

无线网络中的多速率调整机制综述

徐卓农^{1,2} 王建新¹ 黄家玮¹

(中南大学信息科学与工程学院 长沙 410083)¹ (中南林业科技大学电子与信息工程学院 长沙 410004)²

摘要 目前 IEEE802.11a/b/g 等无线局域网的物理层均支持多速率的数据传输。无线信号在传输过程中受节点运动、时变干扰、信号衰落等因素的影响较大,因此发送节点采取何种策略预测信道状况和调整数据速率,对提高网络吞吐量有着重要影响。根据发送节点是利用历史信息预测速率还是用 RTS/CTS 反馈信息确定速率,可以将速率调整分为开环方式和闭环方式。综述了现有绝大部分速率调整机制的性能和特点,对起始速率设置、丢包区分和调整策略等关键问题进行了分析和对比,提出了目前存在的问题和今后主要的研究方向。

关键词 无线网络,多速率,数据速率,丢包识别,信噪比

中图分类号 TP393.01 **文献标识码** A

Survey on Multi Rate Adaptation in Wireless Networks

XU Zhuo-nong^{1,2} WANG Jian-xin¹ HUANG Jia-wei¹

(School of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)¹

(Electronics and Information Engineering School, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China)²

Abstract In IEEE 802.11/a/b/g Wireless Local Area Networks, the physical layers support multiple transmission rates. Since the wireless channel varies over time due to such factors as station mobility, time-varying interference, signal fading, and so on, it is very important for the transmitting station to assess channel conditions and accordingly adjust the rate in order to yield higher throughput. Rate adjustment mechanism can be classified into open-loop schemes based on statistics information and close-loop schemes based on the RTS/CTS information feedback. We summarized the performance of the rate adjustment schemes, analyzed the key issues which include initial rate, packet loss distinction and adjustment strategies, and pointed out the present problems and future research interests.

Keywords Wireless networks, Multiple rates, Data rate, Loss differentiation, SNR

1 引言

最初的无线局域网标准 802.11 中,所有帧均采用单一速率进行发送。随着无线通信技术和器件性能的提高,无线网络有能力支持更高的数据传输速率。目前的 802.11a/b/g 均支持多速率数据传送,其中 802.11b^[1] 运行于 2.4 GHz,能够提供最大 11Mbps 的信号传输速率;802.11a^[2] 则运行于 5GHz,并能提供高达 54Mbps 的信号传输速率;802.11g^[3] 也运行在 2.4GHz 频带上,但能以 802.11a 所用的相同调制技术(正交频分复用技术)提供其所有数据传输速率。利用了 802.11 物理层提供的多速率能力,当信道的信噪比 SNR(Signal to Noise Ratio)较高时采用较高的通信速率,以提高网络吞吐量。

单速率的无线局域网标准中,发送节点如果在预定时间内没有收到 ACK 回复信号,则认为发送过程中出现了碰撞,因此将退避时间加倍,缓解不同节点发送过程中的碰撞冲突。单速率机制下丢包的碰撞处理能够较好地适用于静态环境,

但是随着各种 wifi 音频和视频产品的应用,无线通信的应用环境正在日渐变化^[4,5],无线信号在传输的过程中易受到节点运动、时变干扰、信号衰落等因素的影响,导致发送方乐观估计接收方的信道状况,而接收节点处的实际信噪比较低,不能对相应速率的接收信号进行正确解码,从而导致通信失败。因此,用户在复杂环境下进行网络通信时,丢包更多是因为速率或功率等参数设置不合适,而非单一的碰撞丢包。

近年来,物理层的速率调整机制已经得到了学术界的广泛关注,各种速率调整算法相继提出。国内近年来也有此方向的研究论文出现,但相对国外的研究水平存在较大差距。根据发送节点是用历史信息预测速率还是用 RTS/CTS 反馈信息确定速率,可以将速率调整分为开环方式和闭环方式。本文首先对现有各种速率调整机制的性能和特点进行分析对比,并在此基础上提出目前存在的问题和今后主要的研究方向。

2 基于历史信息预测的开环调整

开环调整由发送节点决定数据传输速率。简单的开环机

到稿日期:2010-05-06 返修日期:2010-08-11 本文受国家自然科学基金项目(60673164),新世纪优秀人才支持计划(NCET-05-0683),湖南省杰出青年基金(06JJ10009),高等学校博士学科点专项科研基金(20060533057)资助。

徐卓农(1971-),女,博士生,副教授,主要研究领域为无线网络、MAC 层性能优化, E-mail: xzn71@126.com;王建新(1969-),男,博士,教授,博士生导师,主要研究领域为计算机网络、网络优化理论、计算机优化算法;黄家玮(1976-),男,副教授,主要研究领域为网络拥塞控制。

制由发送节点直接基于接收到的 ACK 信号进行统计分析,预测优化速率;复杂的开环机制需要接收节点处的信息反馈,其优化速率的预测可以基于接收节点处的 SNR 估算,还可以基于物理层信息反馈机制预测误码率 BER(Bit Error Rate)。

2.1 基于 ACK 统计信息

基于 ACK 统计信息的开环调整是由发送节点根据接收的 ACK 信息,统计成功或者失败的传输次数、误码率、传输时间和吞吐量等参数,估算接收节点处的信道状况,探索优化的数据传输速率。这类速率调整机制还可以根据是否进行丢包区分进行分类。

2.1.1 未进行丢包区分

ARF(Auto Rate Fallback)^[8]是一种基于发送节点的速率自适应协议,发送节点的起始工作速率为最低速率。在连续收到若干个 ACK 信号后,即连续成功发送数据超过设定门限值 N_c ,则尝试使用较高的发送速率;而一旦发送失败的次数超过设定门限值 N_f ,则降低传输速率。ARF 是最早实现多速率的 MAC 协议,已经广泛应用于实际的硬件产品中。ARF 协议对于信道质量的估算基于前一段时间的传输结果,不能对信道状况的变化做出及时的反应和调整。同时,对于稳定或者变化很慢的信道状况,ARF 机制仍会在成功传输次数超过阈值后,反复探索新的数据速率。

针对 ARF 协议存在的问题,AARF^[9]在探索失败回到原速率时,将连续成功的阈值由 N_c 变化为 $2N_c$,改善了 ARF 协议中速率频繁探索的状况,但不能迅速反映信道的变化。文献[10]提出了采用启发式短探索间隔和长探索间隔,通过改变 N_c (例如分别取 3 和 10),跟踪信道的快速和慢速变化。文献[11]则提出了一种以延时因子为目标、以较小 N_c 迅速响应信道变化的调整机制。

AMRR^[12](Adaptive Multi Rate Retry)利用了发送描述符包含一个 4 对的“速率/重传次数”对($r_0/c_0, r_1/c_1, r_2/c_2, r_3/c_3$)的特点。发送节点首先使用速率 r_0 发送,如果发送失败,继续以速率 r_0 发送 c_0-1 次,速率 r_1 发送 c_1 次,……失败 $c_0+c_1+c_2+c_3$ 后放弃这次发送。当发送完毕,或者发送放弃,硬件会在发送描述符中报告本次发送丢失的 ACK 的数目,并通过丢失的 ACK 的数目间接获知本次的发送速率。这种方法试图通过发送节点的速率试探获知接收节点处的信道状况。

ONOE^[13]是一种基于信用度的速率调整机制,它对每个包的失败与否不敏感,试图找到丢帧率小于 50%的最高速率。ONOE 的速率调整算法将初始速率设置为 24M(802.11a/g)或者 11M(802.11b),通过统计每个目的连接的帧传输次数、成功传输次数、重传次数和信用度进行速率调整。

SampleRate^[14]是一种基于最短传输时间的速率调整机制,该算法将起始速率设置为最高速率,连续丢包 4 次则降低速率。发送过程中以 10 个包为一组,第 10 个包探测非重传传输时间小于当前平均传输时间的新速率,并在下组传输中选择传输时间较短的速率。

文献[15]提出了一种综合速率调整机制 HRC(Hybrid Rate Control)。HRC 仍以基于吞吐量预测的开环速率调整为核心,并通过 ACK 包的接收信号强度 SSI(Signal Strength Indication)预测信道变化的程度。每个 rate 对应 3 个动态调整的 SSI 阈值;两个对应信道稳定情况下的高端阈值和低端

阈值,另一个为信道波动情况下的低端阈值。HRC 在开环探索过程中信道快速变化的情况下应尽量采用低速率,以保证可靠传输。

上述速率调整机制尽管调整的过程和依据的参数不一样,但都是通过发送节点统计 ACK 的接收信息,统计过程中不区分碰撞丢包和信道丢包。将信道丢包处理为碰撞丢包,则调整退避时间不能有效改善传输结果,反而增加发送前的竞争等待时间;将碰撞丢包处理为信道丢包,则降低信道速率会导致传输时间更长,使信道的竞争状况更加恶化。通过测量数据对很多无线网络的性能进行的研究^[16-19]表明,由于工作在各种频段的碰撞和干扰引起的丢包现象日趋严重,通信节点在绝大部分时间里使用最低速率进行通信。这类不进行丢包区分的开环机制在多节点网络中的适应性较差。

2.1.2 基于丢包区分的速率调整机制

基于丢包区分的速率调整机制仍然是通过 ACK 来接收统计传输次数或丢包率等参数,但是增加了丢包区分的功能。丢包区分的信息可以来自接收方的反馈信息,也可以由发送方进行主动探测。

(1) 基于接收方信息反馈

LD-ARF(loss differentiating-ARF)^[20]在 ARF 的基础上增加了丢包区分功能,其丢包区分基于接收方的信息反馈。802.11DCF 机制定义了 2 种信道接入机制:基本接入机制和 RTS/CTS 机制。对于 RTS/CTS 机制,若发送节点收到 CTS 信号而没有收到 ACK 信号,则认为在信道已经预约的情况下发生丢包,将失败的原因归于信道质量问题,因此降低了数据通信速率;如果发送节点没有收到 CTS 信号,则将失败原因归于碰撞,此时不会降低数据传输速率。这种判断的依据是控制帧 RTS 和 CTS 采用较低的基本速率发送,因为信道质量问题出现丢包的可能性较小。对于基本的 data/ack 方式,若不考虑隐藏终端问题(即每一个节点都可以听到其它节点),则碰撞完全是多个节点在同一时隙同时发送引起的,此时数据包的 header 和 body 同时被破坏的可能性较大。如果只有一个节点发送数据包,由信道引起的通信失败则可能正确接收了 header,那么接收节点通过分析 header 中的内容,获知发送节点的 ID 号,并通过反馈 NAK 信号通知发送节点,发送节点只有收到 NAK 信号时才将失败统计为信道丢包。这种基于丢包区分的 LD-ARF 处理机制不需要物理层变动,DCF 的变化很小。

文献[21]认为利用接收信号强度、位错误率和“symbol-level”错误机制等信息可以有效区分碰撞丢包和信道丢包,并提出一种基于丢包区分的 COLLIE 机制。通过 AP 将接收到的错误信号反馈回发送节点,由发送节点计算各种错误衡量参数,将丢包进行区分后分别调整退避时间和传输速率。这种调整机制需要将接收的错误帧信号全部反馈回源节点,导致大量的网络开销。

(2) 基于发送方探测

CARA^[22](Collision-Aware Rate Adaptation)首次提出利用 RTS/CTS 探测区分碰撞和信道错误引起的两种传输失败。当数据发送失败达到设定阈值时,CARA 协议启动 RTS 探测,以确定是否需要降低数据传输速率。例如 RTS 设置探测阈值 $P_{th}=1$,则在通信失败一次后启动 RTS probing,收到 CTS 回应,说明信道已经预留。若再次传输失败,

则认为信道质量问题。这种基于 RTS/CTS 的探测机制一定程度上可以区分丢包,当网络中存在隐藏终端问题时,CARA 协议中提出的 RTS 探测方法将导致 RTS 频繁开关,发送节点仍然出现大量的碰撞丢包,并可能最终导致数据传输速率的降低。

Robust Rate Adaptation Algorithm(RRAA)^[23]提出改进的探测方法 A-RTS,通过控制 RTS 窗口值(RTS_{window})的大小和 RTS 计数值(RTS_{counter})的改变,改善因为隐藏终端问题导致的碰撞丢包。RTS_{window} 初始化置 0,表示 RTS 关闭。当没有使用 RTS 时发生丢包,RTS_{window} 加 1,表示启动 RTS 探测;当使用 RTS 仍然出现丢包或者不用 RTS 成功接收时,说明上一帧的发送过程中没有发生碰撞,RTS_{window} 减 1;如果在使用 RTS 探测的情况下成功接收,则 RTS_{window} 保持不变。此外,PBRA^[24]通过估算碰撞的概率决定是否使用 RTS/CTS 探测。

OTLR^[25,26]在利用速率 r_f 丢包后将数据帧分成短帧和长帧,利用短帧试探 r_f 及基本速率 r_{basic} ,在下列情况判断为碰撞丢包: r_f 传送短帧成功; r_{basic} 传输短帧失败; r_{basic} 传输短帧成功,但 ACK 反馈的 SNR 有能力支持更高的速率。

(3) 基于发送方 RSS 检测

文献[23]根据接收信号强度 RSS (receive signal strength)进行丢包区分。发送节点在发送完 data 的 SIFS 时隙中检测信道,如果 RSS 超过阈值且没有收到 ACK 回复,则认为干扰信号强度过大,导致数据传送时发生碰撞,这种检测方法对传输时间较短的干扰信号无效。同时,由于 RSS 的波动较大,且数据包能否正确接收取决于接收节点处的信噪比和接收灵敏度^[27],因此这种基于 RSS 的丢包检测,很难找到一个合适的阈值进行准确的丢包判断。

文献[28]认为多节点网络中,sample 算法中的丢包率计算应该考虑碰撞的影响,据此提出的 WOOF 算法结合信道的拥塞程度将丢包率修正为

$$EffectiveLoss = ObservedLoss \cdot (1 - P_{ca}) \quad (1)$$

式中, $P_{ca} = \beta \cdot \text{CBTF}$, β 为调整系数,CBTF (Channel Busy Time Fraction) 用来衡量网络的拥塞程度,定义为一定时间间隔内信道忙时隙所占的比率。信道忙时隙可通过检测 RSS 是否超过设定阈值进行判断。

表 1 基于 ACK 统计信息的开环速率机制

方法	调整基于参数	丢包区分	起始速率
ARF	成功或失败的次数	否	最小
Sample	最短传输时间	否	最大
ONOE	丢包率	否	24M(802.11a/g) 11M(802.11b)
LD-ARF	成功或失败的次数	是(NAK)	最小
CARA	成功或失败的次数	是(RTS 探测/ CCA 检测)	最小
RRAA	丢包率	是(修正的 RTS 探测)	最大
WOOF	丢包率	是(修正丢包率)	最大

表 1 对比列出了一些基于开环调整协议的调整参数、丢包区分和起始速率。这些协议的调整都是基于 ACK 的统计信息,不需要修改 MAC 帧格式,容易在 IEEE802.11 的基础上实现,比单一速率的传输协议具有更优的性能。但是这类开环协议往往基于多个帧的传输结果进行信道质量的估算,不能对信道状况的变化做出及时的调整和反应。此外,基于连续成功和失败次数的统计机制,如果信道衰减较快,节点不

能及时反映信道的变化,导致大部分传输速率低于信道支持的理想速率^[29]。而由于 IEEE 802.11 DCF 协议保证节点以相等的概率接入无线信道,如果某些低速传输节点长期占用传输信道,将使网络中高速传输节点的吞吐量下降,最终导致网络总体效率的下降^[30]。

2.2 基于 SNR 预测

基于 SNR 预测的开环算法由发送节点根据接收信号强度预测接收节点处的信噪比,这类算法根据反馈信号的取样方式,适应于不同的网络通信环境。

文献[31]提出了一种基于接收信号强度预测的速率调整机制 RSSLA (Link Adaptation via Received Signal Strength Measurement)。在带 AP 的 WLAN 中,假定 AP 的发送功率固定,那么各节点通过检测来自 AP 的信号强度 RSS,在固定背景噪声 N 的情况下,认为 SNR 和 RSS 存在线性关系,即 $\text{SNR} = \text{RSS}/N$ 。各节点一方面通过接收到任何从 AP 发送给自己的信号(包括 broadcast / multicast),更新其接收信号平均值 RSS-avg,另一方面存储并不断更新 12 个门限值 $Th[i, j]$,表示对应 4 个数据速率、3 种数据包长度(0~100 b, 100~1000 b, 1000~2400 b)所要求的最小 RSS 值。RSSLA 机制中,节点将根据 RSS-avg、门限值 $Th[i, j]$ 、帧大小和重传次数调整数据传输速率。该算法中使用多个接收信号强度平均值预测下一个数据包的接收信号强度,但实际通信中将出现较大误差。

文献[32]通过研究各种室内和室外环境下的实测数据指出,尽管信噪比 SNR 能较好地预测信道状况,但帧传输率 FDR 从 0 到 1,SNR 对应 5~7dB 的渐变带宽,以 SNR 阈值作为速率的突变调整不够准确。此外,即使在 SNR 较高的情况下,突发干扰也可能发生丢包,因此直接根据 SNR-FDR 曲线预测 FDR 的做法也过于乐观。SGRA 调整算法^[32]利用接收到的 ACK 包的信号强度估算 SNR,具体的调整策略包括在线校准机制和速率适应机制。考虑到 5~7dB 的渐变带宽,SGRA 利用 SNR_{low} 对应 10% 的 FDR, SNR_{high} 对应 90% 的 FDR,快速建立各节点对在各速率情况下的 SNR-FDR 的在线校准曲线。考虑到干扰对于 FDR 的影响,SGRA 把信道分成干扰和非干扰两种状态。在无干扰的情况下,SGRA 根据当前 SNR 预测各种速率 R 对应的包传递率 $\text{FDR}[R]$,选择 $\text{argmax}_R \text{FDR}[R] * R$ 作为当前速率。当信道中存在干扰时,SGRA 通过采样测试干扰强度的变化,修正丢包率以选择合适速率。实验结果表明,SGRA 在网络无干扰、有 802.11 干扰源和非 802.11 干扰源的情况下,对比 ARF, HRC 和 RRAA 算法,其吞吐量均有较大程度提升。

基于接收信号强度预测的 RSSLA 和 SGRA 机制认为 RSS 和 SNR 存在线性关系,这种假定只适合于固定背景噪声的带基站形式的 WLAN。对于一般的无线网络,文献[33]提出了一种基于路径损耗和噪声功率预测发送速率的调整机制 CHARM(channel-aware rate adaptation algorithm)。该机制中每个 ACK, data 和控制包都包含当前的发送功率 P_{tx} 和噪声功率 N 的大小。任何节点在接收到这些包时,根据自身目前的接收信号强度 RSS,计算节点对之间的路径损耗 PL ^[34]: $PL = P_{tx} - \text{RSS}$ 。当节点 A 需要和节点 B 通信时,节点 A 将查询 AB 通信节点对应的路径损耗和噪声功率,根据互易原理估算接收节点处的信噪比为

$$SNR = \frac{P_B}{N_B} = \frac{P_A - PL_{AB}}{N_B} = \frac{P_A - PL_{BA}}{N_B} \quad (2)$$

基于 SNR 预测开环速率机制的性能对比如表 2 所列。这些开环机制均由发送节点根据 SNR 选择合适的数据传输速率。由于节点运动引起信道相干时间变化, SNR 和 BER 的对应关系也随着环境变化, 因此这类机制在移动环境下的适用性较差, 需要针对不同的硬件平台进行校准。SGRA 算法区分了网络的干扰和非干扰状态, 对于干扰状态下的速率调整比其它算法更加适用于实际的通信环境。

表 2 基于 SNR 预测的开环速率机制

方法	调整基干参数	校准参数	区分干扰	适合网络
RSSLA	重传次数	SNR 阈值	否	AP
SGRA	吞吐量	SNR-FDR 曲线	是	AP
CHARM	重传次数	SNR 阈值	否	任意网络

2.3 基于物理层信息反馈机制预测 BER

softRate^[35] 首先确定不同调制方法和编码率下 BER 的映射关系, 计算每个速率 R_i 对应的最佳 BER 阈值范围 (α_i , β_i), 其中 α_i 和 β_i 的具体取值与不同的错误恢复机制有关^[36]。softRate 具体的速率调整策略是接收方利用 softPHY hint 信号区分干扰和信道错误引起的丢包, 计算帧接收无干扰状态下的 BER 并反馈给发送方, 发送方根据当前速率 R_i 对应的 BER (假设为 b_i) 确定是否需要修正发送速率: $b_i < \alpha_i$, 发送方提高速率; $b_i > \alpha_i$, 发送方降低速率。softRate 在移动环境下优于基于 SNR 预测的调整机制, 并能结合不同的错误恢复机制进行处理, 调整更具灵活性。

3 基于 RTS/CTS 信息反馈的闭环调整

开环机制中由发送节点预测速率, 闭环机制则由接收节点直接根据信噪比决定传输速率, 并将速率信息反馈回发送节点, 这种速率调整机制需要 RTS/CTS 方式支持。

RBAR(Receiver Based Auto Rate)^[37] 是一种基于接收节点的速率自适应协议。接收节点收到发送节点发出的 RTS 后, 分析其信噪比, 以此确定传输数据所使用的速率, 并通过 CTS 信号通知发送节点。RBAR 协议中, 速率选择是在 RTS/CTS 交换期间进行的, 因此它对信道状况的变化反应更快, 适应能力也更强。与单速率协议和 ARF 相比, RBAR 能更加有效地提高吞吐量。

OAR(Opportunistic Auto Rate)^[38] 协议指出, RBAR 每次只发送一个数据包, 没有充分利用信道条件。提出了在信道条件良好的情况下, 允许节点连续发送多个数据帧, 发送数据帧的数量为传输速率与基本速率的比值。但 OAR 协议连续传输的数据帧都使用相同的速率, 因此无法适应在此期间的信道突变。AAR(Adaptive Auto Rate)^[39] 以自适应的速率来传输每个数据分段, 其分段速率由接收节点估计并通过 ACK 信号返回给发送节点。AAR 能够适应信道突变的情况, 并能灵活调整分段数据大小。但是 AAR 协议适合信道质量好的情况下传输数据, 而对于信道条件差的环境, 节点可能长时间没办法接入信道, 导致公平性更差。

OSAR (Opportunistic Packet Scheduling and Auto Rate)^[40] 协议实现了通信用户的多样性。发送节点通过发送多播 RTS 帧, 同时探测多个邻居接收节点的信道质量, 来选处处在信道条件好的节点以最佳速率进行通信。OSAR 协议

能够减少帧的重传次数, 但难以保证节点的公平性, 并且最佳发送速率也很难确定。

FAR(Full Auto Rate)^[41] 协议结合了基于发送节点和接收节点的速率调整方法, 对所有的帧都进行速率控制。其中 RTS/CTS 帧的传输速率由发送节点控制, 而 DATA/ACK 帧的速率则由接收节点控制。FAR 协议对控制帧也进行了速率自适应, 从而进一步减小了时间开销, 提高了网络性能。但是, FAR 并没有考虑网络的公平性问题, 并且当控制帧由于冲突或者碰撞导致传输错误时, 也没有有效的解决办法。

闭环速率调整机制由接收节点直接决定接收速率, 因此不存在丢包区分的问题, 但是上述调整机制需要通过 RTC/CTS 进行信息交换。802.11DCF 协议中, 只有当待发送的 data 长度超过 RTS 门限值时, RTS/CTS 信道预留机制才开始启动以减少隐藏终端的影响。因此, 上述闭环调整机制需要修改 MAC 帧的格式, 增加一些字段, 对标准协议有较大的改动。这不仅增加了带宽开销, 也使控制协议变得比较复杂。

4 速率和其它参数的综合调整

近年来的速率调整机制中, 还出现了一些结合数据帧长、载波侦听范围和发送功率等参数进行综合调整的方法。

文献[42-44]分析了 IEEE 802.11a 无线网络在高斯白噪声和 Kakagami-m 衰减信道模型下吞吐量与信道状况、数据帧长及传输速率的关系, 并提出由发送节点根据信道状态选择合适的数据帧长及传输速率, 以利于系统性能的优化。文献[45]中的速率和优化包长的调整则由接收端决定, 接收端根据一段时间内接收信号强度的变化, 把信道状态划分为 idle 和 busy。对每个给定的速率, 根据相应的 idle 分布, 计算优化的传输包长, 然后比较每一个速率在优化包长下可能达到的最大吞吐量, 将最大吞吐量对应的速率和包长信息, 通过 ACK 信号反馈到发送端。这种速率调整机制假定无线信道的干扰具有短期的可预测性, 并需要复杂的物理载波侦听门限值机制支持。

文献[46]认为采用较大的载波侦听门限值, 有利于提高空间复用率, 即使在单个独立连接速率下降的情况下系统吞吐量仍可能提高。文献[47]分析了多跳网络中优化速率和载波侦听范围的设置。文献[48]提出了结合载波侦听功率门限值和数据传输速率的综合调整算法 DSB (Dyamic Spatial Backoff)。DSB 算法的调整原则是: 如果节点连续传输成功, 则逐渐提高信道速率, 载波侦听门限值维持不变; 如果节点连续传输失败, 意味着空间并发传输太多, 发送节点高估了接收节点对干扰的抑制能力, 则降低载波侦听门限值。然而, 利用载波侦听范围跳帧改善空间复用程度是否有效, 与网络拓扑结构密切相关。当载波侦听范围增大, 但调整的范围没有包含传输节点, 则信噪比无法改善; 反之, 由于载波侦听范围减小, 导致传输节点增加, 信噪比下降过多, 无法支持当前速率, 亦可导致调整失败。文献[49]提出了基于发送功率和速率的综合调整机制 PRC (Power and Rate Control), 即通过噪声估算确定数据速率, 并尽量降低发射功率, 减小对其它并发传输的干扰。

结束语 本文针对无线网络中的多速率机制进行了整理和分析。根据前面的分析我们可以看到, 速率的控制机制存在以下几个问题:

(1) 起始速率的设置

当发送节点需要发送数据包时,其起始速率通常设置为基本(最低)速率、最高速率或者通过估算决定。为了保证通信的可靠性,很多的适应机制选择基本速率作为起始速率。但是信道状况良好的状况下采用保守设置,不利于网络性能的优化。但是,优化的起始速率设置需要发送节点了解接收节点的信道状况,即需要 RTS/CTS 机制的支持,或者利用 802.11 中周期性的信标帧广播及时更新接收节点的信息。

(2) 如何进行丢包区分

在利用丢包率进行速率调整的机制中,如果不进行丢包区分,将所有传输失败认为是因信道错误而降低速率,那么将导致数据包的传输时间更长,加剧信道多节点竞争,进一步恶化网络性能。LD-ARF 中丢包区分的前提是接收节点能够正确接收丢包文件的 header,通过分析得知发送节点和目标节点的 ID 号并回复 NAK 信号。CCA 检测中的丢包区分也只能处理图示的第二种情况,利用 RTS/CTS 进行丢包区分将增加网络开销,而且对于 RTS/CTS 覆盖范围外的干扰源和非 802.11 干扰源,这种区分机制都将失效。基于 RTS 探测的丢包区分机制只在失败次数满足门槛值时,才启动 RTS 探测。这种机制一定程度上降低了开销,但将引起 RTS 机制的频繁开关,影响网络性能。可见,如何进行高效的丢包区分,是优化速率调整机制的关键。

(3) 选择合适的速率适应机制

大部分的速率调整机制认为,尽管较低的数据速率对应较低的误码率,但当信道状况良好时,发送节点应尽量使用较高的数据传输速率,以提高网络吞吐量。因此在连续成功若干次后探索更高的传输速率,连续失败达到阈值后降低速率。这类调整方式基于吞吐量、FER 或者重传次数的统计分析,不能反映信道的快速变化,也可能导致稳定信道状态下速率的反复探索。基于 SNR 的方式,直接将速率切换到 SNR 对应的优化速率,可以迅速反映信道的变化状况。但是目前许多无线节点只能提供未校准的接收信号强度,发送节点需要准确获得接收节点处的 SNR 并非易事。此外,由于实际网络中 SNR 和优化速率的对应关系往往是可变的,通过 SNR 选择优化速率的作法并不可靠。因此,如何利用、提高 SNR 预测信道的准确性,并以简单有效的调整方式适应复杂变化的网络环境,是下一步研究工作的重点。

无线网络中,多速率的调整机制对于提高网络性能具有非常重要的意义,也是一个值得深入研究的课题。面对未来日益复杂的网络环境和性能要求,只有系统的解决方案,才能综合解决速率机制中出现的众多问题,达到理想的调整效果。

参 考 文 献

- [1] IEEE 802.11b, Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications; Higher-speed Physical Layer Extension in the 2.4 GHz Band, Supplement to IEEE 802.11 Standard[S]. Sep. 1999
- [2] IEEE 802.11a, Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications; High-speed Physical Layer in the 5 GHz Band, Supplement to IEEE 802.11 Standard[S]. Sep. 1999
- [3] IEEE 802.11g, Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications; Further High-speed Data Rate Extension in the 2.4 GHz Band, Supplement to IEEE 802.11 Standard[S]. June. 2003
- [4] Henderson T, Kotz D, Abyzov I. The changing usage of a mature campus-wide wireless network[C]//Proc. of ACM MOBICOM. 2004
- [5] Bychkovskiy V, Hull B, Miu A, et al. A measurement study of vehicular internet access using in situ wi-fi networks[C]//Proc. of ACM MOBICOM. 2006; 50-61
- [6] 李昉照, 丁毅, 刘威, 等. 功率受限的无线网络的传输速率控制[J]. 计算机科学, 2009, 36(5): 79-81
- [7] 张建军, 唐雅娟. 基于 IEEE802.11 的速率自适应算法研究[J]. 重庆邮电大学学报, 2009, 21(5): 599-609
- [8] 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
- [9] Lacage M, Manshaei M, Turletti T. IEEE 802.11 Rate Adaptation: A Practical Approach[C]//Proc. of MSWiM. 2004; 126-134
- [10] Chevillat P, Jelitto J, Barreto A N, et al. A Dynamic Link Adaptation Algorithm for IEEE 802.11a Wireless LANs[C]//Proc. of IEEE ICC. 2003; 1141-1145
- [11] Qiao Daji, Choi Sunghyun. Fast-responsive Link Adaptation for IEEE 802.11 WLANs[C]//Proc. of IEEE ICC. May 2005
- [12] Lacage M, Manshaei M H, Turletti T. IEEE 802.11 Rate Adaptation: A Practical Approach[C]//The 7th ACM International Symposium on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems (MSWiM). 2004; 126-134
- [13] Madwifi[EB/OL]. <http://sourceforge.net/projects/madwifi>
- [14] Bicket I C. Bit-rate Selection in Wireless Networks [D]. Massachusetts Institute of Technology, 2005
- [15] Haratcherev I, Langendoen K. Hybrid Rate Control for IEEE 802.11 [C]//ACM International Workshop on Mobility Management and Wireless Access. 2004
- [16] Choi S, Park K, Kim C K. On the performance characteristics of wlangs: Revisited[C]//Proc. of ACM SIGMETRICS. 2005
- [17] Jardosh A P, Ramachandran K N, Almeroth K C, et al. Understanding link-layer behavior in highly congested ieee 802.11b wireless networks [C]//Proc. of ACM SIGCOMM E-WIND Workshop. 2005
- [18] Rodrig M, Reis C, Mahajan R, et al. Measurement-based characterization of 802.11 in a hotspot setting [C]//Proc. of ACM SIGCOMM E-WIND Workshop. 2005
- [19] Wu Z, Ganu S, Seskar I, et al. Experimental investigation of PHY layer rate control and frequency selection in 802.11 based ad-hoc networks [C]//Proc. of ACM SIGCOMM E-WIND Workshop. 2005
- [20] Pang Qixiang, Leung V, Liew S C. A Rate Adaptation Algorithm for IEEE 802.11 WLANs Based on MAC-layer Loss Differentiation[C]//IEEE BROADNETS 2005-Broadband Wireless Networking Symposium. 2005; 709-717
- [21] Rayanchu S, Mishra A, Agrawal D, et al. Diagnosing Wireless Packet Losses in 802.11: Separating Collision from Weak Signal [C]//Proc. of IEEE INFOCOM. 2008; 735-743
- [22] Kim I, Kim S, Choi S, et al. CARA: Collision-aware Rate Adaptation for IEEE 802.11 WLANs [C]//Proc. of IEEE INFOCOM. 2006

P2P 存储系统的可靠性,通常每个数据需要保留多个副本,导致数据一致性问题也必须得到解决,否则副本保存的冗余数据变成了一堆垃圾,不仅对系统可靠性无益,反而会严重影响存储系统的可用性。数据的一致性问题主要与系统的更新操作有关:更新操作发生时,离线结点因为无法接收到更新操作而导致数据副本间的不一致。P2P 网络的结点状态非可控使得一致性协议的开销增大或者导致丢失更新操作,为此需要解决如何用最少的开销保证副本最终的一致状态,以及根据数据的更新频率和故障概率来选择合适的数据修复机制,保证在一致性问题解决的前提下如何高效率地修复数据。

删除冗余数据也会影响一致性并占用存储资源。在对无用数据删除的过程中,由于用户结点的离线会使本应该被删除的无用数据仍然保留在结点上,如果结点此时上线,将发现本地数据和最新数据的版本不一致,使得本地拥有的数据变成了垃圾数据。因此必须解决多个数据副本的一致性问题,保证必须删除的数据都被完全删除。一个可行的解决办法就是采用定时机制,当某个数据副本在结点上的持有时间超过

了系统预先设定的时间阈值以后,由系统自动删除该数据,但这会产生一点维护代价。

参考文献

- (上接第 47 页)
- [23] Wong S, Yang H, Lu S, et al. Robust Rate Adaptation for 802.11 Wireless Networks[C]// Proc. of ACM MOBICOM, 2006: 146-157
- [24] Chen Xi, Qiao Daji, Yu Jeonggyun, et al. Probabilistic-Based Rate Adaptation for IEEE 802.11 WLANs[C]// Proc. of IEEE GLOBECOM, 2007: 26-30
- [25] Wu S, Biaz S. ERA: Efficient Rate Adaption Algorithm with Fragmentation [R]. CSSE 07-04. Auburn University, June 2007
- [26] Biaz S, Wu Shaoen. OTLR: Opportunistic Transmission with Loss Recovery for WLANs[C]// Proc. of WCNC, 2008: 1541-1546
- [27] Reis C, Mahajan R, Rodrig M, et al. Measurement-based models of delivery and interference in static wireless networks[C]// Proc. of ACM SIGCOMM, 2006
- [28] Acharya P A K, Sharma A, Belding E M, et al. Congestion-aware Rate Adaptation in Wireless Networks: A Measurement-driven Approach[C]// Proc. IEEE SECON, June 2008: 1-9
- [29] Camp J, Knightly E. Modulation Rate Adaptation in Urban and Vehicular Environments: Cross-layer Implementation and Experimental Evaluation[C]// Proc. of the ACM MobiCom, Sept. 2008: 315-326
- [30] Heusse M, Rousseu F, Berger-Sabbatel G, et al. Performance Anomaly of 802.11b[C]// Proc. IEEE INFOCOM, Mar. 2003: 836-843
- [31] Pavon I, Choi S. Link Adaptation Strategy for IEEE 802.11 WLAN via Received Signal Strength Measurement[C]// Proc. IEEE ICC, 2003: 1108-1123
- [32] Zhang J, Tan K, Zhao J, et al. A Practical SNR-guided Rate Adaptation[C]// Proc. of the IEEE INFOCOM, Apr. 2008: 2083-2091
- [33] Judd G, Wang X, Steenkiste P. Efficient Channel-aware Rate Adaptation in Dynamic Environments[C]// Proc. of the ACM MobiSys Conf, June 2008: 118-131
- [34] Rappaport T. Wireless Communications: Principles and Practice [M]. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 2002
- [35] Vutukuru M, Balakrishnan H, Jamieson K. Cross-layer wireless bit rate adaptation[C]// Proc. of ACM SIGCOMM, 2009: 3-14
- [36] Jamieson K, Balakrishnan H. PPR: Partial Packet Recovery for Wireless Networks [C]// Proc. of ACM SIGCOMM, August 2007: 409-420
- [37] Holland G, Vaidya N, Bahl P. A rate-adaptive MAC protocol for multi-hop wireless networks[C]// Proc. of ACM MOBICOM, 2001
- [38] Sadeghi B, Kanodia V, Sabharwal A, et al. Opportunistic Media Access for Multirate Ad Hoc Networks[C]// Proc. of ACM MOBICOM, 2002: 24-35
- [39] Lin C R, Chang Y H J. AAR: An Adaptive Rate Control Protocol for Mobile Ad Hoc Networks[C]// Proc. of the 11th IEEE International Conference on Networks(ICON), Sept. 2003
- [40] Wang J, Zhai H, Yuang F Y. Opportunistic Media Access Control and Rate Adaptation for Wireless Ad hoc Networks[C]// Proc. of IEEE ICC, June 2004
- [41] Li Z, Das A, Gupta A K, et al. Full auto rate MAC protocol for wireless ad hoc networks[C]// IEEE Proc. on Communication, 2005(3): 311-319
- [42] Qiao Daji, Choi Sunghyun. Goodput Enhancement of IEEE 802.11a Wireless LAN via Link Adaptation[C]// Proc. of IEEE ICC, June 2001: 1995-2000
- [43] Qiao Daji, Choi Sunghyun, Shin K G. Goodput Analysis and Link Adaptation for IEEE 802.11a Wireless LANs[J]. Proc. of IEEE Trans. on Mobile Computing(TMC), 2002, 1(4): 278-292
- [44] Choudhury S, Gibson J D. Payload Length and Rate Adaptation for multimedia Communications in Wireless LANs[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2007, 25(4)
- [45] Chen C, Luo H, Seo E, et al. Rate-adaptive. Framing for Interfered Wireless Networks[C]// Proc. of IEEE, INFOCOM, 2007
- [46] Yang X, Vaidya N. On the Physical Carrier Sensing in Wireless Ad Hoc Networks[C]// Proc. of IEEE INFOCOM, 2005: 2525-2535
- [47] Zhai H, Fang Y. Physical carrier sensing and spatial reuse in multirate and multihop wireless ad hoc networks[C]// Proc. of IEEE INFOCOM, Apr. 2006: 1-12
- [48] Yang X, Vaidya N. Spatial Backoff Contention Resolution for Wireless Networks[R]. Urbana-Champaign; Univ. of Illinois, 2006
- [49] Kim T S, Lim H, Hou J C. Improving Spatial Reuse Through Tuning Transmit Power, Carrier Sense Threshold, and Data Rate in Multihop Wireless Networks[C]// Proc. of ACM MobiCom, 2006