

无线多跳网络结合功率控制的物理载波侦听分析模型*

陈沫^{1,2+}, 李忠诚¹, 毕经平¹

¹(中国科学院 计算技术研究所, 北京 100190)

²(中国科学院 研究生院, 北京 100049)

Analytical Model for Physical Carrier Sensing with Power Control in Multi-Hop Wireless Networks

CHEN Mo^{1,2+}, LI Zhong-Cheng¹, BI Jing-Ping¹

¹(Institute of Computing Technology, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

²(Graduate University, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

+ Corresponding author: E-mail: chenmo@ict.ac.cn

Chen M, Li ZC, Bi JP. Analytical model for physical carrier sensing with power control in multi-hop wireless networks. *Journal of Software*, 2009,20(12):3179–3192. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3401.htm>

Abstract: The choice of physical carrier sensing threshold affects the performance of the MAC (medium access control) layer protocol in multi-hop wireless networks. Previous research ignored the impact of the collisions correlated by ack frame and cumulative interference in determining the optimal carrier sensing range, and the collisions caused by hidden terminal were exaggerated to some extent. This paper presents a new analytical model to get the optimal carrier sensing threshold and transmit power while maximizing the network aggregate throughput. Through analyzing the cumulative interference in the network based on the carrier sensing threshold and transmit power, the channel rate and the number of the concurrent transmissions can be concluded. Additionally, four types of collision happened inside of the carrier sensing range and two types of collision contributed by the accumulative interference are proposed in this paper. Then, the channel activities can be modeled as a Markov chain that reflect the collision referred to above and the channel utilization by this Markov chain model is figured out. This paper investigates the impacts of the carrier sensing threshold and transmit power on the network aggregate throughput that determined by the channel capacity, channel utilization and the concurrent transmissions. Different from previous research, this research identifies the optimal carrier sense range without considering the collision from acknowledgement packet, accumulative interference and hidden terminals. The analysis proves that the aggregate throughput can suffer a loss, if the collision from acknowledgement packet and accumulative interference is not taken into account in determining the optimal carrier sensing range.

Key words: physical carrier sensing; power control; interference; SINR (signal interference noise ratio); Markov chain

摘要: 载波侦听阈值的选取对无线多跳网络 MAC 层的协议性能有着重要影响. 已有研究中忽略了确认报文、

* Supported by National Natural Science Foundation of China under Grant No.60803138 (国家自然科学基金)

Received 2007-10-12; Accepted 2008-05-19

累积干扰在不同的载波侦听阈值下对系统性能的影响,并在分析中夸大了隐藏节点所导致的信道冲突.针对上述问题,提出了一种结合功率控制的物理载波侦听分析模型.该模型以网络整体性能为优化目标,对全网的累积干扰与空间复用度进行分析,给出节点的平均信道容量.此外,对信道状态建立马尔可夫链模型,提出了4类载波侦听范围内发生的信道冲突以及两类全网累积干扰所引发的信道冲突.分析上述各类冲突对信道利用率的影响,并结合节点的平均信道容量给出优化的载波侦听阈值以及传输功率.与已有研究相比,模型中明确分析确认报文、累积干扰以及隐藏节点对信道冲突的影响.分析结果表明,如果不考虑上诉因素将无法获得最优的载波侦听范围,并且会导致网络性能下降.

关键词: 物理载波侦听;功率控制;干扰;信号干扰噪声比;马尔可夫链

中图法分类号: TP393 **文献标识码:** A

无线自组网是一种无中心自组织的无线网络,该网络不依赖预设的基础设施,节点利用无线收发装置交互信息,当节点不在彼此的通信覆盖范围内时,借助其他节点中继转发数据分组来实现多跳通信,所以也称为无线多跳网络.无线自组网具有部署方便以及低成本的特点,在军用和民用领域都有着广泛的应用,无线传感器网络以及无线网状网便是其中的典型.

在无线自组网中,媒体访问控制协议对系统性能有着重要影响,它决定了信道资源的利用效率以及报文冲突的概率.IEEE 802.11 是目前无线自组网研究领域主流的 MAC 层协议标准,该标准基于载波侦听多路复用/冲突避免(CSMA/CA)实现分布式环境下信道资源的访问.IEEE 802.11 采用了载波侦听作为资源预留的方式,它提供了物理载波侦听和虚拟载波侦听两类机制.物理载波侦听在 IEEE 802.11 标准中被强制要求,任何无线终端在发送数据前,首先侦听信道是否被占用,如果信道忙,无线终端将推迟访问以避免冲突.物理载波侦听的原理是在无线信道中监听射频能量级别来判断信道资源是否空闲,通常在物理层实现该机制.虚拟载波侦听机制是利用 RTS/CTS 控制报文来告知发送端、接收端各自传输范围内的节点推迟发送以进行冲突避免.该机制的设计目标是避免隐藏节点问题,不过由于只在传输范围内进行冲突避免,导致接收端更易受到并发流所带来的信号干扰.此外,采用虚拟载波侦听机制,有时会抑制周围节点数据传输,加剧了暴露节点问题.与虚拟载波侦听相比,物理载波侦听中的载波侦听范围大于传输范围,使其更易规避信号干扰问题,同时协议开销也更低.然而,采用物理载波侦听将合理地设定载波侦听阈值的问题,如载波侦听范围过大会导致系统空间复用的下降,过低会使得干扰加强、信道冲突增加.优化地选取载波侦听范围,主要是在系统空间复用与信道冲突之间达成平衡,以保证系统性能的最优.

与物理载波侦听类似,传输功率控制也是一种对 MAC 层性能有着重要影响的机制.传输功率的高低,直接反映了信道资源竞争以及系统空间复用的状况.当无线终端的传输功率较低时,其传输范围内的节点数量将会减少,信道竞争也会随之降低.而且,传输功率的下降还会使接收端的抗干扰能力也下降.此外,端到端的转发跳数也因传输范围的变小而增加,导致了单个报文的冲突概率更高.当无线终端的传输功率较高时,有利于接收端的数据接收,但负面效应是系统空间复用下降,同时,并发流之间的信号干扰也随之加剧.

近年来,已有大量研究工作致力于分析物理载波侦听阈值、传输功率控制对系统空间复用以及网络性能的影响.文献[1,2]对网络中的干扰及冲突建模,研究了如何选取优化的传输功率以保证网络性能最大化,且能量消耗最小.文献[3-5]研究了如何调整载波侦听范围以保证一跳内吞吐量最优,与此同时,考虑了在报文冲突与系统空间复用之间如何取得折衷.文献[6]提出了MAC层协议开销对选取优化的载波侦听阈值的影响,如果在分析中忽略MAC层协议开销,那么所得出的载波侦听范围会导致网络性能下降.由上述工作可以发现,调整载波侦听范围或传输功率都会影响网络内信道冲突的概率以及空间复用的程度,一些最新的研究表明了联合考虑物理载波侦听以及传输功率将有助于进一步提升网络性能.文献[7]研究了在多速率环境下,传输功率、信号干扰噪声比、节点拓扑等因素对载波侦听范围选取的影响.文献[8]分析了载波侦听阈值、传输功率以及信道速率三者之间的关联,表明了系统空间复用由传输功率与载波侦听阈值的比值唯一确定.文献[9]扩展了Bianchi以及Kumar等人^[10,11]提出的信道分析模型,以此为基础研究了传输功率与载波侦听阈值对网络容量的影响,并从中

发现如发送端载波侦听范围覆盖接收端的干扰范围,那么系统将获得较高的性能。

已有的研究表明,传输功率、MAC层协议开销、数据发送速率等因素影响了优化的载波侦听阈值选取,但还存在下列问题:文献[2,5,9]在针对载波侦听范围所建立的信道分析模型中,忽略了确认报文对信道冲突的影响;IEEE 802.11 标准中规定发送确认报文无须检测信道状态,因而存在报文冲突的可能.如果因冲突而导致该确认报文不能顺利接收,将使得本次传输以失败告终,一旦该冲突始终存在,会引起发送端反复地重传数据,该问题也称为接收端阻断问题^[12].此外,文献[3-9]将传输期间的信道冲突大多归结于发送端载波侦听范围之外、接收端干扰范围之内内的节点(称为隐藏节点)所为,没有考虑接收端干扰范围外多个并发流的信号叠加所形成的干扰冲突;同时,这些研究认为任意一个隐藏节点都有发送数据的可能,然而以网络整体性能为优化目标时,为了提高系统的空间复用,接收端的周围必然会存在尽可能多的并发流,这些数据流所占用的信道若与接收端的干扰范围存在交叠区域,那么该区域内的隐藏节点将不会发起通信请求。

针对上述问题,本文提出了一种结合物理载波侦听机制以及功率控制的分析模型,该模型以网络整体性能为优化目标,研究了确认报文、隐藏节点以及累积干扰等因素对载波侦听阈值、传输功率选取的影响.在分析过程中,通过对全网的累积干扰与空间复用度进行分析,给出了节点的平均信道容量.此外,我们对信道的访问行为以及信道状态进行分析,建立 5 个状态的马尔可夫链模型,并提出了 4 类载波侦听范围内发生的信道冲突以及两类全网累积干扰所引发的信道冲突.通过分析上述各类冲突对信道利用率的影响,并结合节点的平均信道容量,给出优化的载波侦听阈值以及传输功率.依据上述模型得出的分析结果表明:1) 存在优化的载波侦听范围与传输范围的比值使得节点平均吞吐量最优,同时若选择较低传输功率将获得更高的系统性能;2) 确认报文所导致的冲突在不同的载波侦听范围下对网络性能的影响不同;3) 全网累积干扰造成的信道冲突主要由第 1 层干扰节点决定;4) 已有研究认为,任意的隐藏节点都将导致信道冲突,依此得到的载波侦听范围不是最优且使得信道利用率下降 15%左右。

1 分析模型的基础

1.1 无线信道模型

在无线环境下信号传播容易受到路径损耗、多径衰落以及信号干扰等因素的影响.在一个开放式的环境下,无线信号传输主要受制于路径损耗,它通常被估计为通信距离的权值.对于典型的路径损耗模型,接收端的平均信号强度可以表示为以下函数形式:

$$P_{rx} = \frac{G \cdot P_{tx}}{R^\theta} \quad (1)$$

式(1)中的 P_{tx} 和 P_{rx} 分别表示发送端的传输功率以及接收端的传输功率, G 表示信号增益, R 表示发送端与接收端之间的距离, θ 代表路径损耗指数,该常量的取值范围是 2~6 之间的整数.路径损耗指数的选择是依据传播媒体的外部条件及发送端与接收端之间的距离大小。

1.2 信道介入协议

目前与无线多跳网络相关的研究大都基于 IEEE 802.11 标准作为其默认的信道介入协议.分布式协调功能(distributed coordinated function,简称 DCF)是 802.11 协议 MAC 层的基础,其原理是基于载波侦听多路访问冲突避免(CSMA/CA)机制,并辅以二进制退避算法(binary exponential backoff,简称 BEB)来解决碰撞冲突.一个节点在发送帧之前要先检测信道,确定是否有其他节点正在发送,如果信道空闲,等待 DIFS(distributed inter frame space)时间后才能发送.如果信道忙,该节点将会推迟到当前的传输结束后才进行尝试发送.为了保证通信的可靠性,IEEE 802.11 采用了反馈确认报文 ACK 的办法来通知源节点发送是否成功,而源节点如果在 SIFS(short inter frame space)时间内没有收到 ACK,那么将认为冲突发生,开始重传并依据 BEB 更新竞争窗口。

1.3 传输范围、载波侦听范围以及干扰范围的定义

在分析节点的干扰情况之前,我们首先明确传输范围、载波侦听范围以及干扰范围的定义。

1) 传输范围(transmission range).在没有任何干扰的情形下,接收端无法从发送端正确接收报文的最远距离称为节点的传输范围.该范围由发送功率、信道的衰减特性以及 SINR 阈值决定.

2) 载波侦听范围(carrier sensing range).节点的载波侦听范围与其载波侦听阈值以及周围节点的传输功率有关.节点 A 发起通信请求,它会依据其载波侦听阈值来判断信道状态,如存在一个节点其发送功率到达节点 A 的能量超过了节点 A 的载波侦听阈值,那么节点 A 认为信道被占用.所有该类节点的集合,称为节点 A 的载波侦听节点集.该集合内任意节点发送数据,节点 A 都会认为信道被占用.因此,如果采用载波侦听范围的定义,那么隐含着所有节点发送功率一致的假定.

3) 干扰范围(interference range).节点的干扰范围是特定于其接收状态而言的.一个节点正接收数据,如其干扰范围内有其他节点发起数据连接,那么会导致该接收节点信道冲突.例如,节点 A 与其传输范围内的节点 B 已建立数据连接,此时存在节点 C (位于节点 A 的载波侦听范围外)与其他节点开始建立连接,如果节点 C 发出的信号到达节点 B 的能量影响了其数据接收(节点 B 的 SINR 低于阈值要求),则称节点 C 是节点 B 的干扰节点.所有类似节点 C 的集合称为节点 B 的干扰集.根据上述描述,节点 B 的干扰范围和节点 A 、节点 B 之间距离、节点 C 的发送功率有关.因此,当所有节点发送功率一致并且与对应接收端之间距离确定时,才能得出节点的干扰范围.

2 累积干扰分析

一般意义下,无线终端双方成功地完成数据接收要求满足以下条件:1) 接收端须处于发送端的传输范围,这意味着接收端收到的信号功率必须不小于接收端敏感度(receive sensitivity).在给定射频硬件以及传输功率的前提下,接收端敏感度主要受数据传输速率决定;2) 发送端的信号功率到达接收端的时候,其接收信号的强度必须保证接收端能够克服周围噪音、同频信号干扰等因素影响.这里,我们通过信号噪声干扰比参数(signal to interference and noise ratio,简称 SINR)来刻画该条件,具体如下:

$$SINR = \frac{G \cdot P_{rx}}{N + \Sigma I} \geq SINR_{min} \quad (2)$$

式(2)中的 P_{rx} 代表发送端的信号到达接收端时的强度, ΣI 代表了其余并发流的信号到达接收端所产生的干扰, N 代表背景噪声, $SINR_{min}$ 描述了接收端成功完成本次数据接收所需的最低 SINR 阈值,该阈值与数据传输速率相关.

依据式(2),在给定传输功率以及发送端与接收端之间距离的前提下,精确地刻画网络中干扰情况将有助于分析网络整体性能.为了分析接收端的干扰情况,我们扩展常用的 Honey-grid 模型^[13].该模型主要应用于无线多跳网络下的干扰分析.如图 1(a)所示,在 Honey-grid 模型中,以一个传输节点为中心,所有剩余节点以其为中心呈蜂窝状分布,这里的每一层称为环,其半径用 d 来表示.在图 1(a)中,节点 0 在进行数据传输时,其载波侦听范围 D 之内的节点不会对该传输形成干扰,此时,第 1 层的干扰恰好位于距离节点 0 为 $D+\epsilon$ 的位置.在最坏的情形下,第 1 层会有 6 个节点(节点 1~节点 6)呈蜂窝状对节点 0 构成干扰,同时,这 6 个节点所覆盖的区域内不会有其他节点对节点 0 形成干扰.依此方法,可以继续分析节点 1 到节点 6 覆盖区域之外的干扰情况.最坏情形如图 1(b)所示,以节点 0 为中心、距离节点 0 为 $2(D+\epsilon)$ 的位置有 2×6 个干扰节点,距离节点 0 为 $i(D+\epsilon)$ 的位置有 $i \times 6$ 个干扰节点.

现在给出在整个网络中一对通信节点(发送端 tx 、接收端 rx)最坏情形下的干扰分析.假设所有节点的传输功率为 P_{tx} ,传输范围为 R ,载波侦听范围为 D .依据 Honey-grid 模型,最坏情形下,所有干扰节点将以发送节点 tx 为中心、距离为 $D, 2D, \dots, iD, \dots$ 的环状分布,这里规定距离发送端 tx 为 iD 的传输节点为 tx 的第 i 层干扰节点.首先分析第 1 层节点对于接收端 rx 的干扰.如图 2 所示,第 1 层共有 6 个干扰节点,当这些干扰节点进行数据传输时在接收端 rx 产生的干扰是:对于发送数据报文阶段,接收端干扰最大的情形如图 2(a)所示;对于发送确认报文阶段,接收端干扰最大情形如图 2(b)所示.因此,第 1 层干扰节点对接收端 rx 的最大干扰为

$$Interference_{rx,1\text{-tier}} = q_{a,data} \cdot G \cdot P_{data} \cdot R_{sr} \cdot \frac{L_{data}}{L_{data} + L_{ack}} + q_{a,ack} \cdot G \cdot P_{ack} \cdot R_{rr} \cdot \frac{L_{ack}}{L_{data} + L_{ack}} \quad (3)$$

式(3)中,

$$R_{sr} = (D-R)^{-\theta} + (D+R)^{-\theta} + 2((\sqrt{3}D/2)^2 + (D/2+R)^2)^{-\frac{\theta}{2}} + 2((\sqrt{3}D/2)^2 + (D/2-R)^2)^{-\frac{\theta}{2}},$$

$$R_{rr} = (D-2R)^{-\theta} + D^{-\theta} + 2(\sqrt{(\sqrt{3}D/2)^2 + (D/2+R)^2} - R)^{-\theta} + 2(\sqrt{(\sqrt{3}D/2)^2 + (D/2-R)^2} - R)^{-\theta}.$$

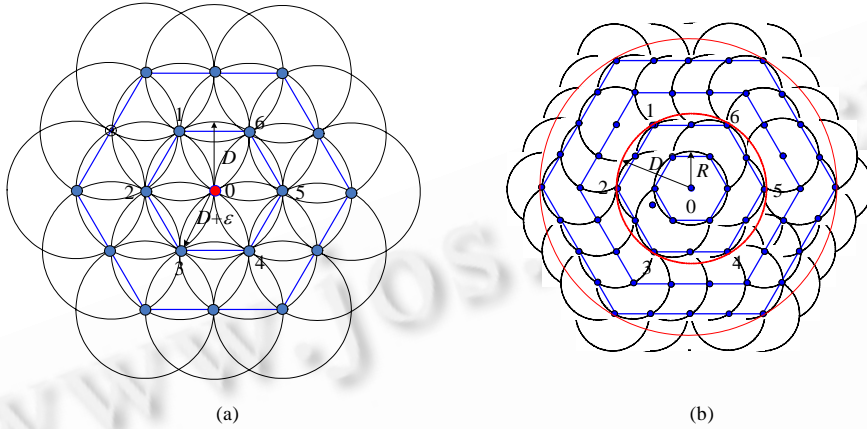


Fig.1 Honey-Grid interference model

图 1 Honey-Grid 干扰模型

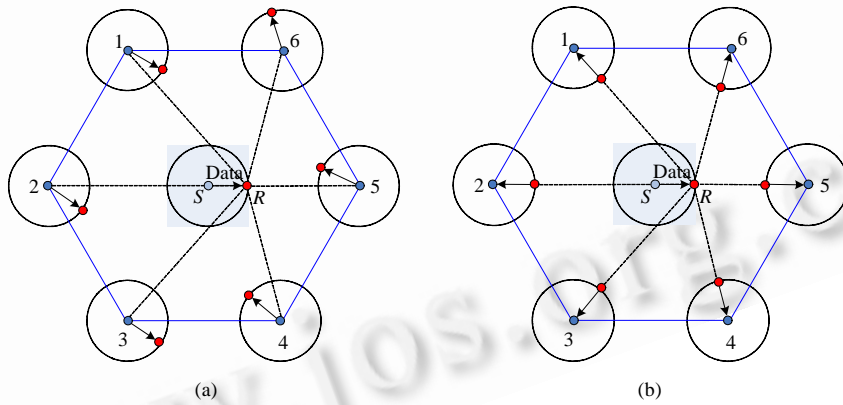


Fig.2 Worst-Case interference from 1-tier nodes

图 2 第 1 层节点产生的最大干扰

已有一些研究^[14]表明,发送端tx的第1层干扰节点所产生的干扰强度与其他各个层次节点产生的干扰强度处于同一量级.因此,第2层以及更高层的干扰可近似计算如下:

$$Interference_{rx,i\text{-tier}} \approx q_{a,data} \cdot G \cdot P_{data} \cdot (i \cdot d)^{-\theta} \cdot \frac{L_{data}}{L_{data} + L_{ack}} + q_{a,ack} \cdot G \cdot P_{ack} \cdot (i \cdot d)^{-\theta} \cdot \frac{L_{ack}}{L_{data} + L_{ack}} \quad (4)$$

$$Interference_{rx} \approx Interference_{rx,1\text{-tier}} + \sum_2^{\infty} 6i \cdot Interference_{rx,i\text{-tier}} = q \cdot X \quad (5)$$

根据式(2)、式(5),我们根据 Shannon 定理容易得出每个节点的可用信道速率.其中,W表示信道带宽.

$$Z = W \cdot \log_2 \frac{G \cdot P_{tx} \cdot r^{-\theta}}{Interference_{rx} + N} \quad (6)$$

3 结合功率控制的载波侦听分析模型

3.1 载波侦听范围内信道冲突分析

衡量网络的吞吐量,除了获得节点信道速率外,还需计算信道利用率,即节点有效的发送时间,它是指节点在一个传输周期内,除去信道访问冲突等因素下,成功进行数据传输的时间比例.为此,我们首先分析基于IEEE 802.11 DCF的无线多跳网络中信道冲突的各类场景.分析前给出下列定义: IN_{rx} 表示接收端的干扰范围, CS_{tx} 表示发送端的载波侦听范围, IN_{tx} 表示发送端的干扰范围, CS_{rx} 表示接收端的载波侦听范围.

数据的成功传输包括两个阶段:第1阶段是发送端 tx 向接收端 rx 发送数据(DATA)报文;第2阶段是发送端 tx 向接收端 rx 接收确认(ACK)报文.为了简化问题,现有研究通常只考虑了数据发送阶段的信道冲突情况.然而,基于下列两方面的原因,我们认为不能忽略确认报文接收阶段的信道冲突情况:首先,IEEE 802.11 标准上规定,当接收端顺利接收到数据报文,在等待 SIFS 时间后,无论信道是否忙或空闲,立即回复确认报文,如果在发送端与接收端载波侦听共同覆盖范围之外 ($CS_{tx} \cap CS_{rx}$),有节点发送数据会导致信道冲突,下文会给出具体分析.其次,虽然确认报文的长度远小于数据报文,但是如果发生确认报文丢失的情况,意味着即使接收端成功地接收到数据报文,发送端仍认为本次传输失败.因此,我们分别给出两个阶段的载波侦听范围内信道冲突情况.这里,将冲突场景分为4种基本情形,而实际发生的冲突通常是这4类基本情形的组合.

第1类是发送端 tx 的DATA报文与其他节点DATA报文之间的冲突(DATA-DATAs collision):发送端 tx 刚开始发送DATA报文,而位于 $CS_{tx} \cap IN_{rx}$ 的任意节点也同时发送DATA报文,在接收端 rx 产生冲突,如图3所示.

第2类是发送端 tx 的DATA报文与其他节点ACK报文之间的冲突(DATA-ACKs collision):发送端 tx 已处于DATA报文的发送阶段,其第1层干扰节点中任意一个节点开始接收ACK报文,如其对应的通信节点正处于 $CS_{tx} \cap IN_{rx}$,将会在接收端 rx 产生冲突,如图4所示.该冲突在发送端 tx 发送DATA报文期间均可能发生.

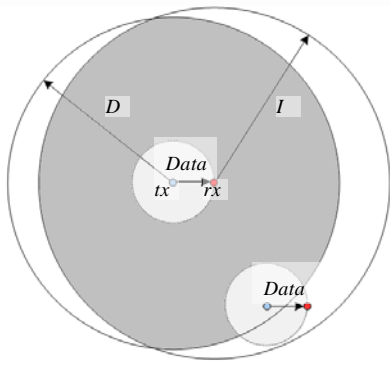


Fig.3 DATA-DATAs collision analysis

图3 DATA-DATAs 冲突分析

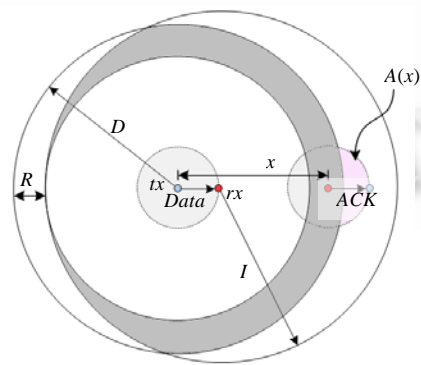


Fig.4 DATA-ACKs collision analysis

图4 DATA-ACKs 冲突分析

第3类是接收端 rx 的ACK报文与其他节点DATA报文之间的冲突(ACK-DATAs collision):发送端 tx 处于ACK报文接收阶段,如果位于 $CS_{rx} \cap IN_{tx} \cap \overline{CS_{tx}}$ 有节点开始发送DATA报文,将在发送端 tx 导致冲突,如图5所示.

第4类是接收端 rx 的ACK报文与其他节点ACK报文之间的冲突(ACK-ACKs collision):发送端 tx 正在接收ACK报文,其第1层干扰节点中对应的接收节点,如处于 $CS_{rx} \cap IN_{tx}$ 也会造成信道冲突,如图6所示.该事件在发送端 tx 接收ACK报文期间均可能发生.

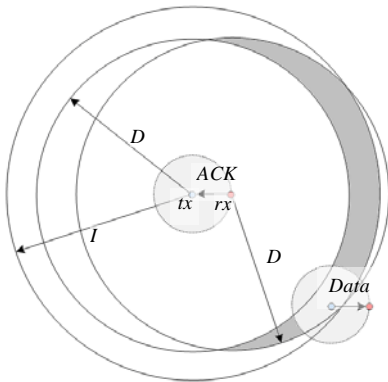


Fig.5 ACK-DATAs collision analysis
图 5 ACK-DATAs 冲突分析

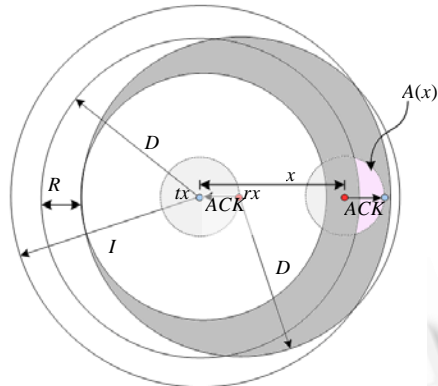


Fig.6 ACK-ACKs collision analysis
图 6 ACK-ACKs 冲突分析

3.2 基于马尔可夫链的分析模型

为了获得节点的成功发送时间,我们在发送节点 tx 的周围信道建立了一种 5 个状态的马尔可夫模型.该马尔可夫模型基于 IEEE 802.11 DCF 并结合了载波侦听机制与功率控制,我们将在发送节点 tx 的载波侦听范围内分析其周围信道状态.如图 7 所示,该马尔可夫模型包括以下 5 个状态,各个状态的具体含义如下:

状态 Idle 表示发送节点 tx 周围的信道空闲,即发送节点 tx 与其传输范围内的任意节点没有通信,同时,tx 载波侦听范围内的节点也没有数据传输.该状态的持续时间为一个时钟周期, $T_i = \sigma$.

状态 Succ 表示发送节点 tx 成功地完成了一次数据传输过程.这意味着在整个传输期间 T_s 内,发送节点 tx 在载波侦听范围内没有信道冲突发生,同时,本次数据传输也没有受到信号干扰的影响.由于该马尔可夫模型基于 IEEE 802.11 DCF 机制,那么一个完成的数据传输周期包括起始的 DIFS 信道等待时间,数据报文、确认报文的传输时间以及数据报文和确认报文之间的 SIFS 信道等待时间.即

$$T_s = T_{phy_hdr} + (L_{Mac_hdr} + L_{data}) / v + DIFS + SIFS + T_{phy_hdr} + L_{ack} / v,$$

其中, T_{phy_hdr} 表示物理层头部的传输时间, v 表示节点的传输速率.

状态 Data-col 表示发送节点 tx 在发送 DATA 报文阶段,接收节点 rx 因载波侦听范围内信道冲突或干扰等因素导致数据接收失败.该状态的持续时间为 $T_d = T_{phy_hdr} + (L_{Mac_hdr} + L_{data}) / v + DIFS + SIFS$.

状态 Ack-col 表示发送节点 tx 顺利完成 DATA 报文发送后,没有正确收到接收节点 rx 返回的 ACK 报文.该状态的持续时间可以近似于一次完整的数据传输所需的时间,即

$$T_a = T_{phy_hdr} + (L_{Mac_hdr} + L_{data}) / v + DIFS + SIFS + T_{phy_hdr} + L_{ack} / v.$$

状态 Busy 表示发送节点 tx 周围的信道被其他数据传输占用,此刻发送节点 tx 将启动回退机制,推迟信道的访问直到周围的信道重新空闲.该状态的持续时间是

$$T_b = T_{phy_hdr} + (L_{Mac_hdr} + L_{data}) / v + DIFS + SIFS + T_{phy_hdr} + L_{ack} / v.$$

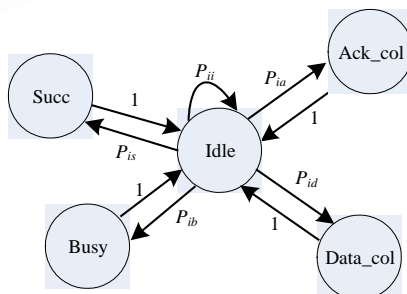


Fig.7 Wireless channel state transition diagram
图 7 无线信道状态迁移图

当信道处于空闲状态时,假设任意节点在下一个时间槽内的传输概率为 p ,已有研究证明了该传输概率只是协议相关的^[15,16].在每个时间槽是独立的情形下,依据Bianchi^[10]等人的针对 802.11 DCF建立的马尔可夫分析模型,在竞争窗口固定的情形下,对于处于饱和状态的节点(发送队列始终有数据发送),可以得到:

$$p = \frac{2}{CW + 1} \quad (7)$$

下面分析该马尔可夫模型下各个状态之间转移概率:

P_{ii} 表示状态Idle自身的转移概率.在当前时间槽内,发送节点 tx 的载波侦听范围内如果没有节点发送数据,且本身也没有发送请求的概率.可以得到:

$$P_{ii} = (1 - p)^{|CS_{tx}|+1} \quad (8)$$

式(8)中, $|CS_{tx}|$ 表示发送节点 tx 的载波侦听范围内节点数量.

P_{is} 表示从状态Idle到状态Succ之间的转移概率.发送节点 tx 成功完成整个数据传输过程,需要在发送周期(T_s)内满足以下两个条件:(1) 载波侦听范围内不发生上述 4 类冲突;(2) DATA,ACK报文的接收不存在“隐藏节点”的干扰影响.根据上述分析, P_{is} 表示为

$$P_{is} = P_1 \cdot P_2 \cdot P_3 \cdot P_4 \cdot P_5 \cdot P_6 \cdot P_7 \quad (9)$$

其中, $P_1 = \text{Prob.}\{\text{发送端 } tx \text{ 下一个时间槽开始发送DATA报文}\}$,

$P_2 = \text{Prob.}\{\text{发送端 } tx \text{ 开始发送DATA报文的那个时间槽内没有DATA-DATAs collision发生}\}$,

$P_3 = \text{Prob.}\{\text{发送端 } tx \text{ 发送DATA报文期间没有“隐藏节点”发送数据}\}$,

$P_4 = \text{Prob.}\{\text{发送端 } tx \text{ 发送DATA报文期间没有DATA-ACKs collision发生}\}$,

$P_5 = \text{Prob.}\{\text{发送端 } tx \text{ 开始接收ACK报文的那个时间槽内没有ACK-DATAs collision发生}\}$,

$P_6 = \text{Prob.}\{\text{发送端 } tx \text{ 接收ACK报文期间没有ACK-ACKs collision发生}\}$,

$P_7 = \text{Prob.}\{\text{发送端 } tx \text{ 接收ACK报文期间没有“隐藏节点”发送数据}\}$.

容易得到式(9)中 $P_1 = p$.此外, P_2 代表没有DATA-DATAs collision发生的概率,这说明在 $CS_{tx} \cap IN_{rx}$ 内没有节点发起数据传输,因此有 $P_2 = (1 - p)^{|CS_{tx} \cap IN_{rx}|}$.

P_3 表示在发送端 tx 发送DATA报文期间内没有“隐藏节点”发送数据的概率.通常定义的隐藏节点是指位于 CS_{tx} 之外且在 IN_{rx} 之内的节点,该区域内的任意节点尝试发送数据,其干扰会导致接收端 rx 报文冲突.我们知道,位于 IN_{rx} 之外的一些节点独自发送将不会对接收端 rx 构成影响,但是多个节点同时发送所形成干扰叠加同样会造成接收端 rx 数据接收失败.因此,本文将该类节点都称为“隐藏节点”.已有研究的分析模型中,在发送端 tx 发送DATA报文期间只考虑了接收端干扰范围内的隐藏节点问题.这里,我们分析了来自全网的干扰叠加对接收端 rx 的影响.经分析可以得到 P_3 为

$$P_3 = \left\{ \sum_{j=0}^n \Gamma_j \cdot p^j (1-p)^{n-j} \right\}^{\frac{L_{data}/v}{\sigma}} \quad (10)$$

其中, n 表示最大的干扰节点数量,它等价于网络中最大并发流的数量. $S_j = \{I_{ixn}^j \mid I_{ixn}^j \cdot F_{nx1} \leq G \cdot P / SINR_{\min} - N\}$,它表示 n 个可并发传输的节点中只有 j 个节点发送,且其叠加的干扰对接收端 rx 不构成影响的组合. $\Gamma_j = |S_j|$ 表示 S_j 中所有可行解的数量,其中, I_{ixn}^j 是 0/1 矩阵, j 代表 I_{ixn}^j 中 1 的个数.此外, $F_{nx1} = (F(1) F(2) \dots F(n))^T$,代表最坏情形下的干扰序列,其中:第 1 层距离发送端 tx 为 D 共 6 个节点,有 $F(1)=F(2)=\dots=F(6)=G \cdot P_{tx} \cdot D^{-\theta}$;距离 iD 共 $i \times 6$ 个节点,有 $F(3i \cdot (i-1)+1)=F(3i \cdot (i-1)+2)=\dots=F(3i \cdot (i-1)+6i)=G \cdot P_{tx} \cdot (iD)^{-\theta}$,所以有

$$F(x) = G \cdot P_{tx} \cdot \left(\left[1 + \sqrt{1 + 4(x-1)/3} \right] / 2 \right) \cdot D^{-\theta}.$$

P_4 表示发送端 tx 发送数据报文期间没有DATA-ACKs collision的概率.计算 P_4 之前,首先分析哪类节点发送ACK报文会与发送端 tx 的DATA报文冲突.如某个接收端产生的ACK报文和发送端 tx 的DATA报文冲突,那么这些接收端只能位于 $CS_{tx} \cap IN_{rx}$ 区域,并且这些接收端对应的发送端必须处于 CS_{tx} 之外,因为发送端 tx 已占

用了其载波侦听范围内的信道资源.所以,导致DATA-ACKs collision的接收端须位于区域 $U_{\pi(D^2-(D-R)^2)} \cap CS_{tx} \cap IN_{rx}$ 之中,如图 4 中灰色区域所示.其中, $\eta = |U_{\pi(D^2-(D-R)^2)} \cap CS_{tx} \cap IN_{rx}|$ 表示该区域节点数量, $U_{\pi(D^2-(D-R)^2)}$ 表示距离发送端 tx 半径为 $D-R$ 到 D 的圆环.这里设定位于 $U_{\pi(D^2-(D-R)^2)} \cap CS_{tx} \cap IN_{rx}$ 的接收端向其对应发送端回复ACK报文的概率为 Φ .由于并发流之间都需要保持载波侦听范围(D)的距离,因此导致DATA-ACKs collision的节点数量不超过 6 个.依据上述分析, P_4 为

$$P_4 = \left\{ 1 - \sum_{i=1}^6 C_{\eta}^i \cdot \Phi^i \cdot (1-\Phi)^{\eta-i} \right\}^{\frac{L_{data}/v}{\sigma}} \quad (11)$$

式(11)中, $\Phi = P(A) \cdot P(B)$, $P(A)$ 表示某接收端导致了 DATA-ACKs collision, 其对应的发送端处于 ACK 报文接收阶段的概率.可以得到 $P(A) = \pi_a + \pi_s \cdot L_{ack} / (L_{data} + SIFS \cdot v + L_{ack})$, 其中, π_a, π_s 分别表示状态Ack-col, Succ稳定态时的概率.此外, $P(B)$ 表示了接收端位于区域 $U_{\pi(D^2-(D-R)^2)} \cap CS_{tx} \cap IN_{rx}$, 对应的发送端位于 CS_{tx} 之外的概率, 我们假设导致 DATA-ACKs collision 的接收端与发送端 tx 距离为 x , 可以得到:

$$P(B|x) = A(x) / \pi R^2,$$

其中, $A(x) = \int_{D-x}^R 2 \left(\pi - \arccos \left(\frac{x^2 + y^2 - D^2}{2xy} \right) \right) y dy$, $A(x)$ 表示图 4 中的阴影区域.因此, $P(B)$ 表示如下:

$$P(B) = \int_{D-R}^D \frac{A(x)}{\pi R^2} \cdot \frac{2\pi x}{\pi D^2 - \pi(D-R)^2} dx.$$

P_5 表示没有ACK-DATAs collision的概率, 即表示在 $CS_{rx} \cap IN_{tx} \cap \overline{CS_{tx}}$ 区域内没有节点发送DATA报文, 所以有

$$P_5 = (1-p)^{|CS_{rx} \cap IN_{tx} \cap \overline{CS_{tx}}|} \quad (12)$$

P_6 表示在接收端 rx 发送ACK报文期间, 没有ACK-ACKs collision的概率. ACK-ACKs collision包括两个部分: 1) 在接收端 rx 刚开始发送 ACK 报文时, 图 6 中灰色区域 $\overline{Y_{\pi(D-R)^2}} \cap CS_{rx} \cap IN_{tx}$ 若存在一个接收端恰好开始向其发送端回复 ACK 报文, 那么将会导致冲突发生, 该灰色区域的节点数量为 $\gamma = |\overline{Y_{\pi(D-R)^2}} \cap CS_{rx} \cap IN_{tx}|$, 其中 $Y_{\pi(D-R)^2}$ 表示以发送端 tx 为圆心半径为 $D-R$ 的圆形区域. 这里设定位于 $\overline{Y_{\pi(D-R)^2}} \cap CS_{rx} \cap IN_{tx}$ 的接收端向其对应发送端回复ACK报文的概率为 Ψ ; 2) 在接收端 rx 发送ACK报文期间, 存在一些并发流, 其发送端在 CS_{rx} 之外, 接收端在 $CS_{rx} \cap IN_{tx}$ 之内, 如该类接收端发送ACK报文将产生冲突, 该冲突概率类似于DATA-ACKs collision的计算方法. 依据上述分析, P_6 为

$$P_6 = \left\{ 1 - \sum_{i=1}^6 C_{\gamma}^i \cdot \Psi^i \cdot (1-\Psi)^{\gamma-i} \right\} \cdot \left\{ 1 - \sum_{i=1}^6 C_{\eta}^i \cdot \Phi^i \cdot (1-\Phi)^{\eta-i} \right\}^{\frac{L_{ack}/v}{\sigma}} \quad (13)$$

式(13)中, $\Psi = P(A) \cdot P(C)$, $P(C)$ 表示了接收端位于区域 $\overline{Y_{\pi(D-R)^2}} \cap CS_{rx} \cap IN_{tx}$, 对应的发送端位于 CS_{tx} 之外的概率, 可以得到:

$$P(C) = P(B) + \int_D^{D+R} \frac{A(x)}{\pi R^2} \cdot \frac{2\pi x}{\pi(D+R)^2 - \pi D^2} dx,$$

其中, $A(x) = \begin{cases} \int_{D-x}^R 2 \left(\pi - \arccos \left(\frac{x^2 + y^2 - D^2}{2xy} \right) \right) y dy, & x < D \\ \int_0^{x-D} 2\pi y dy + \int_{x-D}^R 2 \left(\pi - \arccos \left(\frac{x^2 + y^2 - D^2}{2xy} \right) \right) y dy, & x \geq D \end{cases}$, $A(x)$ 表示图 6 中阴影区域.

P_7 表示在发送端 tx 接收ACK报文期间内没有“隐藏节点”发送数据的概率. 类似于 P_3 , 可以得到:

$$P_7 = \left\{ \sum_{j=0}^n \Gamma_j \cdot p^j (1-p)^{n-j} \right\}^{\frac{L_{ack}/v}{\sigma}} \tag{14}$$

根据上述分析, P_{is} 表示如下:

$$P_{is} = p \cdot (1-p)^{|CS_{tx} \cap IN_{rx}| + |CS_{rx} \cap IN_{tx} \cap \overline{CS_{rx}}|} \cdot \left\{ \sum_{j=0}^n \Gamma_j \cdot p^j (1-p)^{n-j} \right\}^{\frac{L_{data} + SIFS + L_{ack}}{\sigma \cdot v}} \cdot \left\{ 1 - \sum_{i=1}^6 C_{\eta}^i \cdot \Phi^i \cdot (1-\Phi)^{\eta-i} \right\}^{\frac{L_{data} + L_{ack}}{\sigma \cdot v}} \cdot \left(1 - \sum_{i=1}^6 C_{\gamma}^i \cdot \Psi^i \cdot (1-\Psi)^{\gamma-i} \right) \tag{15}$$

P_{id} 代表了从状态Idle到状态Data_col的转移概率.该概率表明了发送节点tx发送数据报文期间发生冲突的概率,这里指的冲突包括以下3类:DATA-DATAs Collision, DATA-ACKs Collision以及隐藏节点问题.

$$P_{id} = p \cdot \left\{ 1 - (1-p)^{|CS_{tx} \cap IN_{rx}|} \cdot \left\{ \sum_{j=0}^n \Gamma_j \cdot p^j (1-p)^{n-j} \right\}^{\frac{L_{data}}{\sigma}} \cdot \left\{ 1 - \sum_{i=1}^6 C_{\eta}^i \cdot \Phi^i \cdot (1-\Phi)^{\eta-i} \right\}^{\frac{L_{data}}{\sigma}} \right\} \tag{16}$$

P_{ib} 代表了从状态Idle到状态Busy的转移概率.该状态表明了发送节点tx的载波侦听范围内有其他节点正在进行数据传输,可以得到:

$$P_{ib} = (1-p) \cdot \{1 - (1-p)^{|CS_{tx}|}\} \tag{17}$$

P_{ia} 代表了从状态Idle到状态Ack_col的转移概率,有

$$P_{ia} = 1 - P_{ii} - P_{is} - P_{id} - P_{ib} \tag{18}$$

$\pi_i, \pi_s, \pi_d, \pi_a, \pi_b$ 分别表示Idle状态、Succ状态、Data_col状态、Ack_col状态和Busy状态的稳定态概率.根据图7我们可以得到 $\pi_i P_{ii} + \pi_s + \pi_d + \pi_a + \pi_b = \pi_i$,据此可以得到各稳定态概率.

$$\pi_i = \frac{1}{2 - P_{ii}}, \pi_s = \frac{P_{is}}{2 - P_{ii}}, \pi_d = \frac{P_{id}}{2 - P_{ii}}, \pi_a = \frac{P_{ia}}{2 - P_{ii}}, \pi_b = \frac{P_{ib}}{2 - P_{ii}}.$$

因此,数据成功传输时间占整体时间的比例如下:

$$\chi_s = \frac{\pi_s \cdot L_{data}/v}{T_{total_time}} = \frac{\pi_s \cdot L_{data}/v}{\pi_i \cdot T_i + \pi_s \cdot T_s + \pi_d \cdot T_d + \pi_a \cdot T_a + \pi_b \cdot T_b} \tag{19}$$

4 数值分析

基于上述模型,我们分析节点的物理载波侦听范围、传输功率在不同的网络参数下如何影响网络性能.在数值分析中所使用的网络参数见表1,各类参数都是遵从IEEE 802.11协议规范并符合典型的配置要求.此外,本节还将分析网络节点密度、竞争窗口大小等参数与物理载波侦听机制、传输功率之间的关系,以及它们对网络性能的影响.

Table 1 Network parameters used in analysis

表 1 分析中所使用的网络参数

Parameter	Symbol	Value
Data transmission rate	v	1Mbps
Transmission time of PHY header	T_{phy_hdr}	192μs
Mac header length	L_{mac_hdr}	240bits
Data length	L_{data}	128bytes or 1024bytes
Ack length	L_{ack}	112bits
Slot time	σ	20us
SIFS	$SIFS$	10us
DIFS	$DIFS$	50us
Processing gain	G	10.4dB
Path loss factor	θ	3
Contention window	CW	128,512 or 1024
SINR threshold	$SINR_{min}$	11dB
Radius of the ring	D	30m

无线信道的空间复用性使得网络中可以存在多个并发数据流,且彼此间互不冲突.因此,网络的吞吐量可以认为是网络中所有并发流的吞吐量之和.在这里,我们用参数 μ 表示与并发流数量相关的参数,其具体含义是代表网络中并发传输节点占网络整体的比例.分析所使用网络拓扑是基于 Honey-Grid 模型,规模为 $k=40$ 个环.该拓扑环境下,可以得到

$$\mu = \frac{\left\lfloor \frac{k}{d} \right\rfloor \sum_{j=1}^{\left\lfloor \frac{k}{d} \right\rfloor} 6j}{1 + \sum_{j=1}^k 6j} \approx \frac{1}{(mX)^2} \quad (20)$$

其中,参数 $m=R/d$ 表示网络密度大小.据式(6)、式(20),可以得到网络每个节点的平均信道速率为

$$\text{ChannelRatePerNode} = \frac{W}{(mX)^2} \cdot \log_2 \left(\frac{G \cdot P_{rx} \cdot r^{-\theta}}{\text{Interference}_{rx} + N} \right) \quad (21)$$

已知节点的平均信道速率以及成功传输时间(相当于信道利用率),可以得到网络中节点的平均吞吐量为

$$\text{ThroughputPerNode} = \mu \cdot Z \cdot \chi_s \quad (22)$$

图 8(a)给出了不同载波侦听范围下节点的平均信道速率,其中,不同曲线表示不同的节点密度.结果表明,在传输功率给定的前提下,存在优化的载波侦听范围,使得节点的平均信道速率最优.当载波侦听范围过小时,接收端与干扰节点之间的距离也就越短,虽然此时系统并发流更多,使得此时信号干扰问题成为影响节点信道速率的主要因素;而当载波侦听范围过高时,从局部看数据流的信息速率较高,但牺牲了系统的空间复用性,导致平均的信道速率仍然下降.图 8(a)中显示,优化的载波侦听范围位于 $3R \sim 3.5R$ 之间,这是由于,当 D 大于干扰范围(等于 $2.33R$)时,干扰得到明显降低,同时,网络仍保留较高数量的并发流.从图 8(a)中我们可以发现,节点密度越高,节点的平均信道速率越低,这是由并发流的数量下降所导致的.

图 8(b)给出了不同载波侦听范围下节点成功传输时间的变化趋势.节点成功传输时间可以反映信道冲突对信道利用率的影响.根据式(19),节点的成功传输时间主要由 $\pi_i, \pi_s, T_{total_time}$ 决定.从图 8(b)可以看到,随着载波侦听范围 D 从 $2R$ 增加到 $2.5R$,节点成功传输时间因 π_s 的增加有着较大的提高,而导致 π_s 的提高主要由于以下两类因素:1) 由于发送端 tx 的载波侦听范围完全覆盖了自身的干扰范围 ($CS_{rx} = 2.5R > IN_{rx} = 2.33R$),意味着 $|CS_{rx} \cap IN_{rx} \cap \overline{CS}_{rx}| = \emptyset$, 所以 ACK-DATAs collision 概率 $(1-P_3)$ 下降为 0; 2) 随着 D 增加到 $2.5R$, 由隐藏节点所导致的信号干扰下降了很多,即公式(9)中的 P_3, P_7 值增加, P_3, P_7 中权值较高,所以对 P_s 影响较大,使得 π_s 得到较高增加,且节点的成功传输时间接近了最优值.因此我们可以发现,累积干扰造成的信道冲突对系统性能的影响主要由第 1 层干扰节点决定.依据数值结果可以发现,因素 1) 对系统性能的提高达 35% 左右.载波侦听范围从 $2.5R$ 到 $4.33R$ 的变化过程中,当 $D > 3.33R$ 时,发送端 tx 的载波侦听范围覆盖了接收端的干扰范围,即 $P_2 = (1-p)^{IN_{rx}}$ 与 D 变化无关;当 D 分别大于 $3.5R, 4.33R$ 时, ACK-ACKs collision $(1-P_6)$, DATA-ACKs collision $(1-P_4)$ 概率为 0.而当载波侦听范围大于 $4.33R$ 后, π_s 基本不变.据式(19),此时节点的成功传输时间主要受 T_{total_time} 影响.随着载波侦听范围 D 增加, π_i 下降同时 π_b 增加,使得 T_{total_time} 缓慢升高.因此,依据上述分析,从图 8(b)中可以发现,载波侦听范围在达到最优值前主要受 π_s 支配,而到达最优值之后随着 T_{total_time} 的升高而缓慢下降.随着节点密度的提高,节点的成功传输时间与节点的平均速率呈同样的下降趋势,这是由于单位节点密度提高导致各类信道冲突概率增高.

图 8(c)给出了不同载波侦听范围下节点的平均吞吐量.与节点的平均信道速率相比,节点的平均吞吐量考虑了信道冲突的影响(结合了节点的成功传输时间),所以该指标更能体现网络实际性能.比较图 8(a)与图 8(c),节点的平均吞吐量在 $D=3R$ 附近最优,而节点的平均信道速率在 $D=3.5R$ 附近时最优.这是因为当 D 从 $3R$ 增加到 $3.5R$ 时, DATA-DATAs collision 概率增加,导致了节点成功传输时间的下降.受此影响,节点的平均吞吐量呈下降趋势.

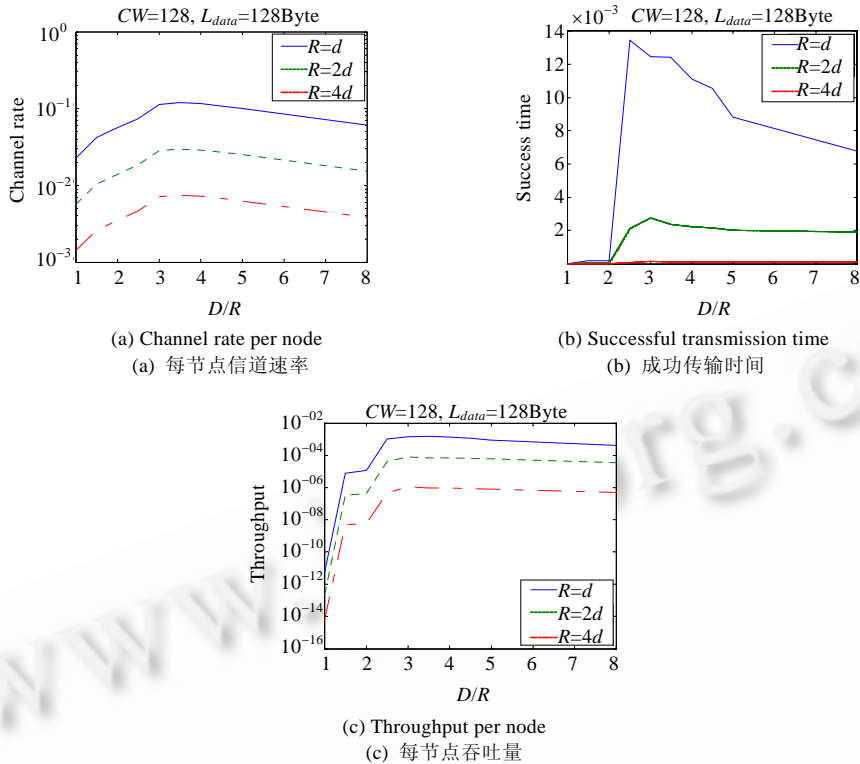


Fig.8 Carrier sensing range effect on network performance

图 8 载波侦听范围对网络性能的影响

图 9 给出了不同传输功率下节点的平均吞吐量,其中,不同曲线表示不同的节点密度.根据式(21),节点传输距离的增加会导致节点的平均信道速率下降.此外,节点传输距离的增加使得载波侦听区域内的冲突几率更高,同时,传输功率的提高加大了信号干扰,最终降低节点的成功传输时间.因此,随着传输距离的增加,节点的平均吞吐量逐渐下降.根据该结论我们认为,在保持网络连通性的前提下选择低的传输功率将有助于提高网络性能.

图 10 给出了竞争窗口的大小对节点平均吞吐量的影响.从式(7)可以发现,竞争窗口越小则节点发送概率越高,使得各类冲突的概率增加.因此,当载波侦听范围较小时,竞争窗口越小,节点的平均吞吐量越低.而当载波侦听范围较高时, π_s 主要由式(15)中 $p \cdot (1-p)^{|CS_{rx} \cap IN_{rx}|}$ 影响,此时, $1-p$ 的因子 $|CS_{rx} \cap IN_{rx}|$ 变动很小.容易发现,随着 p 越小, $p \cdot (1-p)^{|CS_{rx} \cap IN_{rx}|}$ 也随之降低.因此,在载波侦听范围较大时,竞争窗口越大,节点的平均吞吐量越低.如图 10 所示,如果在系统中选择了最优的载波侦听范围,那么将竞争窗口设置较大有利于提高系统的吞吐量.

已有研究工作的分析模型通常只考虑两类冲突:一类是发送端 tx 开始发送数据报文的那个时间槽内有 DATA-DATAs collision 发生;另一类是发送端 tx 发送数据报文期间没有隐藏节点发送数据.这里,隐藏节点是指位于 CS_{rx} 之外且在 IN_{rx} 之内的节点,该区域内的任意一个节点发送数据,会接收端 rx 导致冲突.图 11 给出了传统分析模型得出的优化载波侦听范围与本文的区别.传统分析模型得出的优化载波侦听范围大概在 $3.5R$ 附近,这与文献[9]提出的发送端载波侦听范围需覆盖接收端的干扰范围的条件相符.由图 11 中可以发现,实际上,吞吐量最高时载波侦听范围大概在 $3R$ 附近,而在 $3.5R$ 附近吞吐量反而开始下降.导致该差别的主要原因在于,传统分析模型认为任意的隐藏节点都有发送数据的可能,然而由于接收端的周围存在并发传输,这些传输所占用的信道与接收端干扰范围存在交叠区域,存在于该区域的隐藏节点将不会发起通信请求.这就导致了当 D 在 $3R$ 附近时,实际上 DATA-DATAs collision 以及隐藏节点的干扰所导致的冲突发生概率都很低, π_s 接近最优值,而该情形下的传统模型认为仍存在一些隐藏节点导致冲突,因而其 π_s 小于最优值.因此,如果载波侦听范围选择 $3.5R$,如图 11 所示,则系统性能将会下降 15% 左右.

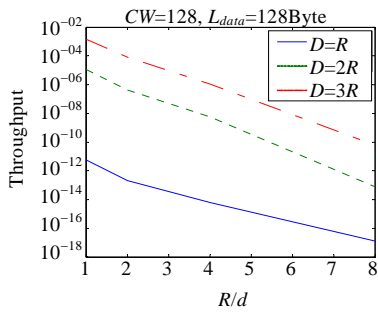


Fig.9 Transmission range effect on throughput per node

图 9 传输范围对节点平均吞吐量的影响

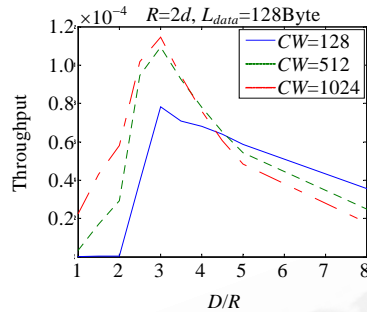


Fig.10 CW effect on throughput per node

图 10 竞争窗口对节点平均吞吐量的影响

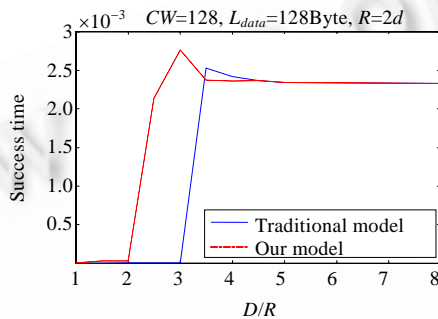


Fig.11 Difference of optimal CS range between the different analytical models

图 11 不同分析模型下优化载波侦听范围的区别

5 结 论

在无线多跳网络中,信号干扰以及空间复用是决定网络容量的两个主要因素.在信道接入协议中采用物理载波侦听机制,可以减少因干扰而引起的信道冲突,并有效利用了无线信道的空间复用性.此外,节点传输功率的大小也对信道资源竞争与系统空间复用有着直接的影响.本文提出了一种结合功率控制的物理载波侦听分析模型,区别于已有研究,该模型明确分析了确认报文、隐藏节点以及累积干扰对信道冲突的影响.该模型以节点的平均吞吐量为优化目标,而节点的平均吞吐量通常由信道容量、信道利用率以及并发流的数量决定.因此,分析中首先依据载波侦听阈值和传输功率对全网的累积干扰以及系统空间复用进行分析,给出节点的平均信道容量.此外,在信道利用率分析过程中,提出了 4 类载波侦听范围内的报文冲突以及两类全网累积干扰所引发的信道冲突,通过对信道状态建立马尔可夫链模型,分析上述各类冲突对信道利用率的影响.最后,根据节点平均信道容量以及信道利用率,理论上分析了载波侦听阈值以及传输功率如何决定网络性能.分析结果表明: 1) 存在优化的载波侦听范围与传输范围的比值(D/R)使得节点平均吞吐量最优,同时,如选择较低传输功率将获得更高的系统性能;2) 确认报文所导致的冲突在 D/R 小于最优值前对信道利用率影响达到 35%左右,当 D/R 大于最优值后影响程度逐渐下降;3) 全网累积干扰造成的信道冲突主要由第 1 层干扰节点决定;4) 若认为任意的隐藏节点都将导致信道冲突,分析得到的载波侦听范围不是最优且使得信道利用率下降 15%左右.

References:

[1] Gabriel S, Melhem R, Mosse D. A unified interference/collision analysis for power-aware ad hoc networks. In: Proc. of the IEEE INFORCOM 2004. 2004. 608-618.
 [2] Ding P, Holliday J, Celik A. Modeling the performance of a wireless node in multi-hop ad hoc networks. In: Proc. of the ICWNCMC 2005. 2005. 1424-1429.

- [3] Deng J, Liang B, Varshney PK. Tuning the carrier sensing range of IEEE 802.11 MAC. In: Proc. of the IEEE GLOBECOM 2004. 2004. 2987–2991.
- [4] Zhu H, Guo X, Yang LL, Conner WS. Leveraging spatial reuse in 802.11 mesh networks with enhanced physical carrier sensing. In: Proc. of the IEEE ICC 2004. 2004. 4004–4011.
- [5] Ma H, Alazemi HMK, Roy S. A stochastic model for optimizing physical carrier sensing and spatial reuse in wireless ad hoc networks. In: Proc. of the IEEE MASS 2005. 2005. 622–629.
- [6] Yang X, Vaidya NH. On the physical carrier sense in wireless ad hoc networks. In: Proc. of the IEEE INFOCOM 2005. 2005. 2525–2535.
- [7] Zhai H, Fang Y. Physical carrier sensing and spatial reuse in multirate and multihop wireless ad hoc networks. In: Proc. of the IEEE INFOCOM 2006. 2006. 1–12.
- [8] Kim TS, Lim H, Hou JC. Improving spatial reuse through tuning transmit power, carrier sense threshold, and data rate in multihop wireless networks. In: Proc. of the ACM MOBICOM 2006. 2006. 366–377.
- [9] Yang Y, Hou JC, Kung LC. Modeling of physical carrier sense in multihop wireless networks and its use in joint power control and carrier sense adjustment. In: Proc. of the IEEE INFOCOM 2007. 2007. 2331–2335.
- [10] Bianchi G. Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function. IEEE Journal of Select. Areas Communication, 2000,18(3).
- [11] Kumar A, Altman E, Miorandi D, Goyal M. New insights from a fixed point analysis of single cell IEEE 802.11 WLANs. In: Proc. of the IEEE INFOCOM 2005. 2005. 1550–1561.
- [12] Zhai H, Wang J, Fang Y. Ducha: A dual-channel MAC protocol for mobile ad hoc networks. IEEE Trans. on Wireless Communication, 2005. 3224–3233.
- [13] Hekmat R, Miegheem PV. Interference in wireless multihop ad hoc networks and its effect on network capacity. Wireless Networks, 2004,10:289–399.
- [14] Hajek B, Krishna A, Lammaire RO. On the capture probability for a large number of stations. IEEE Trans. on Communication, 1997,45(2):254–160.
- [15] Cali F, Conti M, Gregori E. Dynamic tuning of the IEEE 802.11 protocol to achieve a theoretical throughput limit. IEEE/ACM Trans. on Networking, 2000,8:785–799.
- [16] Wu L, Varshney P. Performance analysis of CSMA and BTMA protocols in multihop networks (I): Single channel case. Information Science, 1999,120:159–177.



陈沫(1981—),男,江苏盐城人,博士生,主要研究领域为无线自组网,下一代互联网协议。



毕经平(1974—),女,博士,副研究员,博士生导师,CCF 高级会员,主要研究领域为Internet 网络测量。



李忠诚(1962—),男,博士,研究员,博士生导师,CCF 高级会员,主要研究领域为计算机网络。