

一种 WLAN 信道传输干扰预测方法

柳毅 叶远航 凌捷

(广东工业大学计算机学院 广州 510006)

摘要 无线接入点(AP)在公有或私有区域的不合理规划部署容易导致基本服务集(BSS)相互重叠,增加信道干扰。在帧传输前,如何准确预测信道中潜在的干扰因素并采取应对策略,成为 WLAN 通信技术领域的研究热点。为此提出一种 WLAN 信道传输干扰预测方法,即在传输期间结合块确认帧实时采集并统计 A-MPDU 帧传输状态信息,计算干扰发生的概率,预测信道传输干扰因素并采取有效的应对策略。仿真结果表明,所提出的方法不仅能准确预测信道传输干扰因素,还能在多种拓扑环境下进一步利用网络带宽,提升帧传输效率。

关键词 信道干扰, A-MPDU, 块确认, WLAN

中图分类号 TP393.17 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2015.10.023

Transmission Interference Prediction Approach in WLAN Channel

LIU Yi YE Yuan-hang LING Jie

(School of Computer Science and Technology, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract Wireless access points which are not rationally planned and deployed in public or private area lead to overlap of basic service sets (BSS) and increase channel interference easily. Before frame transmission, how to accurately predict the channel potential interference factors and adopt coping strategy become a hotspot of WLAN communication technology. Therefore, a transmission interference prediction approach in WLAN channel was proposed. During transmission, the proposed approach captures and statistics A-MPDU frames transmission status information with B-ACK frames, then calculates the probability of interference occurs, at last predicts transmission interference factors and adopts coping strategy. Simulation results show that the proposed approach can not only effectively predict channel transmission interference factors, but also increase the use of network bandwidth and improve frame transmission efficiency in a variety of topological environment.

Keywords Channel interference, A-MPDU, B-ACK, WLAN

1 引言

IEEE 802.11 标准是当前 WLAN 市场一套低成本、高传输速率以及部署灵活的无线解决方案,大量短距离通信的无线设备都采用该标准。随着移动终端的迅速普及,无论是公有还是私有区域都可发现许多 AP。然而随着 AP 的密集度的增加,相邻 AP 的 BSS 重叠^[1]使得隐藏节点、碰撞、信号衰退等问题突出,严重影响了数据传输。IEEE 802.11n 提出一种 FLA 机制^[2],其能够根据当前信道的信号与干扰加噪声比(SINR)选择适当的速率保证帧的可靠传输,即能较好地权衡速率与可靠性之间的关系。然而研究结果表明^[1,3-7],FLA 机制虽能够较好地保证帧传输鲁棒性,但难以提供最佳的速率来适应信道环境,根本原因是 FLA 无法准确预测复杂多变的信道传输环境。

发送端能否准确预测信道传输干扰将影响其后的速率选择,进而影响整个网络性能。目前的做法大致分两类:开环方法与闭环方法。

开环方法根据是否成功收到 ACK 帧预测信道传输质量,较具代表性的是 ARF 方法^[3],但该方法的性能随着碰撞的增加下降明显,因为它忽略了碰撞导致的帧丢失。Choi J 等人针对 ARF 的缺陷,监测更多信道传输信息辅助测量,提出一种适应性门限(AT)方法^[1],其能够迅速调节速率参数获取更高的网络吞吐量。然而这类开环方法获取信道传输信息有限,始终无法更深入地识别信道干扰因素。另一类方法为闭环方法,即在接收端通过 B-ACK 帧携带更多信道信息反馈给发送端,以更加准确地判断信道环境,如 CARA^[4]、RRAA^[5]等。Ajay Kulkarni 等人监测信道竞争情况,预测信道传输质量,通过持续测量竞争节点的等待时间来评估信道竞争状况,提出一种 FREEZE 速率适应算法^[6]。相对于其它算法,它确实能在一定程度上提高网络吞吐量,但无法评估隐藏节点给信道传输造成的干扰。Ting-Yu Lin 等人通过持续观察 MAC 层的 BEB 参数和 CW 值,提出一种 EARC 的新型闭环方法^[7],以大量的实验数据总结出一张速率选择参照表。相对于其它速率适应算法,EARC 确实能在对称网络和非对

到稿日期:2014-10-08 返修日期:2015-01-14 本文受广东省自然科学基金重点项目(S2012020011071),广东省教育部产学研合作项目(2012B091000037,2012B091000041),广东省广州市科技计划项目(2013J4300058)资助。

柳毅(1976-),男,博士,副教授,CCF 会员,主要研究方向为网络与信息安全、云计算技术,E-mail:liuyi_xd@126.com;叶远航(1989-),男,硕士,主要研究方向为网络信息安全、无线网络;凌捷(1964-),男,博士,教授,主要研究方向为网络信息安全技术。

称网络环境下提高网络吞吐量,然而它没有依据干扰因素做速率决策。在一些复杂的异步干扰环境下,依据 EARC 的速率选择参照表无法进一步利用无线网络带宽,甚至会引起一定的性能下降。

由于接收端的辅助,闭环方法相对于开环方法不可避免地需要额外的控制开销,现今集成电路的运算速度的提升和成本的下降使得这些开销处于可接受范围内。因此,为了能够更加准确地预测影响信道传输的干扰因素,在已有的研究的基础上选择闭环方法,结合 B-ACK 帧实时采集并统计帧传输状态进行分析推理,提出一种 WLAN 信道传输干扰预测方法,以辅助发送端选择最佳策略传输帧。

2 802.11 协议特性

2.1 PHY 层

PHY 层采用正交频分复用(OFDM)技术^[2]传输数据帧。OFDM 将信道切割成多个正交子信道,然后将数据调制到子信道上并行传输,提升了信道利用率。802.11n 将频宽切割成 64 个子信道,其中 52 个用于数据传送,剩下的充当导波或空信号。结合各种调制技术和编码速率,形成多种调制编码方案(MCS),表 1 列出不同 MCS 下的详细参数信息。

表 1 IEEE 802.11n MCS (子载波带宽 20MHz,防护时间 800ns)

序号	调制技术	编码率	传输率 (Mb/s)	SINR 门限 (dB)	发送范围 (m)
1	BPSK	1/2	6.5	6.8	80
2	QPSK	1/2	13.0	7.9	76
3	QPSK	3/4	19.5	10.6	67
4	16QAM	1/2	26.0	13.0	60
5	16QAM	3/4	39.0	17.0	50
6	64QAM	2/3	52.0	21.8	40
7	64QAM	3/4	58.5	24.7	35
8	64QAM	5/6	65.0	28.1	30

根据天线模型,无线信道中的信号传播遵循对数路径损耗规律,路径损耗指数为 β ^[8],接收端离发送端的距离设为 r ,则接收端的增益 G 可表示为:

$$G(r) = k \frac{1}{r^\beta} \quad (1)$$

其中, k 为天线系数,与天线本身相关。假设所有节点的天线均一致,发送功率 P_t 相同,发送端的载波信号监听功率设为 P_o ,其相应的监听范围 r_o 通过下式计算得出:

$$r_o = \left(\frac{P_t}{P_o}\right)^{1/\beta} \quad (2)$$

在一般环境下,取 $P_t = 15\text{dBm}$, $\beta = 5$,假设 P_o 的监听功率为一 85dBm ,则其相应的监听范围约等于 100m 。用 γ 表示接收端处的 SINR,其定义如下:

$$\gamma = \frac{P_t G(r)}{\sum P_i G(r') + P_o} \quad (3)$$

P_o 表示非发送节点的噪声功率,根据经验 P_o 一般取为一 87dBm , r' 表示干扰发送端离接收端的距离。表 1 列出的每个 SINR 门限都有与之相应的发送范围,此处用 γ_i 和 r_i 表示每个 MCS 下的 SINR 门限和发送范围。它们之间的关系式如下:

$$r_i = \left(\frac{P_t}{\gamma_i P_o}\right)^{1/\beta} \quad (4)$$

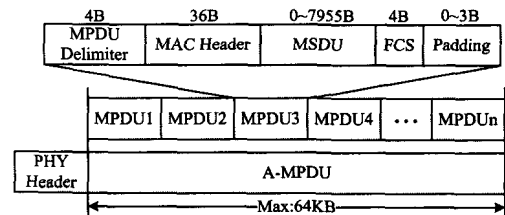
假设帧传输期间,接收端的 γ 高于当前 MCS 的 SINR 门限,接收端将以超过 95% 的概率成功解码数据帧。基于该前提条件,通过式(4)可计算出每个 MCS 下的发送范围 r_i 。

发送端通过调整自身的监听功率 P_o 。监听并尝试与接收端进行通信,接收端通过式(3)计算 γ ,从表 1 选出满足 $\gamma > \gamma_i$ 的最高速率 MCS 报告给发送端,发送端根据接收端的信息调整 MCS 传输随后的数据帧。利用这种快速链路自适应(FLA)机制,发送端可通过 γ 值预测信道条件,调整其传输速率。

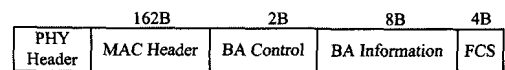
2.2 MAC 层

与 802.11a/b/g 采用一帧一确认的传输方式不同,802.11n 提出单帧分片(A-MPDU)技术^[9]以适应复杂的信道环境,提高帧传输效率。A-MPDU 帧聚合多个 MPDU 子帧,共享同一 PHY 头,图 1(a)所示为 A-MPDU 帧格式。除最后一个 MPDU 子帧,其余的 MPDU 子帧长度必须为 4B 的整数倍,通过 Padding 字段补足。每一子帧以 MPDU 界定符为前缀,包含 MPDU 子帧长度、循环冗余校验码(CRC)和子帧唯一识别码等。所有的 MPDU 子帧聚合在单一帧中,通过 PHY 头在物理层中传输,接收端通过 FCS 校验每个 MPDU 子帧,对未收到或受损的 MPDU 子帧报告重传。

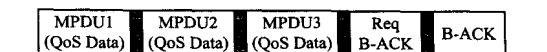
802.11e 协议^[10]详细规范无线网络服务质量 QoS 体系,其中包含块确认(B-ACK)机制。B-ACK 帧一般由硬件快速完成,能够对连续接收到的 QoS 数据帧进行一次性确认,有效减小协议开销,其帧格式如图 1(b)所示。B-ACK 帧的特性可以很好地与 A-MPDU 帧传输结合,图 1(c)是 MPDU 子帧发送示意图,发送端连续发送多个 QoS 数据(间隔时间为一个 SIFS),即 MPDU 子帧,接收端对接收到的 MPDU 子帧解码并进行 FCS 校验,一旦接收到发送端的 B-ACK 请求帧(Req B-ACK),马上响应 B-ACK 帧。接收端设置 B-ACK 帧中的 BA Information 字段确认已成功接收的 MPDU 子帧,此外还可附加 γ 信息,用于向发送端报告信道条件。发送端根据 B-ACK 帧中的信息,调整传输速率,选择性重传发送失败的 MPDU 子帧。



(a) A-MPDU 帧格式



(b) B-ACK 帧格式



(c) MPDU 子帧发送示意图

图 1 MAC 层帧格式

3 预测方法

802.11n 提供的 FLA 是从接收端的角度测量信道的 SINR,许多文献指出^[5-7,11,12]:碰撞、隐藏节点、噪声干扰以及信道的不对称等问题均不同程度地干扰帧传输。下面分析帧传输受到的干扰因素,推导信道传输干扰预测方法。

3.1 帧传输干扰

A-MPDU 帧传输结合帧聚合与块确认技术,正向链路传

输 PHY 头或 MPDU 子帧,反向链路传输 B-ACK 帧,将该闭环回路称为传输回路。图 2(a)所示为 3 种传输回路,对于 PHY 头传输,发送端接收 B-ACK 帧超时意味 PHY 头传输失败,图 2(a)中用实心 and 空心方形作为成功和失败的 PHY 头传输回路图例。对于 MPDU 子帧传输,图 2(a)中用实心圆形作为 MPDU 子帧传输回路图例,用灰色标识受损 MPDU 子帧。

节点传输帧前,包括监听信道、竞争信道、获取信道访问权、传输帧等过程。假设节点使用分布式协调功能(DCF)^[13]

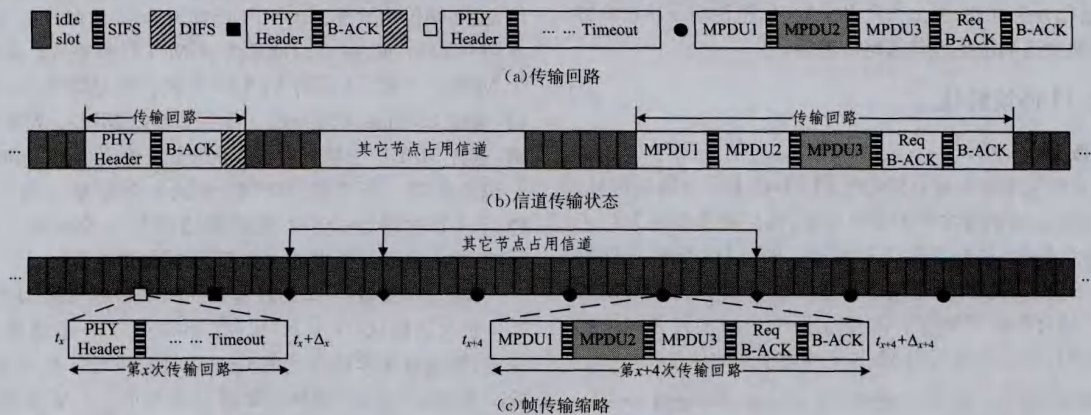


图 2 DCF 下的帧传输

帧从发送端经无线介质传输到接收端,可能受到的干扰因素繁多,有物理损伤和逻辑损伤。从帧传输时空的角度,可将干扰帧传输的因素分为以下 3 种。

1) 同步干扰:发送端的载波监听范围内有其它节点在同一时隙中启动数据传输造成帧传输失败,即碰撞。

2) 异步干扰:发送端的载波监听范围外有其他节点启动数据传输造成信道干扰,通常由隐藏节点引起。

3) 物理干扰:信道的背景噪声、衰减、多径效应等物理因素导致帧传输失败。

一般的网络拓扑环境中,同步干扰和异步干扰是导致帧传输失败的主因。随着无线拓扑结构中的节点数和数据包的变化,二者将不同程度地干扰帧传输。而物理干扰则是与信道介质环境相关的一类干扰,它对帧传输影响小且较为稳定。

在 A-MPDU 帧传输数据前,发送端需向接收端发送 PHY 头询问合适的 MCS。假设发送端用最低速率 MCS₁ (6.5Mb/s)向接收端发送 PHY 头以保证帧传输可靠性,接收端成功解码帧后马上回发 B-ACK 帧,报告接收状态及当前链路所合适的 MCS。发送端根据 B-ACK 帧的 MCS 信息,调整 MPDU 子帧的发送速率,接收端对连续收到的 MPDU 子帧进行块确认。因此有 PHY 头丢失和 MPDU 子帧丢失两种。根据 3 种干扰对帧丢失的影响,归纳出表 2。其中同步干扰总是会造成 A-MPDU 帧的 PHY 头丢失而非 MPDU 子帧丢失,因为发生同步干扰的节点总是在相同的时隙启动 A-MPDU 帧传输,导致 PHY 头碰撞。

表 2 帧传输干扰因素

干扰种类	丢失部分	帧丢失原因
同步干扰	PHY 头	监听范围内节点发生帧碰撞导致传输失败
异步干扰	PHY 头、MPDU 子帧	监听范围外节点传输数据干扰帧传输
物理干扰	PHY 头、MPDU 子帧	信道物理因素导致帧受损

传输帧,图 2(b)所示为在 DCF 下信道的帧传输状态。由于每个传输回路的开始和结束时间都在时隙的边界,可进一步抽象帧传输过程,如图 2(c)所示,其中的方形与圆形对应图 2(a)的图例,菱形表示其它节点占用信道。

设第 x 次传输回路的开始时间为 t_x 、回路所用时间为 Δ_x ,则其结束时间为 $t_x + \Delta_x$ 。由于 IEEE 802.11 采用 CS-MA/CA 机制,发送端易计算出每个传输回路的开始和结束时间。在图 2(c)中可清楚地看出每个传输回路的开始与结束时间、回路数量以及回路传输状态。

3.2 预测信道干扰

对于任一节点 i ,将其受到同步干扰、异步干扰和物理干扰影响而导致帧传输失败的概率分别表示为 P_i^{sym} 、 P_i^{asy} 、 P_i^{phy} 。考虑物理干扰对帧传输影响较小且稳定,为简化干扰预测方法,用定量值 ρ 表示概率 P_i^{phy} 。假设节点 i 监听范围内有 N_i 个其它发送节点,同时可能有其它发送节点在其监听范围外,下面利用帧传输状态信息,推导同步干扰和异步干扰预测方法。

A. 预测同步干扰

对于节点 i ,若在 N_i 个节点中至少有一个节点和节点 i 在同一时隙启动帧传输导致节点 i 帧传输失败,则认为节点 i 发生同步干扰。注意到并非所有在同一时隙传输的帧都会发生同步干扰,接收端仍可在 SINR 大于其门限的情况下解码帧,即捕获效应。该情况对同步干扰发生概率影响较小,而且随着节点增加接收端更难捕获帧,因此忽略其影响。

首先用 τ 表示节点的尝试发送概率。根据节点 i 监听范围内其它节点 j 的尝试发送概率 τ_j ,节点 i 的同步干扰发生概率 P_i^{sym} 可通过下式计算:

$$P_i^{sym} = 1 - \prod_{j=1}^{N_j} (1 - \theta_{i,j} \tau_j) - \rho \quad (5)$$

式中, $\theta_{i,j}$ 是节点 j 监听到信道是空闲的条件下,节点 i 也监听到信道是空闲的条件概率。若节点 j 和 i 的监听范围一致,则条件概率 $\theta_{i,j}$ 等于 1,然而一般情况下它们的监听范围是不同的, $\theta_{i,j}$ 通常小于 1。将节点 i 监听到信道空闲的概率表示为 P_i^{idle} ,可通过下式计算 P_i^{idle} :

$$P_i^{idle} = (1 - \tau_i) \prod_{j=1}^{N_j} (1 - \theta_{i,j} \tau_j) \quad (6)$$

节点间无信息交换的情况下,获取 $\theta_{i,j}$ 和 N_j 的值较为困难,然而通过式(5)和式(6)的关系,推导出关系式:

$$P_i^{sym} = 1 - \frac{P_i^{idle}}{1 - \tau_i} - \rho \quad (7)$$

同步干扰会导致 PHY 头丢失,由于节点采用 CSMA/CA 机制,依据图 2 所示的帧传输过程,可确定信道中时隙数量 I_i 、传输回路数量 T_i 以及信道忙碌时隙数量 B_i ,结合下式可估算 P_i^{idle} 和 τ_i 的值:

$$P_i^{idle} = 1 - \frac{B_i + T_i}{I_i}, \tau_i = \frac{T_i}{I_i} \quad (8)$$

至此结合式(7)和式(8)消去 $\theta_{i,j}$ 和 N_j ,推导出式(9):

$$P_i^{syn} = \frac{B_i}{I_i - T_i} - \rho \quad (9)$$

通过持续测量信道的 I_i 、 B_i 和 T_i ,可计算出同步干扰发生概率 P_i^{syn} 。最后,引入实际信道的低通滤波因子 λ ($0 < \lambda < 1$),平滑 P_i^{syn} 的值,降低偶然性的同步干扰影响,计算公式如下:

$$(1-\lambda) \cdot P_i^{syn} + \lambda \cdot \left(\frac{B_i}{I_i - T_i} - \rho \right) \rightarrow P_i^{syn} \quad (10)$$

节点 i 利用式(10)持续计算同步干扰发生概率 P_i^{syn} ,辅助其预测信道受同步干扰影响的程度。每次启动帧传输时,节点 i 更新式(10),当其检测到 PHY 头丢失时,比较 P_i^{syn} 是否超过某个确定门限 $\eta(syn)$,若是,发送节点认为当前信道受到同步干扰影响;若否,继续预测异步干扰影响情况。

B. 预测异步干扰

从表 2 得知,异步干扰不仅会导致 PHY 头丢失,还会导致 MPDU 子帧丢失。根据这两种丢失的统计信息,预测异步干扰发生概率 P_i^{asy} 。

首先将导致 PHY 头丢失的异步干扰发生概率表示为 $P_{i,PHY}^{asy}$,导致 MPDU 子帧丢失的异步干扰发生概率表示为 $P_{i,MPDU}^{asy}$ 。用 $P_{i,PHY}^{ack}$ 和 $P_{i,MPDU}^{ack}$ 表示 PHY 头或 MPDU 子帧对应的 B-ACK 帧成功接收的概率。假设节点 i 在没有同步干扰、异步干扰和物理干扰的情况下,可成功接收 B-ACK 帧,则 $P_{i,PHY}^{ack}$ 和 $P_{i,MPDU}^{ack}$ 可通过下式计算:

$$\begin{cases} P_{i,PHY}^{ack} = (1 - P_i^{syn})(1 - P_{i,PHY}^{asy})(1 - \rho) \\ P_{i,MPDU}^{ack} = (1 - P_{i,MPDU}^{asy})(1 - \rho) \end{cases} \quad (11)$$

由于同步干扰仅影响 PHY 头,不干扰 MPDU 子帧,因此在计算 $P_{i,MPDU}^{ack}$ 时排除 P_i^{syn} 的影响。首先计算 $P_{i,PHY}^{ack}$,继续利用帧传输状态的统计信息,设节点 i 共发送 $N_{i,PHY}$ 个 PHY 头,其中有 $N_{i,PHY}^s$ 个 PHY 头成功传输,则 $P_{i,PHY}^{ack}$ 可通过下式估算:

$$P_{i,PHY}^{ack} = \frac{N_{i,PHY}^s}{N_{i,PHY}} \quad (12)$$

将式(12)代入式(11),结合式(9)的同步干扰计算公式,可得 $P_{i,PHY}^{ack}$ 的推导公式:

$$P_{i,PHY}^{ack} = 1 - \frac{N_{i,PHY}^s}{N_{i,PHY}(1-\rho) \left[\frac{(I_i - T_i - B_i)}{(I_i - T_i)} + \rho \right]} \quad (13)$$

对于 $P_{i,MPDU}^{ack}$ 的估算,可以直接从与 MPDU 子帧对应的 B-ACK 帧获取 MPDU 子帧的发送情况,设节点 i 共发送 $N_{i,MPDU}$ 个 MPDU 子帧,其中有 $N_{i,MPDU}^s$ 个 MPDU 子帧成功发送,则 $P_{i,MPDU}^{ack}$ 可通过下式估算:

$$P_{i,MPDU}^{ack} = \frac{N_{i,MPDU}^s}{N_{i,MPDU}} \quad (14)$$

将式(14)代入式(11),可得 $P_{i,MPDU}^{asy}$ 的推导公式:

$$P_{i,MPDU}^{asy} = 1 - \frac{N_{i,MPDU}^s}{N_{i,MPDU}(1-\rho)} \quad (15)$$

$P_{i,PHY}^{asy}$ 和 $P_{i,MPDU}^{asy}$ 都表示异步干扰发生概率,通过二者之

间的影响因子 α 计算异步干扰概率 P_i^{asy} ,如下:

$$P_i^{asy} = (1-\alpha) \cdot P_{i,PHY}^{asy} + \alpha \cdot P_{i,MPDU}^{asy} \quad (16)$$

结合式(13)、式(15)和式(16)可计算出 P_i^{asy} ,最后同样通过低通滤波因子 λ ($0 < \lambda < 1$)平滑 P_i^{asy} 的值,降低偶然性异步干扰影响,如下:

$$(1-\lambda) \cdot P_i^{asy} + \lambda \cdot \left((1-\alpha) \cdot P_{i,PHY}^{asy} + \alpha \cdot P_{i,MPDU}^{asy} \right) \rightarrow P_i^{asy} \quad (17)$$

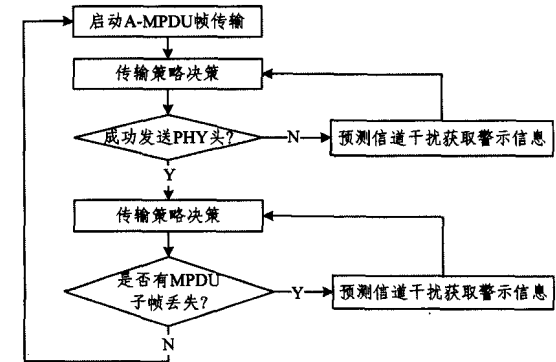
节点 i 持续监测帧传输状态信息和 B-ACK 帧的携带信息,利用式(17)计算出异步干扰发生概率 P_i^{asy} ,辅助预测当前信道的异步干扰影响程度。与同步干扰一样,设定异步干扰门限 $\eta(asy)$,若 P_i^{asy} 超过门限值 $\eta(asy)$,发送端认为当前信道受到异步干扰影响。发送端检测到异步干扰后,需要采取措施解决异步干扰问题,如使用 RTS/CTS 方式发送帧。

3.3 干扰应对策略

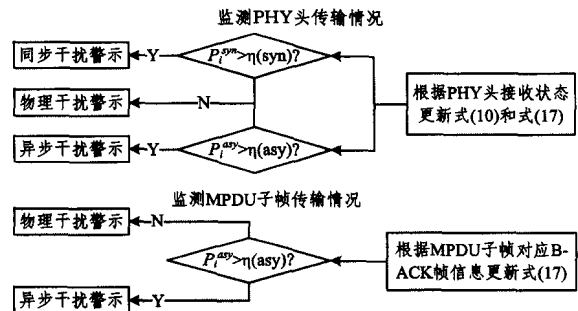
预测出传输干扰因素后,发送端马上做出应对策略以保证帧的可靠传输。根据干扰情况,分以下 4 种应对策略:

- 1) 无帧丢失:采用基本方式发送帧。
- 2) 同步干扰:增大竞争窗口 $CW = \min\{2(CW + 1), CW_{max}\}$ 。
- 3) 异步干扰:启动 RTS/CTS 方式发送帧。
- 4) 物理干扰:降低 MCS,增加信道的 SINR。

图 3(a)展示 A-MPDU 帧传输流程。发送端首先预测信道干扰情况,在未预测出干扰因素的情况下采用基本方式的传输帧。随后发送端尝试发送 PHY 头给接收端,同时发送端根据图 2(b)的干扰警示流程实时监测 PHY 头的发送情况,更新式(10)和式(17),计算出 P_i^{syn} 和 P_i^{asy} ,若其超过相应的门限 $\eta(syn)$ 和 $\eta(asy)$,马上做出相应的干扰警示。一旦 PHY 头发送失败,发送端根据警示选出合适的应对策略,重发 PHY 头。



(a) A-MPDU 帧传输流程



(b) 信道干扰警示流程

图 3 信道干扰预测方法

传输 MPDU 子帧时,选择与发送 PHY 头一致的策略进

行传输。发送端同样根据图 3(b)的干扰警示流程实时更新式(17),判断是否超过异步干扰门限值 $\eta(asyn)$,一旦从 B-ACK 帧中发现有 MPDU 子帧丢失,根据警示信息从 4 种策略中选择适当的策略发送丢失的 MPDU 子帧。

4 实验结果分析

为检验所提出的信道传输干扰预测方法(记为 FLA-IP),在实验环境下通过 NS2 工具^[14]仿真实现所提出的方法 FLA-IP。首先根据 802.11n 和 802.11e 的详细规范实现 PHY 层和 MAC 层,发送端依据表 1 提供的 MCS 选择发送速率,同时随机产生 TCP 或 UDP 协议数据包,保证发送端有数据帧发送。将异步干扰影响因子 α 设为 0.75,干扰门限参数 $\eta(syn)$ 和 $\eta(asyn)$ 设为 0.05 和 0.02,低通滤波参数 λ 定为 0.25,A-MPDU 帧长度控制在 1024B,MPDU 子帧数量 n 在 4~8 之间随机取值,物理干扰 ρ 设为 0.05,其它具体参数参照 802.11n 协议的详细规范。

4.1 干扰预测验证

首先,通过常见的无线拓扑结构验证 FLA-IP 能否有效预测信道干扰因素。图 4 所示为实验环境下的一个无线拓扑结构。实心圆与空心圆分别表示发送端与接收端,菱形表示其它节点。观察链路 L_1 中的 T_1 和 R_1 ,它们位于各自监听范围的重叠区域内。重叠区域内的其它节点发送数据会对链路 L_1 产生同步干扰,设置 T_1 与 R_1 的距离 d 为 55m。在 T_1 监听范围外且在 R_1 监听范围内,取一链路 L_2 ,其中 T_2 发送数据给 R_2 会对链路 L_1 产生异步干扰。

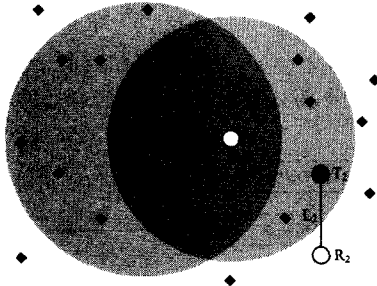


图 4 方法验证所使用的拓扑环境

A. 同步干扰验证

令图 4 中 T_1 和 R_1 监听范围重叠区域外的无线节点保持沉默,前 30s 只有 L_1 链路传输 A-MPDU 帧,后 30s 重叠区域内的其它节点开始传输 A-MPDU 帧,即在第 30s 开始链路 L_1 受到同步干扰影响。经过 60s 的模拟运行后,得到图 5 所示的 P_i^{syn} 统计结果。根据 FLA 机制和收发节点距离 d ,从图 5 中可知 T_1 能正确计算链路 SINR,使用 MCS₄ (26.0Mb/s) 发送帧。观察图 5,从 30s 开始 P_i^{syn} 值开始上升,超过 $\eta(syn)$ 后,发送端响应同步干扰警示,采用同步干扰策略,增大竞争窗口 CW 。

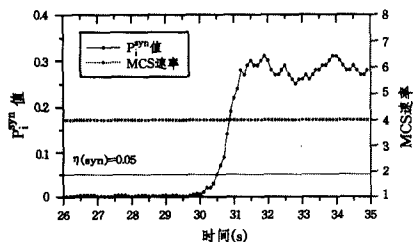


图 5 链路 L_1 同步干扰变化

B. 异步干扰验证

为验证能够有效预测异步干扰,令在 T_1 和 R_1 监听重叠范围外的节点启动帧传输,前 30s 只有链路 L_1 传输 A-MPDU 帧,后 30s 重叠区域外的节点开始传输 A-MPDU 帧,即在第 30s 开始,链路 L_1 开始受到异步干扰影响。经过 60s 的模拟运行后,得到图 6 所示的 P_i^{asy} 统计结果。观察 P_i^{asy} 曲线,从 30s 开始, P_i^{asy} 的值随着链路 L_1 受到异步干扰后开始上升,超过 $\eta(asyn)$ 后, T_1 开始执行异步干扰策略,采用 RTS/CTS 方式发送帧。

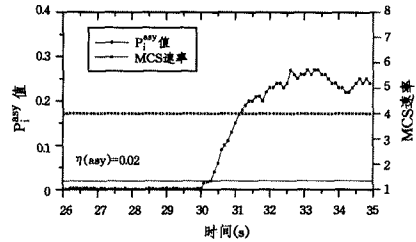


图 6 链路 L_1 异步干扰变化

4.2 吞吐量比较

传输干扰预测仿真结果表明 FLA-IP 能够有效预测无线信道的传输干扰类型,下面分析 FLA-IP 的网络吞吐量优劣。选取快速链路自适应方案(FLA)^[2]、基于 RTS/CTS 方式的快速链路自适应方案(FLA-R)^[2]以及文献[12]提出的基于丢失预警的速率自适应重传方案(LA-AMRR)与 FLA-IP 方案作对比,各方案概述如下。

- FLA:快速链路自适应方案是 802.11n 协议下的标准方案,它计算出当前信道的 SINR,选择最佳的 MCS 适应信道环境。FLA 利用帧聚合和块确认技术,相比之前协议的一帧一确认方式,有效改善了信道利用率低问题。

- FLA-R:FLA 在一定条件下能够提供较优的信道利用率,但在信道遇到异步干扰的情况下,网络吞吐量下降明显。RTS/CTS 方式^[7]是解决异步干扰问题的一种方法,当传输信道受到异步干扰影响时,FLA-R 能够有效改善 FLA 吞吐量较低的问题。

- LA-AMRR:文献[12]将帧丢失的原因分为信道丢失和非信道丢失两种,其推断依据是当前传输信道的短期信号强度变化趋势,识别出帧丢失原因后选择适合当前链路环境的速率参数,由此提出一种多速率自适应重传方案,进一步改善吞吐量。

- FLA-IP:持续检测信道传输状态信息,统计干扰发生概率,预测造成帧传输失败的干扰类型。一旦预测到干扰,马上响应相应的干扰预警,采取应对策略重传帧,提高帧传输的可靠性,进一步利用无线网络带宽。

为能合理比较上述方案的优劣,依据 802.11n 协议下的参数,在 NS2 软件中实现多种的网络场景,模拟运行各个方案,观察各个网络场景的吞吐量变化。各场景的无线网络拓扑如图 7 所示,其详细描述如下。

- 非对称链路:两条收发链路 $L_1(T_1-R_1)$ 、 $L_2(T_2-R_2)$ 位于同一条直线上,每个节点依次间隔 R ,随着 R 的变化,该场景会发生同步干扰和异步干扰。

- 星形网络:AP 位于网络中心,有 12 个节点均匀分布在以 AP 为中心、 R 为半径的圆周上,该场景也存在同步干扰和异步干扰。

• Ad hoc 网络: 在一个 $200\text{m} \times 200\text{m}$ 的区域内, 随机分布 15 条链路, 它们传输帧的概率随机。该网络存在复杂的同步干扰和异步干扰。

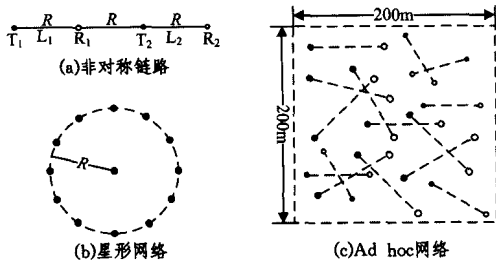


图 7 无线拓扑环境

首先观察非对称链路的运行结果, 图 8 和图 9 显示链路 L_1 和 L_2 的吞吐量变化, 它们的吞吐量均随着节点间隔 R 的增加而减少。当 R 增加到 30m 左右时, 根据表 1, 节点选择最高的 MCS₈ (65.0Mb/s) 速率发送帧。此时各个节点都在监听范围内, 比较图 9 和图 10 可知链路 L_2 的吞吐量比 L_1 更高, 这是由于同步干扰和捕获效应的影响, 使得 R_2 能够捕获帧, 而 R_1 受到同步干扰的影响接收失败。

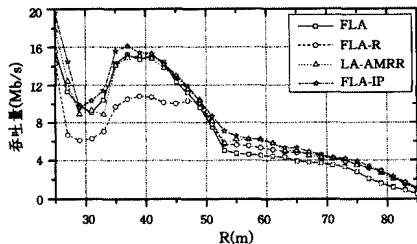


图 8 链路 L_1 吞吐量的变化

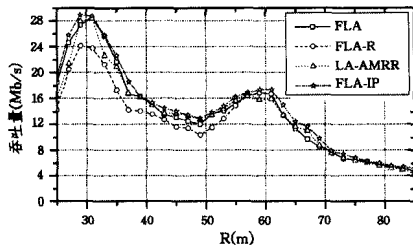


图 9 链路 L_2 吞吐量的变化

在 $45 < R < 60$ 处, 链路 L_2 的吞吐量明显增高, 而链路 L_1 则迅速下降。因为当 R 大于 45 时, T_2 在 T_1 的监听范围外, 所以链路 L_1 由于异步干扰使得吞吐量迅速下降, 而链路 L_2 的同步干扰影响降低且异步干扰影响较低, 因此获得更高的吞吐量。在 FLA 中, T_2 变为隐藏节点使得链路 L_2 不断发送帧。而在 FLA-R 中, 由于节点总是使用 RTS/CTS 方式发送帧, 因此在 $R < 45$ 时, FLA-R 的吞吐量较低, 受到异步干扰后 RTS/CTS 方式能够获得较优的吞吐量。继续观察 LA-AMRR, 在 $R > 45$ 时 LA-AMRR 并没有采用 RTS/CTS 方式发送帧, 而 FLA-IP 则识别出信道中存在异步干扰获得了较高的吞吐量。在 $R > 55$ 后, LA-AMRR 也成功启动 RTS/CTS 方式发送帧, 获得了较好的吞吐量。随着 R 的继续增加, 链路 L_1 和 L_2 的吞吐量逐渐降低。

图 10 是星形网络的吞吐量运行结果。从图中可清楚地观察到: 随着 R 增加, 它们的总吞吐量下降。由于基本访问方式和 RTS/CTS 方式的原因, 当 $R < 50$ 时, 协议开销使得 FLA-R 的总吞吐量低于 FLA; 而在 $R > 50$ 时, 异步干扰使得

FLA-R 的总吞吐量更高。

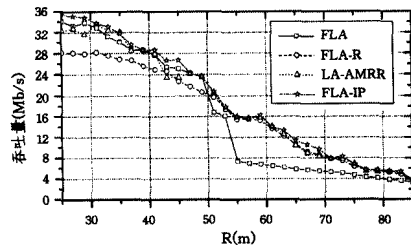


图 10 星形网络吞吐量变化

FLA-IP 获得的总吞吐量比 LA-AMRR 更高, 这是因为 FLA-IP 能较为正确地预测信道中同步干扰、异步干扰, 并采取适当的策略应对信道传输环境; 而 LA-AMRR 也成功识别到信道传输干扰, 但相比 FLA-IP, 其吞吐量有间歇性下滑, 说明 LA-AMRR 判断信道干扰情况不够准确。

继续分析在 Ad hoc 网络下的吞吐量比较。将 15 条链路进行 10 次随机分布模拟, 得出图 11 所示的吞吐量变化情况。比较 FLA 和 FLA-R 可知, 采用 RTS/CTS 方式在 Ad hoc 网络下传输帧不一定能够改善复杂信道传输质量, 有时还会因协议开销降低网络吞吐量。

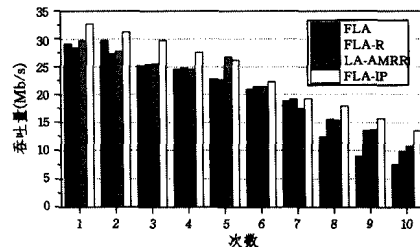


图 11 Ad hoc 网络吞吐量变化

从图 11 中可看出, LA-AMRR 对复杂信道传输质量改善明显, 但是在某些随机拓扑环境下出现一定的吞吐量下滑, 表明其在某些情况下难以判断信道干扰情况。FLA-IP 在 4 个方案中表现较好, 平均吞吐量分别比 FLA、FLA-R、LA-AMRR 高 18%、14%、9%, 说明 FLA-IP 能够在复杂信道传输环境下较为正确地预测信道传输干扰, 并采取有效策略应对。

对 4 种方案的吞吐量对比分析后, 依据各方案本身的复杂度以及仿真结果进一步归纳出表 3, 得出各方案的优劣情况。

表 3 各方案优劣的比较

方案	开销	干扰识别能力	链路自适应能力	总吞吐量
FLA	较低	一般	传输策略应变迟滞, 自适应能力一般	无干扰时较高, 其它情况较低
FLA-R	较高	一般	传输策略较单一, 自适应能力一般	异步干扰时较高, 其它情况较低
LA-AMRR	适中	良好, 但复杂网络误判偏高	传输策略多元, 自适应能力良好	总体较高, 但复杂网络环境下出现波动
FLA-IP	适中	较好, 总体误判较低	传输策略多元灵活, 自适应能力好	总体较高, 多种网络环境下性能表现较好

结束语 通过采集并统计 A-MPDU 帧的传输状态信息, 从干扰发生概率的角度提出一种 WLAN 信道传输干扰预测方法 (FLA-IP)。FLA-IP 利用 IEEE 802.11n 和 802.11e 中 FLA、帧聚合、块确认等特性, 能较好地预测 WLAN 信道传输干扰 (包括同步干扰和异步干扰), 并且采取有效策略应对各

种干扰。FLA-IP 不需要修改协议标准, 仅需增加底层软件模块即可实现干扰预测功能。仿真结果表明, FLA-IP 不仅可以有效预测信道传输干扰因素, 还能在多种拓扑环境下进一步利用网络带宽, 提升帧传输效率。

参考文献

[1] Choi J, Na J, Park K, et al. Adaptive Optimization of Rate Adaptation Algorithms in Multi-Rate WLANs[C]//ICNP. 2007;144-153

[2] Martorell G, Riera-Palou F, Femenias G. Tuning Fast Link Adaptation Algorithms for CSMA/CA- and CSMA/E2CA-Based WLANs[C]//2012 21st International Conference on Computer Communications and Networks (ICCCN). IEEE, 2012;1-7

[3] Kamerman A, Monteban L. WaveLAN®-II; a high-performance wireless LAN for the unlicensed band[J]. Bell Labs Technical Journal, 1997, 2(3):118-133

[4] Kim S, Verma L, Choi S, et al. Collision-aware rate adaptation in multi-rate WLANs; design and implementation[J]. Computer Networks, 2010, 54(17):3011-3030

[5] Wong S H Y, Yang H, Lu S, et al. Robust rate adaptation for 802.11 wireless networks[C]//Proceedings of the 12th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. ACM, 2006;146-157

[6] Kulkarni A, Menezes S, Prakash R. FREEZE; Rate adaptation in wireless LANs using channel contention estimates[J]. 2011 Third International Conference on Communication Systems and Networks (COMSNETS), 2011, 4(11):4-8

[7] Lin T Y, Tsai C Y, Wu K R. EARC: Enhanced Adaptation of Link Rate and Contention Window for IEEE 802.11 Multi-Rate

Wireless Networks[J]. IEEE Transactions on Communications, 2012, 60(9):2623-2634

[8] Mardeni R, Solahuddin Y. Path loss model development for indoor signal loss prediction at 2.4GHz 802.11 n network[C]//2012 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT). IEEE, 2012, 2:1-4

[9] Abu-Sharkh O M F, Abdelhadi M J. The impact of multi-rate operation on A-MSDU, A-MPDU and block acknowledgment in greenfield IEEE802.11n wireless LANs [C] // Wireless Advanced (WiAd), 2011. IEEE, 2011;116-121

[10] Politis A, Mavridis I, Manitsaris A, et al. X-EDCA; A cross-layer MAC-centric mechanism for efficient multimedia transmission in congested IEEE 802.11e infrastructure networks[C]//2011 7th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC). IEEE, 2011;1724-1730

[11] Schmidt F, Hithnawi A, Punal O, et al. A receiver-based 802.11 rate adaptation scheme with On-Demand Feedback[C] // 2012 IEEE 23rd International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC). IEEE, 2012;399-405

[12] Kulkarni P, Motz B, Lewis T, et al. Inferring Loss Causes to Improve Link Rate Adaptation in Wireless Networks[C] // 2011 IEEE International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINA). IEEE, 2011;659-666

[13] Han C, Dianati M, Tafazolli R, et al. Analytical study of the IEEE 802.11 p MAC sublayer in vehicular networks[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2012, 13(2):873-886

[14] Issariyakul T, Hossain E. Introduction to network simulator NS2[M]. Springer, 2011

(上接第 91 页)

MulSrc。MulSrc 使用信用度在每个转发节点上为各个流的目的节点分配流量, 并将信用度作为队列积压演变的依据。将网络编码应用于背压路由, 可以减少节点协商带来的开销, 降低冗余数据的传输, 实现路径的多样化, 能充分利用无线网络中存在的丰富的多路径, 提高协议性能。在实验部分, 假定上层协议以不会引起拥塞的速率向协议推送数据, 将 MulSrc 与基于网络编码的多播协议 CodeCast 及多源多播协议 MMForests 在端到端吞吐量、整体开销、总体效用等方面进行了比较。实验证明, 在存在多个流的情况下, MulSrc 具有更好的性能。如何根据网络条件寻找最佳的提供负载、降低整体开销, 是 MulSrc 的下一步目标。

参考文献

[1] Chen Y R, Radhakrishnan S, Dhall S, et al. On multi-stream multi-source multicast routing[J]. Computer Networks, 2013, 57(15):2916-2930

[2] Tassioulas L, Ephremides A. Stability properties of constrained queuing systems and scheduling policies for maximum throughput in multihop radio networks[C]//Proceedings of the 29th IEEE Conference on Decision and Control, 1990. IEEE, 1990; 2130-2132

[3] Lun D S, M M M. M, Koetter R. Efficient Operation of Wireless Packet Networks Using Network Coding [C] // Proc. Int'l.

Workshop. Convergent Technologies (IWCT) 2005. June 2005; 1-5

[4] Park J, Gerla M, Lun D, et al. Codecast: a network-coding-based ad hoc multicast protocol[J]. Wireless Communications, IEEE, 2008, 13(5):76-81

[5] Ho T, Viswanathan H. Dynamic algorithms for multicast with intra-session network coding[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2009, 55(2):797-815

[6] Eryilmaz A, Srikant R. Joint congestion control, routing and mac for stability and fairness in wireless networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2006, 24(8):1514-1524

[7] Radunovic B. An Optimization Framework for Opportunistic Multipath Routing in Wireless Mesh Networks[C]//The 27th Conference on Computer Communications (INFOCOM 2008). 2008

[8] Chachulski S, Jennings M, Katti S, et al. MORE; A network coding approach to opportunistic routing[R]. 2006

[9] Li H, Huan Y Q. Parallelized Network Coding with SIMD instruction sets[C]//International Symposium on Computer Science and Computational Technology, 2008 (ISCSCT'08). IEEE, 2008, 1:364-369

[10] Kelly F P, Maulloo A, Tan D. Rate control in communication networks; shadow prices, proportional fairness and stability[J]. Journal of the Operational Research Society, 1998, 49(3):237-252