

基于可靠多播通信的分布式无线信道最优接入方法研究

王一竹^{1,2}, 张周¹, 马丕明², 任保全¹

(1. 军事科学院, 北京 100071; 2. 山东大学信息科学与工程学院, 山东 青岛 266237)

摘要: 为解决分布式网络中多用户竞争与信道时变性导致的频谱利用效率低的问题, 对基于多播通信的分布式无线信道接入问题进行了研究。基于最优停止理论, 建立了多个多播组分布式无线信道接入过程统计学模型, 提出了一种基于可靠多播通信的分布式无线信道接入方法。各信源以分布方式竞争信道, 获胜信源通过对比可靠多播接入速率与固定阈值, 动态决定是否接入信道, 完成信源对所有信宿的可靠多播传输。理论分析证明, 该方法可实现可靠多播通信下系统吞吐量的统计值最优。设计了相应低复杂度信道接入算法, 算法具有纯阈值结构, 该方法有良好的工程可实现性。数值结果表明, 所提出的信道接入方法可有效提升系统平均吞吐量。

关键词: 可靠多播通信; 最优停止理论; 分布式无线信道接入

中图分类号: TN92

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-3750.2022.00290

Research on optimal channel access method for distributed wireless network based on reliable multicast communication

WANG Yizhu^{1,2}, ZHANG Zhou¹, MA Piming², REN Baoquan¹

1. Academy of Military Sciences, Beijing 100071, China

2. School of Information Science and Engineering, Shandong University, Qingdao 266237, China

Abstract: To address the low spectrum utilization issue of the distributed network due to multi-user collision and channel time-varying nature, the distributed channel access problem for multicast communication was investigated. Based on the optimal stopping theory, a statistical model of distributed channel access under wireless multicasts was established, and an optimal distributed wireless channel access method under reliable multicast communication was proposed. Each source competes for the channel in a distributed manner, the winner source determines whether to access the shared channel by comparing the reliable multicast access rate with a pure threshold to complete the reliable multicast communication from the winner source to all the sinks. Theoretic optimality of the method was proved rigorously. A corresponding low-complexity algorithm was designed, which has a pure threshold structure and good engineering practicability. Numerical results show that the proposed channel access method can effectively improve the average throughput of the system.

Key words: reliable multicast communication, optimal stopping theory, distributed wireless channel access

0 引言

作为无线网络技术发展的重要方向, 分布式网络具有节点自治、抗毁能力强等特点, 在集群系统

构建中得到广泛应用。与集中式网络相比, 分布式网络不依赖中心节点对用户信道接入进行统一管理, 组网开销低, 网络结构灵活度高。但是, 分布式网络中多用户存在竞争关系, 影响信道接入效率。

收稿日期: 2022-01-21; 修回日期: 2022-08-05

通信作者: 张周, qsyjcsxd12021@163.com

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61801504, No.62171456)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.61801504, No.62171456)

信源与信宿之间无线链路的高时变性进一步加剧效率问题。因此,需要对分布式网络的物理层与媒体接入控制(MAC, media access control)层进行联合设计,研究新的信道接入方法,实现高效信道接入^[1-3]。

多播通信技术是提升信道接入效率的有效途径。当分布式网络中多个用户请求相同的数据时,信源通过多条链路将数据传输至各用户,即多播通信。相比单播通信,多播通信允许用户共享信道进行数据传输,信道接入效率得到显著提升。已有文献对集中式网络的多播信道接入方法进行了研究,主要集中在物理层与MAC层联合设计方法上。针对多播通信的传输可靠性,文献[4-5]提出了前向纠错编码与自动请求重传机制相结合的多播传输方法,文献[6-7]提出了基于协作通信的多播高可靠接入方法,通过用户之间的协作扩大通信范围。结合信道自适应传输技术,文献[8-10]提出了基于多用户集中控制的多播接入方法,根据多播组内信道状态,动态调整用户传输功率并分配子信道,实现系统实时吞吐量最优。为提升多播通信信道利用率,文献[11-13]将自适应调制与可伸缩编码结合提出了正交多址多播接入优化方法,通过基于信道状态的动态分层编码与子信道分配联合优化设计实现多播网络信道利用率最优。利用非正交多址接入技术,文献[14]提出了基于多速率编码层非正交多址传输的功率分配优化方法,进一步提高信道利用率。针对IEEE 802.11无线局域网中多播接入问题,文献[15-20]分别提出了基于IEEE 802.11e、IEEE 802.11ac和IEEE 802.11ax标准的多播通信改进方法。具体地,为确保可靠通信,文献[15-18]对IEEE 802.11ac标准MAC层协议进行设计改进,建立了传输确认反馈与重传机制。文献[19]通过将可伸缩编码调制与IEEE 802.11e标准分级优先接入相结合,提出了面向视频服务质量的动态接入方法,大幅提升了网络吞吐量。针对单播与多播业务共存的信道接入问题,文献[20]提出了基于IEEE 802.11ax标准的局域网接入点波束成形与功率信道联合分配方法,实现系统吞吐量最优。

相较于集中式网络,分布式多播通信网络信道接入方法设计更具有挑战性,主要体现在以下3个方面。第一,多个信源以自主方式接入共享信道,各信源仅可获得自身多播组信道状态。由于多径效应、建筑物遮挡引起信道衰落,不同多播组经历信道状态存在差异,多个多播组的链路多样性难以得

到充分利用。第二,无线链路的随机性导致多播组内通信传输存在不稳定性,多播通信的可靠传输依赖重传机制。分布式接入下,多播链路时变性使得单个多播组信道可接入时间受限,严重影响传统重传机制运行效率。第三,经过分布式信道竞争,单个多播组获得信道接入机会后,组内多个信宿须以分布方式实时反馈信道状态,额外信令开销影响传输效率。因此,如何设计基于可靠多播通信的分布式无线信道接入方法具有重要意义和技术挑战。

当前,分布式信道接入优化方法研究主要基于IEEE 802.11标准DCF机制,通常以系统吞吐量统计值最大化为目标。一些研究对信道接入方法进行了设计与优化,取得了一些进展^[21-27]。针对分布式直连网络,文献[21-22]研究了信道接入优化方法,建立了基于最优停止理论的信道接入模型,提出了固定门限分布式接入方法,实现系统吞吐量统计值最优。针对业务时间敏感性,文献[23]进一步研究了平均时延约束下的直连信道接入优化方法,满足平均时延约束条件,并实现系统吞吐量统计值最优。在直连网络的基础上,文献[24-27]还研究了协同网络信道接入问题,开展了数理建模和接入方法设计。针对中继受控模式下的协同接入,文献[24-25]综合考虑直连信道状态与协同信道状态,确定最优传输方式,提出了直连与中继信道混合式最优信道接入方法,实现中继协同下双跳接入的系统吞吐量统计值最优。进一步考虑多中继下信令开销问题,文献[26]提出了中继自治模式最优信道接入方法。面向服务质量保障的信道接入,文献[27]研究提出了服务质量最优的信道接入方法。尽管如此,针对分布式多播信道接入方法的研究还处于空白,已有集中式多播接入方法和分布式单播接入方法受到多用户接入协议失配和网络性能下降等影响难以适用。

因此,针对分布式多播通信网络设计面临的主要挑战,本文对基于可靠多播通信的分布式信道接入问题进行了研究,主要贡献如下。一是统计学模型构建。针对分布式多播网络接入,建立了多个多播组信道接入平均吞吐量统计学优化模型。二是最优信道接入方法设计。基于最优停止理论,设计了多播网络分布式信道接入方法,理论证明了所提方法具有吞吐量统计最优性。三是简易算法实现。以最优接入方法为基础,设计了多用户信道接入算法,各信源通过比较多播组内可接入速率和固定阈

值, 决定是否接入信道。通过与现有方法的性能对比, 验证了所提方法的最优性。

1 系统模型

1.1 工作机制

考虑一个包含 K 个多播组的分布式无线网络, 每个多播组由 1 个信源节点 $S_k, k \in \{1, 2, \dots, K\}$ 和对应 M 个信宿节点 $D_{k,m}, m \in \{1, 2, \dots, M\}$ 组成, 多播通信网络模型如图 1 所示。所有节点时间同步, 多播组之间以分布方式共享信道进行业务传输。各信源与信宿之间的无线信道服从瑞利信道衰落模型, 信源至信宿 $D_{k,m}$ 的信道等效信噪比 $h_{k,m}$ 服从指数随机分布, 期望为 σ_h^2 。该信噪比为综合信源发射功率、信宿接收噪声功率和信道增益的等效值。考虑节点移动性, 无线信道服从块衰落模型, 信道接入时间记为 τ_d 。

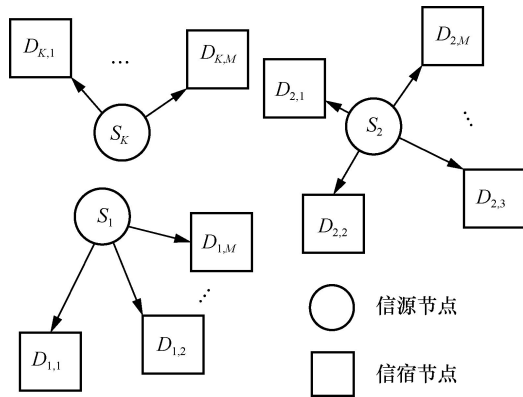


图 1 多播通信网络模型

多播组分布式信道接入使用 CSMA/CA 协议, 信令帧采用高鲁棒性编码方式调制, 未发生信源接入碰撞时, 信道衰落导致信令帧不能成功接收的概率很低。本文考虑请求发送 (RTS, request to send) 包、清除发送 (CTS, clear to send) 包和 ACK 信令传输具有鲁棒性^[5,28-29]。考虑理论分析复杂度, 本文在 CSMA/CA 协议退避机制上进行简化, 所提信道接入方法对于退避机制下协议仍然适用^[21,23,25]。

多个多播组的信道接入过程具体描述如下^[21-30]。从一个时长为 δ 的时隙开始, 各多播组的信源节点 S_k 以概率 $p_k \in [0, 1]$ 竞争信道, 向组内所有信宿节点发送 RTS 包。其他节点, 包括发送信源所在多播组内对应信宿和其他未参与竞争的节点, 通过物理层能量检测 (检测时间为 δ) 监测该时隙的信道占用情况^[29-30], 此时可能存在以下 3 种情况。

1) 若该时隙中没有信源节点发送 RTS 包, 其他节点监测信道未被占用, 则信道空闲, 所有信源在下一个时隙继续竞争。

2) 若该时隙中有两个或两个以上信源节点发送 RTS 包, 其他节点监测信道被占用 (占用时间为 RTS 包时长), 发送信源对应信宿不能成功接收 RTS 包, 则信道冲突。在随后时隙中, 对应信宿不向信源反馈 CTS 包, 记为 CTS1, 其他节点通过监测信道未被占用知道信道发生冲突。所有信源在下一个时隙继续竞争。

3) 若该时隙仅有一个信源节点 S_k 发送 RTS 包, 其他节点监测到信道被占用, 发送信源对应信宿成功接收 RTS 包, 在随后时隙中, 对应信道向发送信源反馈 CTS1 包。信源和其他节点通过监测信道被占用 (占用时间为 CTS 包时长) 知道信道被信源 S_k 获得, 则信道竞争成功。此时一次信道竞争过程完成, 信源 S_k 赢得信道竞争, 被称为获胜信源, 其他节点保持静默。

对于单个时隙信道竞争, 情况 1 即信道空闲的概率为 $p_{idle} = \prod_{k=1}^K (1 - p_k)$, 情况 2 即信道冲突的概率为 $p_c = 1 - \prod_{k=1}^K (1 - p_k) - \sum_{k=1}^K \left(p_k \prod_{l=1, l \neq k}^K (1 - p_l) \right)$,

情况 3 即信道竞争成功的概率为 $p_s = \sum_{k=1}^K \left(p_k \prod_{l=1, l \neq k}^K (1 - p_l) \right)$ 。

信道竞争成功后, 获胜信源节点 S_k 所在多播组内全部信宿 $D_{k,m}$ 可收到 RTS 包, 利用包内携带的训练序列计算得到自身与信源之间的信道信噪比 $h_{k,m}$ 。多播通信采用多阶信息速率传输方式, 信宿 $D_{k,m}$ 根据信噪比 $h_{k,m}$ 确定可达信息速率 $R_{k,m}$, 可表示为

$$R_{k,m} = \begin{cases} 0 & h_{k,m} < \gamma_1 \\ R_1 & \gamma_1 \leq h_{k,m} < \gamma_2 \\ \vdots & \vdots \\ R_V & h_{k,m} \geq \gamma_V \end{cases} \quad (1)$$

其中, R_v 表示第 v 阶传输速率, $v \in \{1, 2, \dots, V\}$, V 表示可调速率阶数, $\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_V$ 表示各阶速率对应的信噪比值。

随后, 信宿 $D_{k,m}, m \in \{1, 2, \dots, M\}$ 以分布方式向信源节点 S_k 反馈 CTS 包, 包中携带各自信道状态信息, 记为 CTS2。信宿中可达速率最低的节点称为最差信宿, 对应速率为多播可接入速率, 记为

R_{worst} 。信源根据该速率决定是否接入信道。若接入信道, 信源以速率 R_{worst} 接入信道进行多播传输, 以确保其组内所有信宿 $D_{k,m}$, $m \in \{1, 2, \dots, M\}$ 均可成功接收。

利用信宿可达速率的差异性, 设计基于信宿实时传输速率 $R_{k,m}$ 的 CTS 反馈退避机制。具体地, 在获胜信源多播组中, 若 $R_{k,m} = 0$, 信宿 $D_{k,m}$, $m \in \{1, 2, \dots, M\}$ 直接向信源 S_k 反馈 CTS2 包; 否则根据速率 $R_{k,m} = R_v$ 设定退避时间 $\tau_{k,m} = v\delta$ 并持续监测信道。若退避时间内信道未被占用, $D_{k,m}$ 向信源 S_k 反馈 CTS2 包。至多 V 个时隙内, 若存在信宿向信源反馈 CTS2 包, 获胜信源 S_k 可监测到信道被占用, 获得反馈退避时间 τ , 相应地计算多播组可达速率 R_{worst} 为

$$R_{\text{worst}} = \begin{cases} 0 & \tau = 0 \\ R_1 & \tau = \delta \\ R_2 & \tau = 2\delta \\ \vdots & \vdots \\ R_V & \tau = V\delta \end{cases} \quad (2)$$

由于实时信道状态具有随机性, 速率 R_{worst} 的概率分布函数表示为

$$\mathcal{P}[R_{\text{worst}} = r] = \begin{cases} 1 - e^{-\gamma_1 M / \sigma_h^2} & r = 0 \\ e^{-\gamma_1 M / \sigma_h^2} - e^{-\gamma_2 M / \sigma_h^2} & r = R_1 \\ \vdots & \vdots \\ e^{-\gamma_{V-1} M / \sigma_h^2} - e^{-\gamma_V M / \sigma_h^2} & r = R_{V-1} \\ e^{-\gamma_V M / \sigma_h^2} & r = R_V \end{cases} \quad (3)$$

其中, $\mathcal{P}[\cdot]$ 表示概率。

根据速率 R_{worst} 和花费时间信息, 获胜信源 S_k 决定是否利用接入机会进行多播传输:

1) 如果信源 S_k 决定接入, 则其将以速率 R_{worst} 接入信道进行多播传输, 信道接入时间为 τ_d 。传输完成后, 最差信宿节点向信源反馈 ACK, 确认多播传输成功 (传输完成后, 可能存在多个最差信宿向信源同时反馈 ACK, 导致 ACK 反馈冲突。此时信源仍可通过监测信道占用, 确认多播传输成功)。所有信源监测到信道被占用后开始新一轮信道接入。

2) 如果信源 S_k 决定放弃传输机会, 其保持静默, 随后所有信源在下一个时隙继续竞争信道。

为直观描述信道接入过程, 分布式多播信道接入过程示例如图 2 所示, 多个信源竞争接入信道,

在前 2 个时隙, 没有信源竞争信道发送 RTS 包, 信道保持空闲; 在第 3 个时隙, 信源 S_1 和信源 S_3 发送 RTS 包, 发生信道冲突; 在随后竞争中, 信源 S_7 赢得信道并向组内所有信宿发送 RTS 包, 信宿反馈 CTS1 包通知其他节点信道竞争成功。通过 CTS 反馈退避机制, 组内信宿 $D_{7,M}$ (其可达信息速率最小) 退避 2δ 时长后反馈 CTS2 包, 其他信宿监测信道被占用并保持静默。获胜信源 S_7 接收 CTS2 包后获得组内可达多播速率 R_2 。由于此时信宿 $D_{7,M}$ 信道条件较差, 导致多播组可传输速率较低, 获胜信源 S_7 放弃当前机会, 并在下个时隙继续竞争信道。继续经历 1 次冲突和 1 次空闲后, 信源 S_2 在第 8 次信道竞争中获胜。组内最差信宿 $D_{2,1}$ 和 $D_{2,2}$ 退避 4δ 时长后同时反馈 CTS2 包, 其他信宿监测到信道占用后保持静默。获胜信源 S_2 获得可达速率 R_4 , 此时信道可达速率 R_4 较大, 选择利用信道机会以速率 $R_{\text{worst}} = R_4$ 和接入时间 τ_d 进行多播传输。传输完成后, 最差信宿 $D_{2,1}$ 和 $D_{2,2}$ 向信源反馈 ACK。综上, 完成一次成功的多播组信道接入过程。随后, 所有信源开始新一轮分布式信道接入。

1.2 吞吐量优化问题统计学模型

为实现分布式网络可靠多播通信平均吞吐量最大化, 使用最优停止理论对上述分布式信道接入问题进行统计学建模。把从所有信源开始竞争信道至获胜信源获得的多播接入速率 R_{worst} 的过程定义为一次观测。对于第 n 次观测, 信源获得多播接入速率为 $R_{\text{worst},n}$, 信道观测时间为 t_n 。根据第 n 次为止所有观测信息, 可计算单次成功信道接入花费的总时间为 $T_n = \sum_{i=1}^n t_i + \tau_d$, 包括已经历的观测时间

$\sum_{i=1}^n t_i$ 和接入时间 τ_d 两部分。

针对信道接入过程随机性, 单次观测对应时间成本 t_n 的期望值为

$$\begin{aligned} \tau_1 &= \tau_{\text{RTS}} + 2\tau_{\text{CTS}} + \tau_{\text{ACK}} + \\ &\delta \left[\sum_{j=1}^{V-1} j(e^{-\gamma_j M / \sigma_h^2} - e^{-\gamma_{j+1} M / \sigma_h^2}) + V e^{-\gamma_V M / \sigma_h^2} \right] + \\ &\frac{P_{\text{idle}}}{P_s} \delta + \frac{P_c}{P_s} (\delta + \tau_{\text{RTS}}) \end{aligned} \quad (4)$$

其中, τ_{RTS} 表示 RTS 包传输时间, τ_{CTS} 表示 CTS 包传输时间, τ_{ACK} 表示 ACK 传输时间,

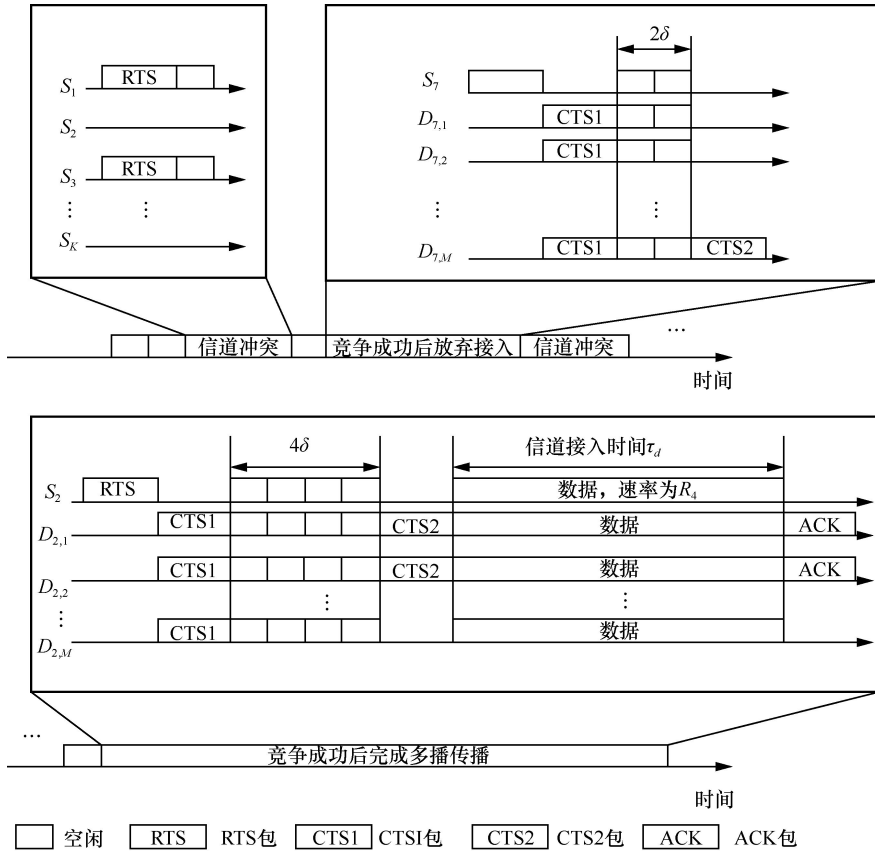


图2 分布式多播信道接入过程示例

$$\delta \cdot \left[\sum_{j=1}^{V-1} j(e^{-\gamma_j M / \sigma_h^2} - e^{-\gamma_{j+1} M / \sigma_h^2}) + V e^{-\gamma_V M / \sigma_h^2} \right] \text{为 CTS 反馈}$$

退避过程所花费时间期望值。

第 n 次观测后，若信源决定停止观测，即决定接入信道，记为 $N = n$ ，可获得收益 $Y_n = R_{\text{worst},n} \tau_d$ ，并花费时间 T_n 。其中， N 表示停止时间。否则，信源不停止，进行第 $n+1$ 次观测。

把信源开始第 1 次观测 ($n=1$) 至停止的过程看作一次成功信道接入，停止时间 N 对应收益为 $Y_N = R_{\text{worst},N} \tau_d$ ，花费时间为 T_N 。由于信道竞争、无线信道状态存在随机性， N 、 Y_N 和 T_N 为随机变量。

多个多播组分布式信道接入可看作上述过程的不断重复。考虑 t 次成功的信道接入，单次对应停止时间样本分别记为 $\{N_1, N_2, \dots, N_t\}$ 。具体地，对于第 l 次成功接入，获胜信源在第 N_l 次观测时决定接入信道，信道接入收益为 Y_{N_l} ，花费时间为 T_{N_l} 。 t 次成功信道接入的系统吞吐量时间平均值为 $\sum_{l=1}^t Y_{N_l} / \sum_{l=1}^t T_{N_l}$ 。

基于强大数定理，系统吞吐量时间平均值将以

概率 1 (a.s., almost surely) 收敛至吞吐量统计值，满足

$$\frac{\sum_{l=1}^t Y_{N_l}}{\sum_{l=1}^t T_{N_l}} \rightarrow \frac{\mathbb{E}[Y_N]}{\mathbb{E}[T_N]} \text{ a.s.} \quad (5)$$

其中， $\mathbb{E}[\cdot]$ 表示期望。

根据上述关系，信道接入方法设计的核心问题为确定最优的停止时间 N^* ，实现系统吞吐量统计值最大化。优化问题可描述为

$$\sup_{N \geq 1} \frac{\mathbb{E}[Y_N]}{\mathbb{E}[T_N]} \Leftrightarrow N^* = \arg \sup_{N \geq 1} \frac{\mathbb{E}[Y_N]}{\mathbb{E}[T_N]} \quad (6)$$

上述问题的最优解即最优停止时间 N^* 对应最优信道接入方法。

2 最优信道接入方法

2.1 存在性分析

通过观察优化目标函数表达式(6)，原优化问题可等价变换为时间代价系数为 λ ($\lambda > 0$) 的优化问

题, 目标函数具有差值形式, 描述为

$$V^*(\lambda) = \sup_{N \geq 1} \mathbb{E}[Y_N - \lambda T_N] \quad (7)$$

给定系数 $\lambda > 0$, 定义变换后优化问题(7)的最优解为 $N^*(\lambda)$ 。根据文献[31]第6章定理1, 满足 $V^*(\lambda^*) = 0$ 的唯一解 λ^* 为最大系统吞吐量统计值, 对应最优停止时间 $N^*(\lambda^*)$ 为原问题(6)的最优解 N^* 。

因此, 最优信道接入方法的求解过程可分为两个步骤。第一步, 对于给定代价系数 $\lambda > 0$, 求解变换后问题对应的最优停止时间 $N^*(\lambda)$ 。第二步, 求解最大系统吞吐量统计值 λ^* , 确定最优停止时间 $N^*(\lambda^*)$, 对应最优信道接入方法 N^* 。

下面定理证明对于给定代价系数, 变换后优化问题(7)最优停止时间 $N^*(\lambda)$ 的存在性及其表达式。证明沿用文献[31]的主要思路, 针对多播可靠传输速率和CTS反馈退避机制, 对多播接入速率 $R_{\text{worst},n}$, $n=1,2,\dots,+\infty$ 和观测时间 t_i , $i=1,2,\dots,n$ 进行了二阶矩统计特性分析。变换后优化问题(7)的最优停止时间 $N^*(\lambda)$ 将用于获得原问题的最优解。

定理1 在给定 $\lambda > 0$ 的情况下, 存在最优停止时间 $N^*(\lambda)$ 达到 $\sup_{N \geq 1} \mathbb{E}[Y_N - \lambda T_N]$ 。最优停止时间可表示为

$$N^*(\lambda) = \{n \geq 1 : Y_n - \lambda \tau_d \geq V^*(\lambda)\} \quad (8)$$

其中, 最优值 $V^*(\lambda)$ 满足

$$V^*(\lambda) = \mathbb{E}[\max\{Y_n - \lambda \tau_d, V^*(\lambda)\}] - \lambda \tau_1 \quad (9)$$

证明 首先证明变换后优化问题最优解的存在性。

根据文献[31]第3章定理1, 当满足条件A1和A2, 即

$$\text{A1} \quad \limsup_{n \rightarrow \infty} Y_n - \lambda T_n = -\infty$$

$$\text{A2} \quad \mathbb{E}[\sup_n (Y_n - \lambda T_n)] < \infty$$

最优停止时间 $N^*(\lambda)$ 存在。因此分别证明上述条件成立。

分析条件A1。当 $n \rightarrow \infty$ 时, $Y_n = R_{\text{worst},n} \tau_d$ 为有限值, 且 $\lim_{n \rightarrow \infty} T_n = \infty$, 条件A1成立。

分析条件A2。可以得到式(10)成立。

$$\begin{aligned} \mathbb{E}[\sup_n (Y_n - \lambda T_n)] &\leq \mathbb{E}[\sup_n (R_{\text{worst},n} \tau_d - n\lambda(\tau_1 - \epsilon))] + \\ &\mathbb{E}[\sup_n \lambda \sum_{i=1}^n (\tau_1 - \epsilon - t_i)] - \lambda \tau_d \end{aligned} \quad (10)$$

其中, $0 < \epsilon < \tau_1$ 。

式(10)右侧包含3项。对于第一项, 随机过程 $R_{\text{worst},n}, n=1,2,\dots,+\infty$ 具有随时间独立同分布特征。使用 R_{worst} 表示其中任一随机变量所服从的随机分布, 可以证明 $R_{\text{worst},n}$ 二阶矩有限。

$$\mathbb{E}[R_{\text{worst},n}^2] = \mathbb{E}[R_{\text{worst}}^2] = \sum_{v=1}^V R_v \mathbb{P}[R_{\text{worst}} = R_v] < \infty \quad (11)$$

由于 $\tau_1 - \epsilon > 0$, 下面不等式成立。

$$\begin{aligned} \mathbb{E}[\sup_n (R_{\text{worst},n} \tau_d - n\lambda(\tau_1 - \epsilon))] &\leq \\ \int_0^\infty \mathbb{P}[\sup_{n \geq 1} (R_{\text{worst},n} \tau_d - n\lambda(\tau_1 - \epsilon)) > z] dz &\leq \\ \int_0^\infty \mathbb{E}\left[\frac{(R_{\text{worst},n} \tau_d - z)^+}{\lambda(\tau_1 - \epsilon)}\right] dz &= \frac{\mathbb{E}[(R_{\text{worst},n} \tau_d)^2]}{2\lambda(\tau_1 - \epsilon)} < \infty \end{aligned} \quad (12)$$

因此, 式(10)右侧第一项有限。对于式(10)右侧第二项, 有

$$\begin{aligned} \mathbb{E}[t_i^2] &\leq \frac{2 - p_s - p_s^2}{p_s^2} (p_{\text{idle}} \delta + p_c (\tau_{\text{RTS}} + \delta))^2 + \\ &\left(V \delta + \tau_{\text{RTS}} + 2\tau_{\text{CTS}} + \frac{p_{\text{idle}}}{p_s} \delta + \frac{p_c}{p_s} (\tau_{\text{RTS}} + \delta)\right)^2 \end{aligned} \quad (13)$$

$$\mathbb{E}[(\tau_1 - \epsilon - t_i)^2] = \epsilon^2 - \tau_1^2 + \mathbb{E}[t_i^2] < \infty \quad (14)$$

基于式(12)类似推导, 可证明式(10)右侧第二项有限。因此, 根据式(10)可得条件A2成立。综上, 条件A1和A2均成立, 最优停止时间 $N^*(\lambda)$ 存在。

其次推导变换后优化问题的最优解。对于给定代价系数 λ , 最优停止时间 $N^*(\lambda)$ 可表示为

$$N^*(\lambda) = \{n \geq 1 : Y_n - \lambda T_n \geq V_n^*(\lambda)\} \quad (15)$$

其中, $V_n^*(\lambda)$ 表示在第 n 次观测时不停止可获得的最大收益期望。

经分析, $V_n^*(\lambda)$ 可表示为

$$V_n^*(\lambda) = V^*(\lambda) - \lambda \sum_{i=1}^{n-1} t_i \quad (16)$$

基于停止优化理论的最优方程, 下面等式成立

$$\mathbb{E}[V_n^*(\lambda)] = \mathbb{E}\left[\max\left(Y_n - \lambda \left(\sum_{i=1}^n t_i + \tau_d\right), V^*(\lambda) - \lambda \sum_{i=1}^n t_i\right)\right] \quad (17)$$

将期望表达式(16)代入式(17)可得, 最优停止时间 $N^*(\lambda)$ 的最大收益期望 $V^*(\lambda)$ 满足

$$V^*(\lambda) = \mathbb{E}[\max\{Y_n - \lambda\tau_d, V^*(\lambda)\}] - \lambda\tau_1 \quad (18)$$

将式(18)代入式(15)和式(16), 可以得到最优停止时间 $N^*(\lambda)$ 。证毕。

2.2 最优信道接入方法

在最优停止时间 $N^*(\lambda)$ 的基础上, 求解原问题(6)的最优停止时间 N^* , 对应最优信道接入方法。判决门限 $\text{Th}_1, \text{Th}_2, \dots, \text{Th}_V$ 的定义为

$$\text{Th}_i = \begin{cases} \frac{R_i e^{-\gamma_i M / \sigma_h^2} + \sum_{j=i}^{V-1} R_j (e^{-\gamma_j M / \sigma_h^2} - e^{-\gamma_{j+1} M / \sigma_h^2})}{\tau_1 / \tau_d + e^{-\gamma_i M / \sigma_h^2}}, & i=1, 2, \dots, V-1 \\ \frac{R_i e^{-\gamma_i M / \sigma_h^2}}{\tau_1 / \tau_d + e^{-\gamma_i M / \sigma_h^2}}, & i=V \end{cases} \quad (19)$$

上述门限由无线信道特征参数 $\{\sigma_h^2, \tau_d\}$ 和多阶传输速率参数 R_1, R_2, \dots, R_V 共同确定。

定理 2 给出最优停止时间的表达式及其对应系统统计吞吐量最大值。

定理 2 使得系统统计吞吐量最大的最优停止时间可表示为

$$N^* = \min\{n \geq 1: R_{\text{worst},n} \geq \lambda^*\} \quad (20)$$

其中, 阈值为最大系统吞吐量统计值 λ^* 。根据传输速率 R_1, R_2, \dots, R_V 与判决门限 $\text{Th}_1, \text{Th}_2, \dots, \text{Th}_V$ 相互关系, 最优停止时间 N^* 阈值计算算法见算法 1。

算法 1 最优停止时间 N^* 阈值计算算法

输入 多阶传输速率 R_1, R_2, \dots, R_V 和无线信道统计特征参数 $\{\sigma_h^2, \tau_d\}$

根据式(19)计算判决门限 $\text{Th}_1, \text{Th}_2, \dots, \text{Th}_V$

执行下面迭代流程, 直至输出阈值 λ^*

当 $\text{Th}_1 \leq R_1$

$\lambda^* = \text{Th}_1$

否则

遍历 $i=2, 3, \dots, V$

当 $R_{i-1} < \text{Th}_i \leq R_i$

$\lambda^* = \text{Th}_i$, 结束判断, 转到输出

结束遍历

输出 阈值 λ^*

证明 根据上述最优信道接入方法求解过程的第二步, 在最优停止时间 $N^*(\lambda)$ 基础上, 求解最

大系统吞吐量统计值 λ^* 满足 $V^*(\lambda^*) = 0$, 确定最优停止时间 $N^*(\lambda^*)$, 对应最优方法 N^* 。

首先, 证明 λ^* 的存在性和唯一性。由于满足 $V^*(\lambda^*) = 0$, 代入式(9), λ^* 满足

$$\mathbb{E}[(R_{\text{worst},n} - \lambda)^+] = \lambda\tau_1 / \tau_d \quad (21)$$

由于 $\mathbb{E}[(R_{\text{worst},n} - \lambda)^+]$ 为变量 λ 的连续递减函数, $\lambda\tau_1 / \tau_d$ 是变量 λ 的连续递增函数, 作为两个单调函数的交点, λ^* 唯一存在。将 λ^* 代入定理 1 中 $N^*(\lambda)$ 的式 (8), 原优化问题最优解为 $N^* = \min\{n \geq 1: R_{\text{worst},n} \geq \lambda^*\}$ 。

接着推导 λ^* 的解析表达式。将式(21)左侧和右侧变量 λ 进行合并, 可进一步得到

$$\frac{\sum_{v=1}^V R_v \mathbb{I}[R_v \geq \lambda] \mathbb{P}[R_{\text{worst},n} = R_v]}{\tau_1 / \tau_d + \sum_{v=1}^V \mathbb{I}[R_v \geq \lambda] \mathbb{P}[R_{\text{worst},n} = R_v]} = \lambda \quad (22)$$

其中, $\mathbb{I}[\cdot]$ 为指示函数。

分别定义式(22)左侧和右侧函数为函数 $g_1(\lambda)$ 和 λ , λ^* 为两函数交点。将速率 R_{worst} 的概率分布函数表达式(3)代入式(22), 通过分情况讨论, 函数 $g_1(\lambda)$ 可表示为如下分段函数形式

$$g_1(\lambda) = \text{Th}_i \quad R_{i-1} < \lambda \leq R_i, i=1, 2, \dots, V \quad (23)$$

其中, $R_0 = 0$ 。

由于函数 $g_1(\lambda)$ 和 λ 存在唯一交点, 式(22)对应 V 个分段区间中有且仅有 1 个区间存在交点 λ^* 。对于 $i=1, 2, \dots, V$, 证明算法 1 的比较条件 $R_{i-1} < \text{Th}_i \leq R_i$ 是区间 $R_{i-1} < \lambda \leq R_i$ 内存在交点的充分必要条件。

首先, 证明必要性。若区间 $R_{i-1} < \lambda \leq R_i$ 内存在交点, 有 $\lambda^* = \text{Th}_i$ 且 $R_{i-1} < \lambda^* \leq R_i$, 满足 $R_{i-1} < \text{Th}_i \leq R_i$ 。其次, 证明充分性。若满足 $R_{i-1} < \text{Th}_i \leq R_i$, 函数 $g_1(\lambda)$ 与 λ 有唯一交点 $\lambda^* = \text{Th}_i$ 。因此, 条件 $R_{i-1} < \text{Th}_i \leq R_i$ 是函数 $g_1(\lambda)$ 与 λ 在分段区间 $R_{i-1} < \lambda \leq R_i$ 中相交的充分必要条件。

通过依次检查 V 个条件, 如算法 1 所示, 当任一条条件 $R_{i-1} < \text{Th}_i \leq R_i$ 成立, 获得 $\lambda^* = \text{Th}_i$, 计算过程结束。证毕。

定理 2 给出了原问题(6)的最优停止时间 N^* , 对应多播组最优信道接入方法, 具有多播网络统计吞吐量最优性。最优信道接入方法具有纯阈值结

构, 工程实现简易。由于判决门限 $\text{Th}_1, \text{Th}_2, \dots, \text{Th}_V$ 可根据式(19)计算并提前预置, 阈值为 λ^* , 可通过依次比较判决门限与传输速率 R_1, R_2, \dots, R_V 后赋值获得, 计算量很小。

进一步分析最优信道接入方法对应的信道接入性能, 包括可靠多播接入速率和时间开销。

推论 1 根据多阶传输速率 R_1, R_2, \dots, R_V 和判决门限 $\text{Th}_1, \text{Th}_2, \dots, \text{Th}_V$ 间的关系, 分 3 种情况分析最优信道接入方法对应的时间成本和接入速率性能。

情况 1 当 $\text{Th}_1 \leq R_1$ 时, T_{N^*} 服从期望为 $\mathbb{E}[T_{N^*}] = \tau_1 e^{\gamma_1 M / \sigma_h^2} + \tau_d$ 的几何随机分布。最优信道接入方法接入速率 R_{worst, N^*} 的概率分布函数满足

$$\mathbb{P}[R_{\text{worst}, N^*} = r] = \begin{cases} 1 - e^{-(\gamma_1 - \gamma_2)M / \sigma_h^2} & r = R_1 \\ \vdots & \vdots \\ e^{(\gamma_1 - \gamma_{V-1})M / \sigma_h^2} - e^{(\gamma_1 - \gamma_V)M / \sigma_h^2} & r = R_{V-1} \\ e^{(\gamma_1 - \gamma_V)M / \sigma_h^2} & r = R_V \end{cases} \quad (24)$$

情况 2 对于 $i = 2, 3, \dots, V-1$, 当 $R_{i-1} < \text{Th}_i \leq R_i$ 时, T_{N^*} 服从期望为 $\mathbb{E}[T_{N^*}] = \tau_1 e^{\gamma_i M / \sigma_h^2} + \tau_d$ 的几何随机分布。最优信道接入方法接入速率 R_{worst, N^*} 的概率分布函数满足

$$\mathbb{P}[R_{\text{worst}, N^*} = r] = \begin{cases} e^{(\gamma_i - \gamma_{i-1})M / \sigma_h^2} - e^{(\gamma_i - \gamma_{i+1})M / \sigma_h^2} & r = R_{i-1} \\ e^{(\gamma_i - \gamma_{i-1})M / \sigma_h^2} / e^{-\gamma_i M / \sigma_h^2} & r = R_i \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (25)$$

其中, $v = i, i+1, \dots, V-1$ 。

情况 3 当 $R_{V-1} < \text{Th}_V \leq R_V$ 时, T_{N^*} 服从期望为 $\mathbb{E}[T_{N^*}] = \tau_1 e^{\gamma_V M / \sigma_h^2} + \tau_d$ 的几何随机分布。按照最优信道接入方法接入时速率 R_{worst, N^*} 的概率分布函数为

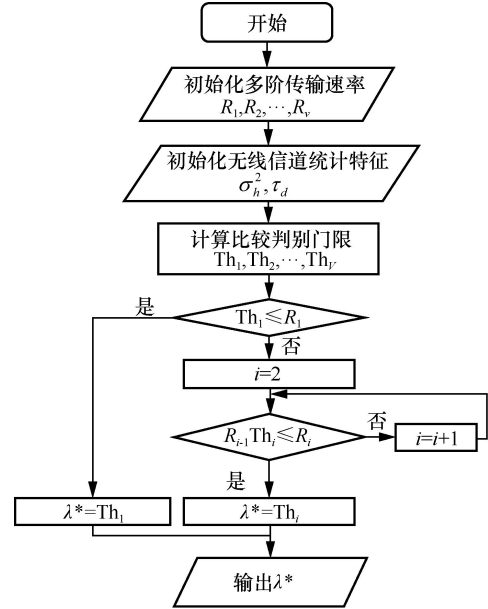
$$\mathbb{P}[R_{\text{worst}, N^*} = r] = \begin{cases} 1 & r = R_V \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (26)$$

推论 1 在最优信道接入方法及最大系统吞吐量统计值基础上对信道接入业务传输量和时间开销的统计性能进行了理论分析。根据无线信道特征参数 $\{\sigma_h^2, \tau_d\}$ 和多阶传输速率参数配置 R_1, R_2, \dots, R_V , 分别得到传输量和时间的统计值, 可作为衡量分布式接入方法对不同业务信道接入服务质量的主要性能参考。

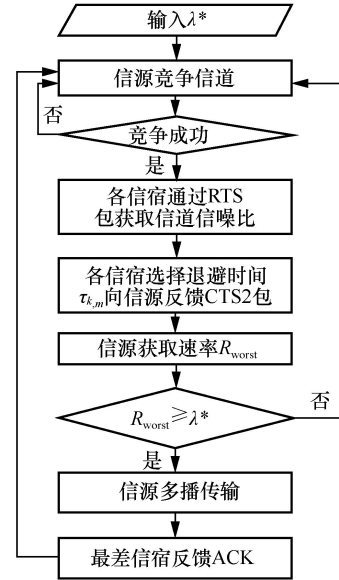
2.3 信道接入算法实现

在第 2.2 节分析基础上, 基于定理 2 最优停止

时间 N^* 表达式及其阈值算法, 设计信道接入方法的实现算法。算法由两部分组成, 信道接入算法实现流程如图 3 所示, 具体描述如下。



(a) 阈值计算流程



(b) 分布接入流程

图 3 信道接入算法实现流程

阈值计算流程如图 3(a)所示。网络内各信源节点以多阶传输速率 R_1, R_2, \dots, R_V 和无线信道统计特征参数 $\{\sigma_h^2, \tau_d\}$ 为输入, 按照式(19)计算判决门限 $\text{Th}_1, \text{Th}_2, \dots, \text{Th}_V$, 然后根据算法 1 计算阈值。

分布接入流程如图 3(b)所示。按照第 1.1 节信道接入机制, 网络内各节点以分布方式竞争信道, 进行多播信道接入。各多播组信源自主竞争信道,

发送 RTS 包。若有信源竞争成功,产生获胜信源 S_k , 所在多播组内信宿 $D_{k,m}$ 通过接收 RTS 包得到自身与信源之间信噪比 $h_{k,m}$, 确定可达信息速率 $R_{k,m}$, 并按照 CTS 反馈退避机制反馈 CTS2 包。获胜源 S_k 通过反馈退避时间 τ 获得多播可达信息速率 R_{worst} , 将其与 λ^* 比较: 若 $R_{\text{worst}} \geq \lambda^*$, 获胜信源节点按照 R_{worst} 进行多播传输, 信道接入时间为 τ_d , 多播传输完成后最差信宿节点向信源反馈 ACK 以确认成功接收; 否则, 获胜信源节点放弃接入机会, 所有多播组信源随即继续竞争。一次信道接入完成后, 所有多播组信源开始新一轮分布式接入过程。

3 仿真分析

为验证本文提出的信道接入方法的有效性 与效率, 在 MATLAB R2020a 环境下开展了数据 仿真试验, 网络参数配置见表 1。考虑分布式多 播网络包含 10 个多播组, 各多播组由 1 个信源 节点和 5 个信宿节点组成。各多播组之间信道相 互独立, 多播组内各信宿之间信道相互独立, 均 服从瑞利衰落模型。多播组信源信道竞争概率配 置见表 2, 设置空闲时隙时长^[22]为 $\delta=25 \mu\text{s}$, RTS 包、CTS 包和 ACK 传输时长为 $50 \mu\text{s}$, 可达信息 速率阶数为 $V=6$, 带宽为 20 MHz, 多阶传输速 率配置见表 3。

首先, 验证最优信道接入方法的理论分析结果 与蒙特卡洛数值仿真结果的一致性, 以及理论分析 结果的有效性。在信道接入时间 τ_d 为 5 ms、信道信 噪比 σ_n^2 为 1~19 dB 的情况下, 最优信道接入方法 系统吞吐量理论与数值结果对比如图 4 所示, 包括 “理论” 和 “数值” 两种形式曲线。其中, 理论曲 线是根据算法 1 计算得到的系统吞吐量统计值, 数 值曲线是通过 10^6 次成功信道接入蒙特卡洛仿真 结果得到的系统吞吐量平均样本值。可以看出, 理论 曲线与数值曲线非常吻合, 表明两种结果一致。进 一步考虑不同接入时间 τ_d 情况, 在 τ_d 分别为 10 ms 和 30 ms 的情况下, 相应的理论曲线与数值曲线非

常吻合。进一步验证了最优信道接入方法理论分析 结果的有效性。

表 1 网络参数配置

参数名称	数值	单位
多播组数 K	10	个
组内信宿数 M	5	个
信道衰落类型	瑞利衰落、块衰落	
信噪比 σ_n^2	1~19	dB
带宽	20	MHz
信息速率阶数 V	6	个
空闲时隙时长 δ	25	μs
RTS 包时长 τ_{RTS}	50	μs
CTS 包时长 τ_{CTS}	50	μs
ACK 包时长 τ_{ACK}	50	μs
信道接入时间 τ_d	5、10、30	ms

表 2 多播组信源信道竞争概率配置

k	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
p_k	0.1	0.3	0.5	0.2	0.5	0.4	0.8	0.1	0.2	0.4

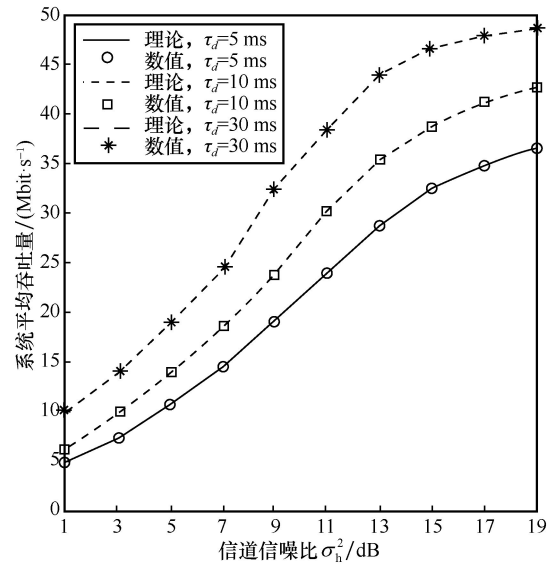


图 4 最优信道接入方法系统吞吐量理论与数值结果对比

其次, 分析信道条件对最优信道接入方法阈值 及其结构的影响。在信道接入时间 τ_d 为 10 ms, 信

表 3 多阶传输速率配置

	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_6
速率/(Mbit·s ⁻¹)	6.5	13.0	19.5	26.0	39.0	52.0
调制方式与码率	BPSK1/2	QPSK1/2	QPSK3/4	16QAM1/2	16QAM3/4	64QAM2/3
信噪比阈值 γ /dB	0.25	0.57	0.97	1.46	2.86	5.06

道信噪比 σ_h^2 分别为 1 dB、5 dB 和 19 dB 的情况下，最优信道接入方法阈值如图 5 所示。可以看出，随着 σ_h^2 增加，阈值增加。具体地，当信噪比 σ_h^2 为 1 dB 时， $Th_1 = 6.3$ Mbit/s，满足 $Th_1 \leq R_1 = 6.5$ Mbit/s，阈值为 $\lambda^* = Th_1$ ；当信噪比 σ_h^2 为 5 dB 时， $Th_3 = 14.5$ Mbit/s，满足 $R_2 = 13.0 < Th_3 \leq R_3 = 19.5$ Mbit/s，阈值为 $\lambda^* = Th_3$ ；当信噪比 σ_h^2 为 19 dB 时， $Th_6 = 42.9$ Mbit/s，满足 $R_5 = 39.0 < Th_6 \leq R_6 = 52.0$ Mbit/s，阈值为 $\lambda^* = Th_6$ 。上述结果与算法 1 一致。此外，不同信噪比对应阈值进一步决定了最优信道接入方法结构。具体地，当 σ_h^2 为 1 dB 时， $\lambda^* = Th_1$ ，对应最优方法为 $N^* = \min \{n \geq 1: R_{\text{worst},n} \geq Th_1\}$ 。由于 $Th_1 \leq R_1$ ， N^* 进一步简化为 $N^* = \min \{n \geq 1: R_{\text{worst},n} \geq R_1\}$ 。此时最优方法退化为有效传输速率下的直接停止方法。当 σ_h^2 为 19 dB 时， $\lambda^* = Th_6$ ，对应最优方法可等价表示为 $N^* = \min \{n \geq 1: R_{\text{worst},n} = R_6\}$ 。此时最优方法仅当达到最高速率时接入信道。

进一步分析所提最优信道接入方法与其他接入方法的吞吐量性能。将所提方法分别与直接停止接入方法和自适应重传可靠接入方法进行比较。对比方法具体描述如下：(1)直接停止接入方法。获胜信源竞争成功后使用多播可靠速率 R_{worst} 直接接入信道完成多播传输；(2)自适应重传可靠接入方法^[17-19]。所有信源随机选择速率作为初始值。信道竞争成功后，获胜信源按照初始速率进行多播传输：若传输成功，所有信源开始新一轮信道接入。各信源记录成功接入次数，连续成功 10 次后，传输速率增加一阶。若传输失败，信源降低一阶速率进行重传，重传至多 4 次。重传接入成功后，所有信源开始新一轮信道接入。

当信道接入时间 τ_d 分别为 5 ms 和 30 ms 时，在信噪比 σ_h^2 从 1 dB 增加到 15 dB 情况下，信道接入方法性能比较如图 6 所示，可以看到，直接停止接入方法和自适应重传可靠接入方法对应系统吞吐量较低，且性能差距明显。当信噪比 σ_h^2 较低 ($\sigma_h^2 < 7$ dB) 时，当直接停止接入方法比自适应重传可靠接入方法好。这是由于信道较差时，为确保可靠多播通信，重传机制花费时间开销不能补偿重传获得的传输量增益，导致系统吞吐量低。当信噪比 σ_h^2 增加 ($\sigma_h^2 \geq 7$ dB) 时，重传机制得到的传输量增益超过

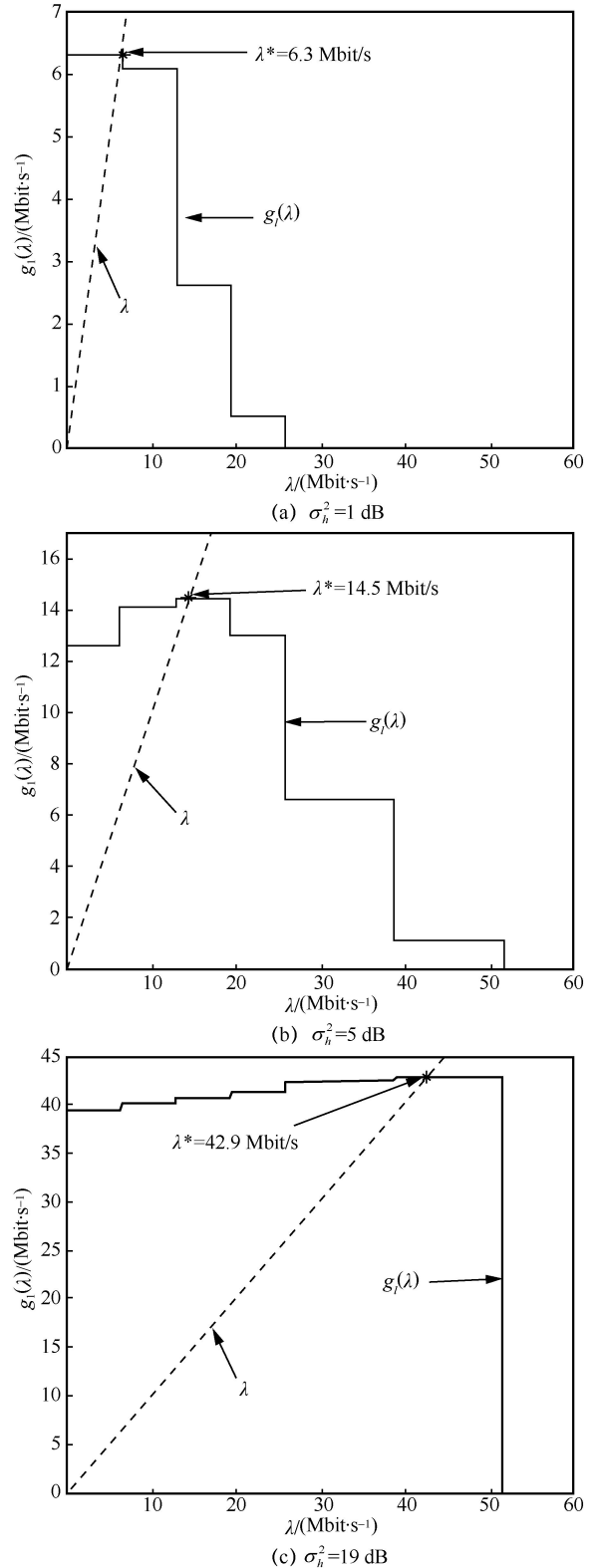


图 5 最优信道接入方法阈值

对应时间开销，系统吞吐量升高。此外，通过对比接入时间 5 ms 和 30 ms 的吞吐量曲线可以看到，随着接入时间增加，3 种方法的吞吐量均有所增加。直接停止接入方法和自适应重传可靠接

入方法的曲线变化较小，最优信道接入方法曲线提升明显。针对上述现象分析解释如下。直接停止接入方法与自适应重传可靠接入方法下，获胜信源不考虑信道实时状态直接接入信道，信道接入时间与信道实时状态无关，多个多播组的链路多样性与信道多样性未能联合利用。因此，信道接入时间对系统平均吞吐量影响小。最优信道接入方法下，获胜信源基于实时信道状态动态决定是否接入信道。当信道实时状态较差时，获胜信源主动放弃接入，为信道状态较好的其他信源提供了接入机会。综合利用各多播组的链路多样性和信道时间多样性，该方法以多信源信道竞争时间开销为代价，换取多个多播组之间较好状态信道的传输增益，增加了信道的接入效率，提升系统平均吞吐量。进一步地，基于图 6，最优信道接入方法对系统平均吞吐量的提升比例见表 4。数据显示，给定信道接入时间 τ_d ，随着信道信噪比增大，系统平均吞吐量的提升幅度不断减小。这是由于最优方法利用链路多样性和信道时间多样性获得的吞吐量相对增益主要取决于信道接入时间和多播组数量。随着多播链路信噪比 σ_h^2 增加，对比方法的吞吐量随之增加，吞吐量增加幅度值相应减少。此外，对比信道接入时间 τ_d 为 5 ms 和 30 ms 两种情况可见，信道接入时间较大时，系统平均吞吐量增加幅度值较大。上述结果与吞吐量相对增益随信道接入时间的变化分析一致。

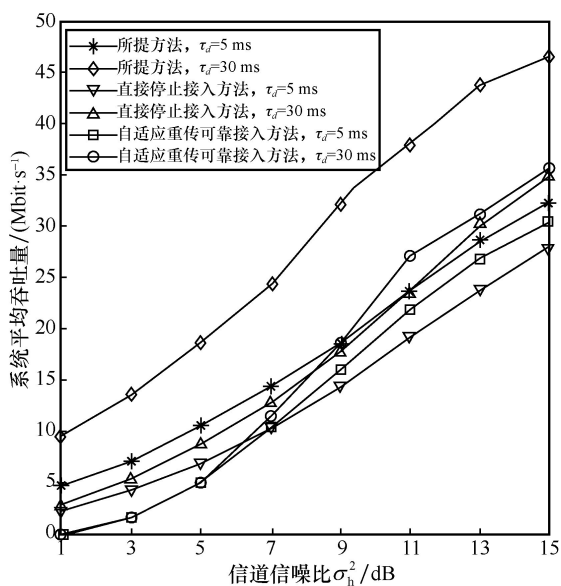


图 6 信道接入方法性能比较

最后，分析所提方法在 IEEE 802.11 CSMA/CA 协议退避机制下的有效性。CSMA/CA 协议退避机制下多播组分布式接入信道竞争过程改进描述如下。信道接入过程发生信道冲突后，冲突信源将信道竞争概率减半，以避免持续冲突。考虑 CSMA/CA 协议退避窗口上限，信源竞争概率调整次数至多 6 次，信道接入成功后竞争概率恢复初始值。CSMA/CA 协议退避机制下信道接入方法性能比较如图 7 所示。给出信道接入时间 τ_d 分别为 5 ms 和 30 ms、信噪比 σ_h^2 为 1~15 dB 下的性能曲线。可以看出，所提方法相比其他两种对比方法具有明显优势，直接停止接入方法和自适应重传可靠接入方法的吞吐量相近。CSMA/CA 协议退避机制下所提方法对系统平均吞吐量的提升比例见表 5，与表 4 结果相似。随着信道信噪比增加，由于多信源信道时间多样性获得的吞吐量相对增益随之减少，系统吞吐量提升幅度降低。仿真结果表明，所提方法在 CSMA/CA 协议退避机制下具有有效性。

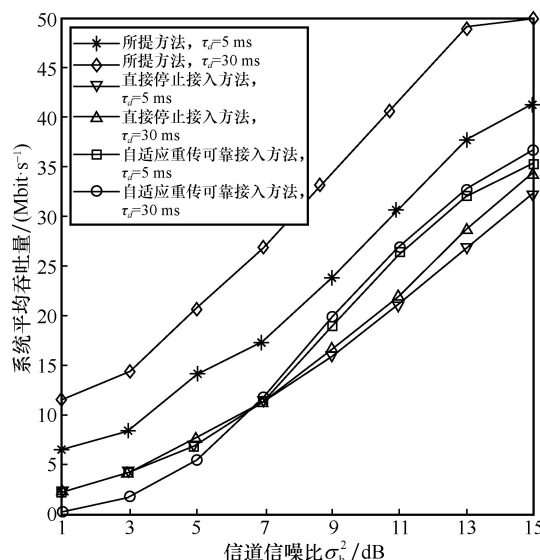


图 7 CSMA/CA 协议退避机制下信道接入方法性能比较

4 结束语

本文针对基于可靠多播通信的分布式无线信道接入问题进行了研究，提出了一种系统吞吐量统计最优的分布式无线信道接入方法，利用多个多播组的链路多样性和时间多样性，大幅提升了系统吞吐量。理论分析证明，所提方法实现了多播信道接入增益与信令开销的高效平衡，具有统计吞吐量最优性。此外，所提方法具有阈值结构，工程可实现性强。数值仿真与对比实验验证了所提方法的高效性。

表4 最优信道接入方法对系统平均吞吐量的提升比例

	σ_h^2	1	3	5	7	9	11	13	15
直接停止接入方法	$\tau_d=5$ ms	95%	63%	50%	38%	29%	23%	19%	14%
	$\tau_d=30$ ms	221%	152%	115%	89%	80%	61%	47%	32%
自适应重传可靠接入方法	$\tau_d=5$ ms	1 088%	302%	110%	37%	17%	7%	6%	6%
	$\tau_d=30$ ms	2 383%	628%	254%	107%	72%	42%	40%	30%

表5 CSMA/CA 协议退避机制下所提方法对系统平均吞吐量的提升比例

	σ_h^2	1	3	5	7	9	11	13	15
直接停止接入方法	$\tau_d=5$ ms	182%	114%	101%	57%	50%	43%	41%	28%
	$\tau_d=30$ ms	388%	220%	167%	135%	124%	86%	70%	44%
自适应重传可靠接入方法	$\tau_d=5$ ms	1 397%	344%	155%	52%	26%	18%	16%	15%
	$\tau_d=30$ ms	2 739%	661%	387%	121%	86%	52%	49%	36%

参考文献:

- [1] ZHANG Z, ZHOU S, JIANG H, et al. Opportunistic cooperative channel access in distributed wireless networks with decode-and-forward relays[J]. IEEE Communications Letters, 2015, 19(10): 1778-1781.
- [2] WEI Z L, SU J S, ZHAO B K, et al. Distributed opportunistic scheduling in cooperative networks with RF energy harvesting[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2020, 28(5): 2257-2270.
- [3] SANG W, ZHANG Z, WANG T T, et al. Distributed opportunistic channel access with optimal single relay under delay constraints[C]//Proceedings of 6th EAI International Conference. Piscataway: EAI, 2020: 599-610.
- [4] CHOI M, SUN W P, KOO J, et al. Reliable video multicast over Wi-Fi networks with coordinated multiple APs[C]//Proceedings of IEEE INFOCOM 2014 - IEEE Conference on Computer Communications. Piscataway: IEEE Press, 2014: 424-432.
- [5] ZHAO L, THORSTEN H. MAC layer multicast error control for IPTV in wireless LANs[J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 2009, 55(2):353-362.
- [6] HOU F, CAI L X, HO P H, et al. A cooperative multicast scheduling scheme for multimedia services in IEEE 802.16 networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009, 8(3):1508-1519.
- [7] CAO Y, JIANG T, CHEN X, et al. Social-aware video multicast based on device-to-device communications[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2016, 15(6): 1528-1539.
- [8] XU W J, NIU J R, HE Z Q. Resource allocation in multicast OFDM systems: lower/upper bounds and suboptimal algorithm[J]. IEEE Communications Letters, 2011,15(7):722-724.
- [9] SHARMA N, MADHUKUMAR A S. Genetic algorithm aided proportional fair resource allocation in multicast OFDM systems[J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 2015, 61(1): 16-29.
- [10] VELLA J M, ZAMMIT S, et al. A survey of multicasting over wireless access networks[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2013, 15(2):718-753.
- [11] HUANG C W, HUANG S M, WU P H, et al. OLM: opportunistic layered multicasting for scalable IPTV over mobile WiMAX[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2012, 11(3): 453-463.
- [12] LUO Q H, LIAO W, LIU T. Adaptive resource allocation for layer-encoded IPTV multicasting in IEEE 802.16 WiMAX wireless networks[J]. IEEE Transactions on Multimedia, 2011, 13(1): 116-124.
- [13] ZHOU H, JI Y S, WANG X Y, et al. Joint resource allocation and user association for SVC multicast over heterogeneous cellular networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2015, 14(7): 3673-3684.
- [14] ZHU H, CAO Y, JIANG T, et al. Scalable NOMA multicast for SVC streams in cellular networks[J]. IEEE Transactions on Communications, 2018, 66(12): 6339-6352.
- [15] PARK Y D, JEON S, JEONG J P, et al. FlexVi: PHY aided flexible multicast for video streaming over IEEE 802.11 WLANs[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2020, 19(10): 2299-2315.
- [16] PARK Y D, JEONG S S, JEON S S, et al. FlexVi: PHY aided flexible multicast for video streaming over IEEE 802.11 WLANs[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2020, 19(10): 2299-2315.
- [17] SANDOVAL-CURMINA V, PARRA-MICHEL R, OROZCO-LUGO A G. Multi-round transmission protocol with multipacket reception for multirate IEEE802. 11 WLANs[C]//Proceedings of 2015 IEEE Military Communications Conference. Piscataway: IEEE Press, 2015: 79-84.
- [18] NUNOME T, MIZUTANI K. The joint effect of wireless LAN reliable groupcast and a rate-adaptation mechanism on QoE of audio and video transmission[C]//Proceedings of 2019 26th International Conference on Telecommunications (ICT). Piscataway: IEEE Press, 2019: 149-153.
- [19] SANTOS M A, VILLALON J, OROZCO-BARBOSA L. A novel QoE-aware multicast mechanism for video communications over IEEE 802.11 WLANs[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2012, 30(7): 1205-1214.
- [20] HA V N, KADDOUM G, POITAUG. Joint radio resource management and link adaptation for multicasting 802.11ax-based WLAN systems[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2021, 20(9): 6122-6138.

- [21] ZHENG D, GE W Y, ZHANG J S. Distributed opportunistic scheduling for ad hoc networks with random access: an optimal stopping approach[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2009, 55(1): 205-222.
- [22] ZHANG Y J. Multi-round contention in wireless LANs with multi-packet reception[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2010, 9(4): 1503-1513.
- [23] TAN S S, ZHENG D, ZHANG J S, et al. Distributed opportunistic scheduling for ad-hoc communications under delay constraints[C]//2010 Proceedings IEEE INFOCOM. Piscataway: IEEE Press, 2010: 1-9.
- [24] GONG X W, CHANDRASHEKHAR T P S, ZHANG J S, et al. Opportunistic cooperative networking: to relay or not to relay? [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2012, 30(2): 307-314.
- [25] ZHANG Z, JIANG H. Distributed opportunistic channel access in wireless relay networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2012, 30(9): 1675-1683.
- [26] ZHANG Z, JIANG H, TAN P, et al. Channel exploration and exploitation with imperfect spectrum sensing in cognitive radio networks[J]. Selected Areas in Communications, IEEE Journal on, 2013, 31(3):429-441.
- [27] KUO W C, WANG C C. Robust and optimal opportunistic scheduling for downlink two-flow network coding with varying channel quality and rate adaptation[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2017, 25(1): 465-479.
- [28] IEEE 802.11 WG, part 11. Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specification IEEE STD. 2012.6178212[S]. 2012
- [29] PERAHIA E, STACEY R. Next generation wireless LANs[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2008.
- [30] KIM D M, KIM S L. An iterative algorithm for optimal carrier sensing threshold in random CSMA/CA wireless networks[J]. IEEE Communications Letters, 2013, 17(11): 2076-2079.
- [31] FERGUSONS. Optimal stopp/and applications[EB]. 2006.

[作者简介]



王一竹（1997-），女，军事科学院博士生，主要研究方向为分布式网络协议设计等。



张周（1986-），男，博士，军事科学院副研究员，主要研究方向为分布式机会信道接入和认知无线电网络等。



马丕明（1970-），女，博士，山东大学信息科学与工程学院副教授，主要研究方向为低密度奇偶校验码、无线物理层安全以及无线通信中的资源分配和优化等。



任保全（1974-），男，军事科学院系统工程研究院高级工程师，主要研究方向为军事通信网络技术。