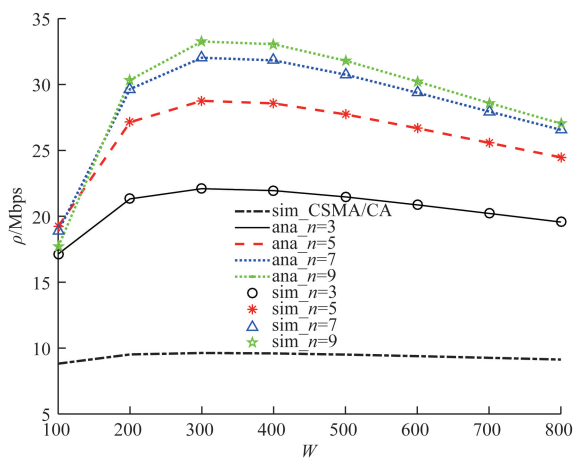


图 5 固定节点数量  $N = 20$  时, 本文协议与传统 CSMA/CA 协议吞吐量对比验证

图 4 展示了当设定竞争窗口  $W = 300$  时, 吞吐量随节点数量变化而变化的趋势结果。由图 4 可以发现如下几点现象: ① 本文所提出的理论分析结果与仿真结果重合度较高, 这表明理论分析模型合理且精确度较高。② 本文协议的吞吐量明显比传统 CSMA/CA 高, 且随着天线数量的增多, 本文协议的吞吐量也相应增大。例如, 无论节点数量如何变化, CSMA/CA 协议的吞吐量始终未能超过 10 Mbps, 而本文协议因为采用了多天线策略, 所以系统吞吐量始终在 15 Mbps 以上, 甚至最大能达到约 50 Mbps 附近。这表明采用分集复用后的协议, 其流程设计不仅具备可行性, 而且效果提升也非常明显。③ 与传统 CSMA/CA 协议性能类似, 本文协议吞吐量变化趋势同为先升后降, 即存在一个最优解, 可使得系统吞吐量最大。例如, 当天线数量  $n = 9$  时, 系统最大吞吐量约在节点数量  $N = 20$  时; 而当天线数量  $n = 5$  时, 系统最大吞吐量约在节点数量  $N = 15$  时。④ 当节点数较少时, 系统吞吐量并未随着天线数量的增多而变大, 反而变小。例如当节点数  $N = 5$  时, 天线数量  $n = 9$  对应的吞吐量反而小于天线数量  $n = 3$  时的吞吐量。这是因为根据系统最大并行传输量  $M$  的定义, 当  $n = 3$  时,  $M = \min\{3, 5\} = 3$  与天线数量值相关; 而当  $n = 9$  时,  $M = \min\{9, 5\} = 5$  与节点数量相关。此时天线越多使得系统允许并行传输的数量最大, 而相对过多的节点接入则反而会导致系统冲突概率变大, 因此降低了系统吞吐量。然而, 当节点数量超过 10 个之后, 系统吞吐量基本与天线数量成正相关趋势。

图 5 展示了当设定节点数量  $N = 20$  时, 吞吐量随节点竞争窗口大小变化而变化的趋势结果。图 5 与图 4 的结果趋势基本一致。需要注意的是, 当  $W$  较小时, 由式 (6) 可知, 每个节点接入概率均较大, 所以造成的系统竞争较为激烈, 所以天线数量越多, 则冲突的概率越大, 进而导致系统吞吐量越小。例如, 当  $W = 100$  时, 天线数量  $n = 9$  的吞吐量比天线数量  $n = 5$  时的低。然而, 当  $W \geq 200$  之后, 系统吞吐量基本与天线数量的变化成正相关趋势。

## 4 结论

针对发送节点因功耗限制而不易执行现有太过复杂协议的问题, 提出了一种执行简单、可支撑多设备并发接入的 CSMA/CA 协议。本协议执行在 CSMA/CA 基本模式下, 并遵循传统的 CSMA/CA 过程进行信道竞争。竞争胜利的节点将进行数据传输, 同时其他节点根据信道的最大并行传输能

力决定是否继续参与竞争和传输。本协议通过允许节点每次均发送完整数据包的方式,避免了对数据包分片对齐的复杂性。然后,构建理论分析模型计算了所提出协议的系统吞吐量,并通过仿真实验验证了所提出协议的可行性和理论模型的准确性。该协议具备科研与工程的双重意义,既可为物理层 MIMO 技术下的 CSMA/CA 协议的研究工作填补了设计空缺,也可提供可行性更高的落地设计思路。

### 参考文献

- [1] 马式纪,牛囿入,云璋瑜,等. 基于无线网络传输的桥梁健康监测系统设计[J]. 科技和产业, 2022, 22(2): 306-311.
- [2] 王旭东,韩晓磊,邹功鑫,等. 基于权值的新能源集控电量均衡 CSMA/CA 改进算法[J]. 微型电脑应用, 2024, 40(5): 227-230.
- [3] 石凯,沈卫康,欧阳孟可. 低压用户侧泛在电力物联网的关键技术与组网方案[J]. 科技和产业, 2021, 21(3): 263-268.
- [4] 赵壮志,侯嘉. 一种串/并混合的多输入多输出信号检测算法[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(32): 13753-13757.
- [5] 吴君钦,刘小兰,窦蕾萍,等. 基于块稀疏的低复杂度宽带 MIMO-OFDM 稀疏信道估计方案[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(26): 11444-11451.
- [6] 王雪,周宁浩,侯嘉. 基于上行 MIMO-SCMA 系统的异步分组检测算法[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(3): 1100-1109.
- [7] KOU J F, WANG D, REN J, et al. Performance analysis of a RTS/CTS-based channel accessing mechanism for MU-MIMO WLANs[J]. *Wireless Personal Communications*, 2017, 95: 1583-1599.
- [8] HU Z Q, QI H, WEN X, et al. Performance analysis based Markov chain in random access heterogeneous MIMO networks[J]. *Computer Networks*, 2020, 180: 107415.
- [9] SHAHANAGHI A, ABBASFAR A, OUSAT B. A novel method for throughput analysis of MAC protocols in multi-user MIMO networks[C]//2017 Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE). Tehran Iran: IEEE, 2017: 1961-1966.
- [10] 朴德江,肖子雄,蒋轶. 一种 MIMO 移动自组织网络的物理层与 MAC 层联合设计[J]. 微型电脑应用, 2020, 36(12): 5-8.
- [11] KARABULUT M A, SHAH A S, ILHAN H. A novel MIMO-OFDM based MAC protocol for VANETs[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2022, 23: 20255-20267.
- [12] WU S S, MAO W G, WANG X D. Performance study on a CSMA/CA-based MAC protocol for multi-user MIMO wireless LANs[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2014, 13: 3153-3166.
- [13] CORDESCI N, ZHUANG W, TAFAZOLLI R, et al. Optimal random access strategies for trigger-based multiple-packet reception channels[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2024, 23: 2303-2320.
- [14] CHEN C, HOU S J, WU S L. A novel analytical model for asynchronous multi-packet reception MAC protocol [J]. *IEEE Communications Letters*, 2017, 21: 1289-1292.
- [15] CAO Z Y, JIN H, DE S, et al. How Much Benefit Can Multipacket Reception Channel Bring to CSMA [J]. *IEEE Access*, 2023, 11: 119409-119426.
- [16] 鲍晶晶,董华锋. 多跳虚拟 MIMO 系统中随机接入的 MAC 方案[J]. 计算机工程与设计, 2023, 44(7): 1944-1951.
- [17] 吴秋尘,胡春静,吴皓,等. 基于 CSMA/CA 的无人机自组网容量分析[J]. 通信技术, 2022, 55(8): 1014-1019.
- [18] BIANCHI G. Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2000, 18: 535-547.

## An Improved CSMA/CA Protocol Design in Wireless MIMO Networks

ZHU Lin<sup>1</sup>, SUN Lu<sup>2</sup>, ZOU Hongsen<sup>2</sup>, QI Yufeng<sup>3</sup>

(1. State Grid Ningxia Electric Power Co., LTD., Yinchuan 750002, China;

2. State Grid Ningxia Electric Power Co., LTD., UHV Company, Yinchuan 750002, China;

3. Wuxi Internet of Things Innovation Center Co., LTD., Wuxi 214000, Jiangsu, China)

**Abstract:** Regarding the increasing number of IoT devices and the trend towards miniaturization, which require high concurrent transmission performance and low energy consumption, an improved MAC(media access control) layer CSMA/CA(carrier sense multiple access with collision avoidance) protocol design is proposed based on physical layer MIMO(multiple input multiple output) technology. It simplifies the complexity of executing the CSMA/CA protocol on terminals and employs MIMO to achieve concurrent access for multiple terminals through cross-layer design, and allows terminal devices to easily and conveniently access the network system. An analysis of the throughput performance of the proposed protocol was presented, and its effectiveness and the accuracy of the theoretical analysis were verified through simulation, which not only provides a theoretical supplement to the redesign of the CSMA/CA protocol but also offers practical guidance for engineering applications.

**Keywords:** MIMO (multiple input multiple output); CSMA/CA (carrier sense multiple access with collision avoidance); throughput; performance analysis