

# AdaCode: IEEE 802.11n 长距离 无线链路自适应编码算法

刘康宁, 赵增华, 王 宇

(天津大学智能与计算学部, 天津 300350)

**摘 要:** 通过在实验床上的大量真实测量, 分析了长距离无线链路中导致吞吐率低下的原因, 总结了数据帧出错模式和丢包特点. 在此基础上, 提出了 MAC (Media Access Control) 层自适应编码算法 AdaCode. 该算法将帧间编码和帧内编码有机结合起来, 帧间编码使用喷泉码 LT (Luby Transform) 码, 帧内编码使用 RS (Reed Solomon) 码, 根据链路中数据帧误比特率和丢包率的实时变化, 动态选择最佳编码率, 使接收端能够解码出所有数据帧, 从而避免重传, 极大提升了链路吞吐量. 在 MATLAB 平台上实现了 AdaCode, 并使用实验床测得的真实数据进行仿真. 仿真结果表明在固定物理层发送速率和可变发送速率两种情况下, AdaCode 都能有效提升链路吞吐量.

**关键词:** 长距离; 无线 Mesh 网络; 802.11n; RS 码; LT 码

**中图分类号:** TN919.72 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2018)12-2942-08

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>

**DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2018.12.017

## AdaCode: Adaptive Codes in IEEE 802.11n Wireless Long-Distance Links

LIU Kang-ning, ZHAO Zeng-hua, WANG Yu

(College of Intelligence and Computing, Tianjin University, Tianjin, 300350, China)

**Abstract:** Through extensive measurements in our wireless long-distance network test-bed, we analyze fundamental reasons that cause low link throughput, and find characteristics of frame error pattern and loss rate. AdaCode is therefore proposed to improve link throughput, which is an adaptive coding algorithm at MAC (Media Access Control) layer. AdaCode integrates inter-coding and intra-coding algorithms, where inter-coding adopts LT (Luby Transform) codes to combat frame loss, whereas intra-coding uses RS (Reed Solomon) codes to recover corrupted frames. It chooses the optimal coding rate to decode all frames according to frame bit error rate and loss rate during transmission. When all frames are decoded, it is unnecessary to retransmit them, thus improving link throughput. We evaluate AdaCode via simulation in MATLAB using real-network trace. The simulation results show that AdaCode can improve link throughput efficiently at both fixed and variable physical-layer rate.

**Key words:** long distance; wireless mesh networks; 802.11n; RS code; LT code

### 1 引言

互联网的普及和应用极大促进了人类社会的发展, 然而偏远乡村等人口稀疏地区由于有线网络设施的部署和维护费用高等原因, 还没有快速稳定的网络服务. 据不完全统计, 全球有约 2/3 的人口尚不能接入 Internet. 近年来谷歌的热气球计划在致力于解决偏远地区网络接入技术的研究和应用<sup>[1]</sup>. 基于 IEEE 802.11

的长距离无线 mesh 网络具有带宽高、搭建成本低、覆盖区域广等特点, 可用于偏远乡村或人口分布稀疏地区的无线宽带接入, 还可做为物联网的骨干网络, 应用于野外大区域的宽带网络部署, 如自然保护区 (湿地、森林、草原) 的环境监控等<sup>[2]</sup>. 因此研究长距离无线 mesh 网络, 促进其产业化发展, 具有重要的社会和经济意义.

与传统无线 mesh 网络相比, 基于 IEEE 802.11n 的长距离无线 mesh 网络有着显著不同<sup>[2,3]</sup>: (1) 单跳链路

长度在几十到上百公里,故而链路的传播延迟较长(可达毫秒级),因此数据包重传及碰撞后退避时需要等待的时间更长。(2)带宽延迟乘积大. 802. 11n 的最大物理层速率高达 600Mbps,而长距离链路的传播延迟长,因此带宽延迟乘积大. 802. 11 的 MAC (Media Access Control) 层采用停等的可靠传输机制,在大带宽延迟乘积的链路上会造成链路利用率低下. 长距离无线链路的上述两个特点使得链路吞吐率降低,性能较差<sup>[3]</sup>.

为提高 802. 11n 长距离无线链路的性能,必须解决两个问题:一是减少丢包,二是提高链路利用率. 为此首先需要考察丢包的原因,提出针对性的解决方法. 因此我们搭建了 802. 11n 长距离无线 mesh 网络实验床,该实验床包含 7 条长距离链路,链路长度从 3.5 公里到 20 公里不等. 本文在其中一条 20 公里的链路上开展了大量的实际测量工作,通过对实测数据的分析,发现了 802. 11n 长距离无线链路中数据帧的 CRC (Cyclic Redundancy Check) 出错特征. 据此可以设计帧内编码和帧间编码以提高数据帧的抗误码能力.

另外,对于 802. 11 这类多速率无线网络,在不同的链路状态下应该选择不同的 MCS (Modulation and Coding Scheme) 发送数据以提高链路吞吐率,即进行速率调整. 但是速率调整给编码带来很大困难,不同 MCS 下,丢包率和误比特率不同,如果采用固定的编码参数会极大降低编码的容错性能,因此要求编码也是链路自适应的.

基于此,本文提出了链路状态自适应的 FEC (Forward Error Correction) 编码算法 AdaCode. 设计目标是通过减少丢包重传和提高链路利用率来提升链路吞吐率. 基本思想是通过帧内编码提高数据帧的抗误码能力,尽可能把 CRC 出错的数据帧恢复出来;同时采用帧间编码提高数据帧的抗丢包能力,尽可能把丢失的数据帧也恢复出来. 帧内编码和帧间编码有机结合,有效降低丢包率,进而减少重传次数. 具体来讲,帧内编码采用 RS (Reed-Solomon) 码,而帧间编码采用喷泉码 LT (Luby Transform) 码. RS 码在 BER (Bit Error Rate) 较低时可以有效恢复帧内出错比特;而 LT 码是一种无速率码 (rateless code),能够通过持续发送编码后的数据帧,使得接收端接收到一定数量的编码帧后能恢复出丢失的数据帧.

如何根据链路状态动态调整帧内和帧间编码参数,以最小的编码冗余达到最优链路吞吐率,是要解决的关键问题. 在长距离无线链路中,由于多径衰落不明显、外部 WiFi 干扰弱,长距离链路状态可以用 RSSI (Received Signal Strength Indication) 来标识<sup>[3,4]</sup>. 利用这一特性,在大量实测数据的基础上建立了 802. 11n 不同 MCS 下的接收信号强度 RSSI 和帧内 BER 以及帧投递

率 PDR (Packet Delivery Ratio) 之间关系的模型. 在此基础上,AdaCode 根据当前链路状态动态选择最佳帧内和帧间编码的参数,使接收端能够实时解码出所有数据帧,从而避免超时重传,极大地提高了吞吐率,提升了网络性能. 为了提高链路利用率,AdaCode 在现有停等协议的基础上,充分利用 LT 码数据传输过程中无需反馈信号的无速率特点,增加了一次信道竞争成功传输数据帧的数目,有效降低了 ACK (Acknowledgement) 帧的数量.

在 MATLAB 上实现了 AdaCode,并使用实验床测得的真实 trace 进行仿真. 仿真结果表明不论是固定发送速率还是动态发送速率,AdaCode 有效吞吐率均比不使用编码时得到了有效提升.

本文的主要工作总结如下:(1)在实验床上通过大量的实测数据发现了 802. 11n 长距离无线链路数据帧丢失及帧内出错的特征;(2)针对此特征设计了链路状态自适应的 FEC 编码算法 AdaCode. 该算法通过建立链路状态和帧 PDR 及帧内 BER 间的模型,能够根据链路状态动态调整编码参数,以最小的冗余达到最大的链路吞吐率;(3)在 MATLAB 上实现了 AdaCode,并使用真实 trace 仿真验证了 AdaCode 的性能.

## 2 相关工作

本文从两个方面论述已有的研究工作:数据包出错模式和 FEC 编码的研究.

### 2.1 数据包出错模式的研究

这类研究工作通过大量实测数据分析数据包的出错模式,揭示出错的规律. 不仅有助于深入理解无线网络传输的特点,还能推断数据包出错的类型、出错位置等信息. 在此基础上设计 MAC 层编码、速率调整等算法能有效提升性能.

Han<sup>[5]</sup>等在室内实际环境中经过大量测量,分析了传统的 802. 11 无线局域网中 MAC 层数据包出错比特的分布,探讨了出错模式的成因. Jiayue Li 等<sup>[6]</sup>在室内搭建了由多个 802. 11n 节点组成的实验床,测量了在同频干扰和节点间有障碍物等多种情况下数据包的传输情况,并分析了比特位的出错模式. Zhenjiang Li 等<sup>[7]</sup>则利用信道状态信息 CSI (Channel State Information) 提出了 EVP (Error Event Probability) 参数,可以准确地估计出数据包出错比例和包中比特出错的位置. Renani 等<sup>[8]</sup>通过测量发现物理层对信号的低滤波会导致 MAC 层包的固定比特位的解码出错,基于此设计了对视频流的不等错误保护机制. Xie 等<sup>[9]</sup>针对 802. 11n 短距离传输中每个比特出错概率不同的特点,设计了不等保护机制 UnPKT,可以根据链路状态动态调整编码参数.

## 2.2 FEC 编码的研究

这类方法通过在物理层或 MAC 层应用 FEC 编码算法来提高数据的抗干扰性及纠错能力,减少出错重传,进而提高链路吞吐率<sup>[10,11]</sup>.

在物理层进行 FEC 编码比在 MAC 层开销少、效率高. Huang 等<sup>[12]</sup>提出的 CodeRepair,在物理层采用简单的奇偶校验法就能有效恢复出错包.但是在物理层编码需要硬件支持,难以在商用设备上实现. Bhartia 等<sup>[13]</sup>借助 CSI 获取各个子载波的信噪比,设计了 MAC 层的 FEC 编码算法. Angelopoulos 等<sup>[14]</sup>提出了无速率随机线性包间编码 PRAC,利用 PRAC 的代数一致性规则检验判定包中出错的部分.虽然 FEC 通过编码能提高数据包的抗干扰性,但是在误码率较高的链路由于开销大会降低效率,因此 Lin 等<sup>[15]</sup>提出了 ZipTx,低误码率时采用 RS 编码,高误码率时则进行丢包重传. Xie 等<sup>[16]</sup>则提出了一个更加轻量级的解决方案 Unite,根据出错的多少动态确定编码方案和重传内容.

受上述工作启发,本文针对 802.11n 长距离链路研究了 MAC 层数据包的出错模式,并针对性的设计了 FEC 编码算法 AdaCode. 全面考虑了数据包丢失和部分出错的情况,将帧间编码和帧内编码相结合,能有效提高数据包的纠错能力.

## 3 长距离无线链路数据帧出错模式

为了考察长距离无线链路的数据帧出错模式及其特点,在我们搭建的 802.11 长距离 mesh 网络实验床上选择了一条长 20 公里的链路,在卫星地图上的示意图如图 1(a) 所示. 因为这条链路所在环境和长距离无线 mesh 网络真实应用环境(人口稀少的偏远地区)最接近:它一端在天津理工大学新校区一个教学楼的楼顶,另一端在天津大学仁爱学院图书馆的楼顶. 链路的两个节点之间视线较好,不存在高大建筑遮挡,多为农田和村舍. 实验床上的其它 6 条长距离链路虽然都是户外视距,但都穿越了市区.

实验节点如图 1(b) 所示,节点采用 RouterStationPro 嵌入式平台,操作系统是 OpenWRT,内核为 Linux kernel 2.6. 配置了 30dBi 的高增益定向天线,UBNT SR71-A 无线网卡. 该网卡能支持  $3 \times 3$  MIMO (Multiple-Input Multiple-Output),但是实验中受所用天线的影,只能使用到  $2 \times 2$  MIMO,对应 MCS 0-15,其中 MCS 0-7 为单个空间流,MCS 8-15 为 2 个空间流,下文分别简称为单流和双流.

实验方法:在实验中,发送端采用 Pktgen 发送 UDP 数据包,遍历 MCS(0~15),不同的帧聚合长度 FA(Frame Aggregation)(1~32),以及两种信道带宽:40MHz 带宽



图1 实验床中的20公里长距离无线链路

(采用信道绑定)和 20MHz 带宽(不采用信道绑定). 其中 FA 从 1 到 32,步长为 2. 每组实验固定一种 MCS、FA 和信道带宽,测量 5 分钟,记录下接收端收到的数据帧的序列号和内容,是否出错及出错原因. 实验循环重复 3 次. 为了统计 MAC 层不同数据帧的接收状态,修改了无线网卡的驱动程序,使之能够反馈数据帧的出错原因和内容,否则所有出错的帧都会被丢弃.

### 3.1 数据帧出错模式

接收端统计到的数据帧的状态分为三类:成功接收(Correct)、接收到但是 CRC 校验错(CRC error)以及无法识别导致的完全损毁(Corrupted),后两者是构成丢包的主要原因. 图 2 表示 40MHz 带宽和 20MHz 带宽、帧聚合长度为 1 和 32 时不同 MCS 的数据帧的接收状态分布. 由于链路距离远(20 公里),节点发送功率有限,达不到 MCS 15 对 RSSI 的要求,因此 MCS 15 没有数据. 低 MCS 的几个,如 MCS 0,1,2,8,9,10 等则由于 RSSI 很高,投递率接近 100%,所以也没有数据显示. 实验中 FA 从 1 到 32,步长为 2,这里只节选了具有代表性的 1 和 32,其它设置的结果类似,不再一一列出. 图中横坐标表示 MCS,纵坐标为接收状态类型的百分比. 从图中可以看出,CRC 出错的比例要远高于完全损毁的比例. CRC 出错数据帧个数占总的丢包数(CRCerror + Corrupted)的比例大都在 50% 以上,有的甚至接近 100%(如 40MHz FA1 MCS3、12、13 等). 因此如果能够把 CRC 出错的数据帧恢复出来,能极大减少丢包重传的次数,进而提高链路吞吐率.

本文进一步分析了出错的数据帧中,帧内字节出错的比例以及出错位置. 图 3 是 40MHz 带宽时数据帧内字节出错比例的均值和方差. 可以看到对不同的 FA 长度,所有 MCS 的帧内字节出错比例平均值在 10% 以下,只有 MCS12 在 FA 为 32 时稍高一点,不到 11%. 方差大部分在 1 左右,最大不过 4.5. 带宽 20MHz 的结果和此一致. 这说明帧内出错的字节数很少,采用 FEC 编码纠错是可行的,而且会比较高效.

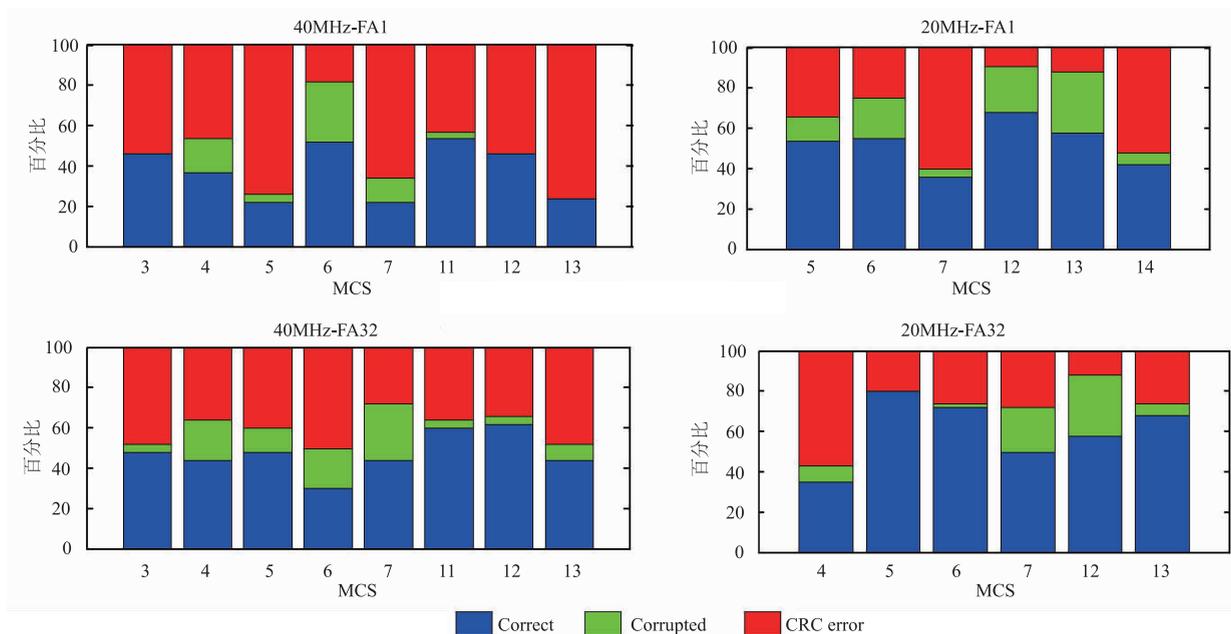


图2 接收端数据帧的状态分布

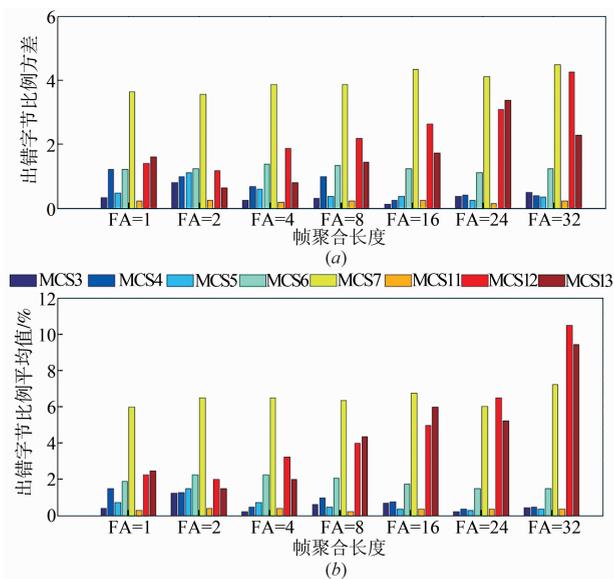


图3 40MHz 数据帧内字节出错比例的平均值和方差

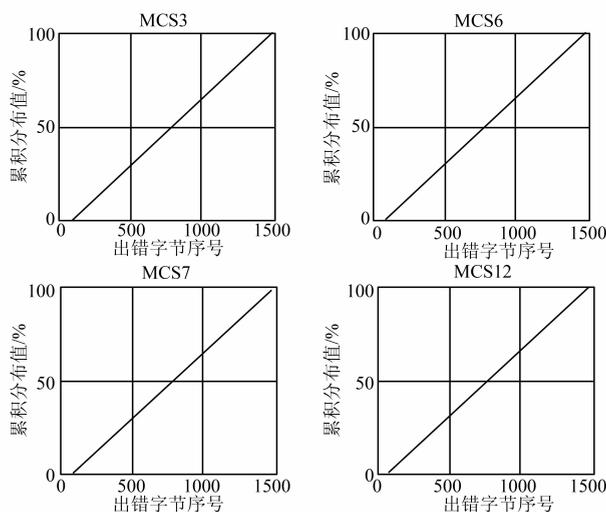


图4 40MHz 数据帧内字节出错比例的平均值和方差

图4 节选了 40MHz 带宽、帧聚合 FA 为 1 时 CRC 校验出错的数据帧中的出错字节位置分布. 其它 FA 取值以及 20MHz 带宽时的结果与此一致. 图中横坐标表示字节位置, 单帧的长度为 1500 字节; 纵坐标表示出错字节数量的累积概率分布. 从图中可以看出, 不管是单流还是双流, 出错字节的累计分布函数与该字节在数据帧中的序号(位置)几乎成线性关系, 说明出错位置是均匀分布的, 不存在某些位置更容易受损的情况. 因此所设计的 FEC 编码对每个字节的保护力度应该是相同的.

### 3.2 数据帧出错模式成因的探讨

测量所得的 802.11n 长距离数据帧出错模式和传

统室内短距离 802.11 链路有很大不同. 传统 802.11 的数据帧出错的比特分布是不均匀的<sup>[5]</sup>, 由于室内多径效应不同子载波的信噪比差别很大<sup>[13]</sup>. 然而本文在长距离链路上所测得的数据表明: 数据帧出错的比特位置服从均匀分布. 通过数据包的 CSI 信息进一步分析了各个子载波的信噪比 SNR (Signal to Noise Ratio), 不论是一个空间流还是两个空间流的情况, 接收端收到的各个子载波的信噪比几乎相同. 主要原因在于长距离链路的两个节点相距较远, 从不同路径反射的信号和主路径的信号走的路径长度相差不大, 因此多径效应不明显. 由于长距离 mesh 网络常部署在人口稀少的偏远地区, 外部 WiFi 源少, 因此信号干扰主要来源于信道

衰落. 信道衰落对帧内各个比特的影响相同, 所以帧内比特出错呈均匀分布.

本文实验数据只是一条 20 公里链路上测量得到的, 有它的局限性. 但是一方面这条链路所处的环境和长距离 mesh 网络的真实应用场景最接近, 都是人口稀少、外部 WiFi 干扰也少、中间没有遮挡的视距. 另一方面, 实验测量工作前后持续了将近一年时间, 所用的数据也是多个时间段测量所得, 它们在数据帧出错规律方面保持了高度的一致性. 因此这些数据也具有一定的代表性.

#### 4 AdaCode 算法设计

本文针对长距离链路中的数据帧出错模式和特点, 设计了链路状态自适应的 FEC 编码算法: AdaCode. 将帧内编码和帧间编码有机结合起来, 根据链路状态动态选择编码率, 以最小冗余解码出最多数据帧, 极大降低丢包导致的超时重传; 同时帧间编码采用喷泉码, 需要的反馈信息少, 能有效提高链路利用率.

AdaCode 编码和解码的原理如图 5 所示. 帧间编码选用喷泉码 LT 码<sup>[17]</sup>, 用于恢复链路中损毁的数据帧, 帧内编码采用 RS 码, 用于纠正数据帧在链路传输过程中出现的比特错误.

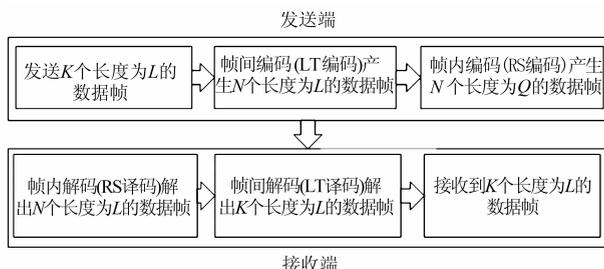


图5 AdaCode的原理

##### 4.1 帧间编码

帧间编码采用 LT 码, LT 码能以较低的复杂度实现编解码. 发送方源源不断地从待发送的原始数据帧中选择部分进行异或编码, 并发送出去. 接收端只要接收到一定数量的数据帧即可成功恢复出原始数据帧<sup>[18,19]</sup>. 因此编码率随链路状态动态变化. 同时 LT 码所需反馈信息少, 接收端恢复出所有数据帧后才给发送端发回 ACK 帧, 告知发送端可以发送下一组编码数据, 这一点能够有效提高信道利用率.

帧间编码 LT 码的编码率  $R_{LT}$  和链路丢包率  $P_e$  有关. LT 码的发送端发送  $K$  个原始数据帧, 首先要将  $K$  个原始数据帧异或成  $N$  个数据帧, 再进行发送, 因此编码率可以表示为:

$$R_{LT} = \frac{K}{N} \quad (1)$$

根据文献[17], 对于  $K$  个原始数据帧, 接收端只需

要成功接收  $K+5 \sim K+10$  个编码后的数据帧就能以近乎 100% 的概率完全解码. 考虑到链路的丢包, 为确保接收端能够正确解码出所有数据帧, 发送端发送的数据帧数为:

$$N = \frac{K+10}{1-\beta \times P_e} \quad (2)$$

其中  $P_e$  为链路丢包率,  $\beta$  是起调节预估作用的. 因为 AdaCode 的帧间解码在帧内解码的后面, 是解码过程的最后一步, 为了保证高解码率, 避免重传, 因此在帧间解码时增加一个调节预估参数  $\beta$ . 在实验中, 一般取 0.2, 能够有效防止重传.

将式(2)带入式(1), 可得:

$$R_{LT} = \frac{K(1-\beta \times P_e)}{K+10} \quad (3)$$

802.11n 长距离无线链路中, 丢包率可以根据当前链路的 RSSI 估计出来. 和传统短距离 802.11 链路不同, 在长距离无线链路中, 由于多径衰落不明显、外部 WiFi 干扰弱, 长距离链路状态可以用 RSSI 来标识<sup>[3]</sup>. 利用这一特性, 在大量实测数据的基础上建立了 802.11n 不同 MCS 下的接收信号强度 RSSI 和帧投递率 PDR 之间关系的模型. 如图 6 所示, 40MHz 带宽下单流和双流 RSSI-PDR 的关系图, 给定 RSSI, 每个 MCS 的 PDR 不同. 因此, 如果知道链路接收端的 RSSI, 和当前发送数据帧所用的 MCS, 就能预估出 PDR 和丢包率 ( $P_e = 1 - PDR$ ), 然后再根据实际测量值进行校正.

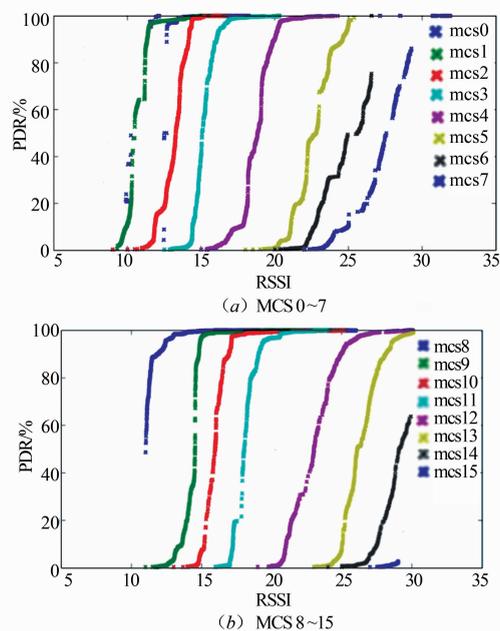


图6 40MHz长距离无线链路RSSI-PDR实测关系图

##### 4.2 帧内编码

AdaCode 帧内编码采用 RS 码. RS 码是一类具有很强纠错能力的线性分组码具有纠正随机错误及突发错

误的能力.

帧内编码 RS 码的编码率  $R_{RS}$  能够根据当前链路帧内误比特率  $P_b$  进行调整, 才能最大程度减小帧内编码带来的冗余, 从而最大限度提升吞吐率. 经过大量实验得到帧内误比特率  $P_b$  与 RS 码编码率  $R_{RS}$  的关系图, 如图 7 所示, 其中每个点代表的是对应帧内误比特率的数据帧完全恢复所对应的最大编码率. 将此关系进行最小二乘法线性拟合得到公式 4, 建立了帧内误比特率与 RS 码编码率之间的数学关系.

$$R_{RS} = 0.02 \times P_b + 1 \quad (4)$$

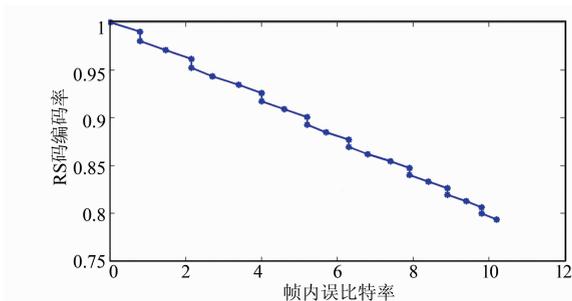


图7 帧内误比特率与RS码编码率的关系图

帧内误比特率  $P_b$  也可以由当前链路的 RSSI 估计出来. 本文经过大量实验得到了 RSSI- $P_b$  的关系模型, 其中 40MHz 带宽下单流和双流 RSSI- $P_b$  关系如图 8 所示. 在固定的 MCS 下, 每个 MCS 都有一个 RSSI 窗口  $[a, b]$ , 当  $RSSI \geq b$  时, RSSI 超过窗口上限, 则对于接收端来说, 投递率接近 100%, 意味着没有数据帧出错, 则误比特率  $P_b$  为 0; 当  $RSSI \leq a$  时, RSSI 小于窗口的下限, 则对于接收端来说, 投递率为 0 这时候链路状态最差, 即误比特率  $P_b$  最大. RSSI 在窗口内时, 则可以根据拟合的曲线初步估计出来, 然后再根据实际测得的值进行校正.

根据 RSSI- $P_b$  关系模型, 使帧内编码 RS 码的编码率能够根据链路的接收信号强度 RSSI 的变化而动态变化, 从而减少帧内编码冗余, 增加吞吐率.

### 4.3 链路状态自适应编码率的确定

IEEE 802. 11n 标准能够支持不同 MCS, 多种物理层速率. 在空间流数目不变的情况下, MCS 越大, 物理层速率越大. 实际使用中, 更多的时候物理层速率是动态变化的. 相同 RSSI 条件下, 选择不同的 MCS 可能导致不同的丢包率, 而丢包率的不同对 AdaCode 的编码率要求不同. 因此在 RSSI 已知的条件下, 能够得到多组 MCS 和 AdaCode 编码率选择方案. AdaCode 将预估编码率和物理层速率选择相结合, 从所有 MCS 中选择有效吞吐率最大的组合, 在保证数据传输可靠性的同时尽可能地提高信道利用率.

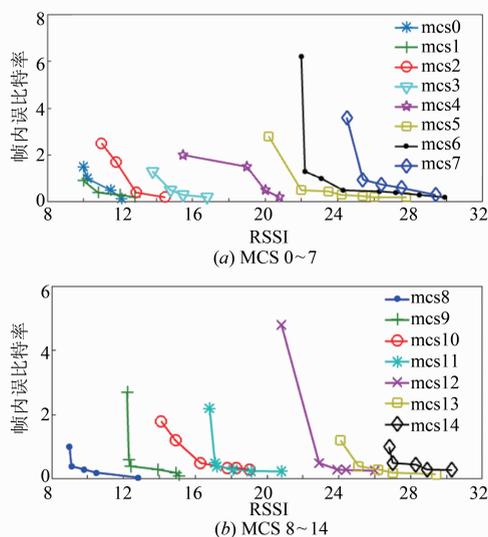


图8 40MHz下RSSI与帧内误比特率 $P_b$ 的关系图

## 5 性能评价

在 MATLAB 上实现了 AdaCode, 并使用真实 trace 进行仿真. 真实 trace 取自 802. 11n 长距离 mesh 网络实验床的一条 20 公里长的链路. 在该链路上使用 Pktgen 发送 UDP 数据包, 在接收端记录收到的每个数据包的下列信息: 接收到的时间、序列号、RSSI 值、接收状态 (CRC 出错、接收正确) 以及 CRC 出错数据帧的内容. 然后用此数据做为 trace 输入到 MATLAB, 对 AdaCode 进行仿真评价. 为真实记录丢包和出错的信息, 在无线网卡驱动中关闭了 MAC 层的重传功能. 开启了无线网卡的混杂模式, 使得出错的数据包也能上传到 MAC 层而不被丢弃.

首先在固定 MCS 的场景下进行性能评价, 然后考察 MCS 动态变化的场景.

### 5.1 固定 MCS 下的性能评价

MATLAB 仿真过程中每组发送的原始数据帧的个数  $K$  设为 100, 共发送 25 组数据帧. 在 40MHz 带宽下对单流和双流分别取 MCS4 和 MCS11 的情况进行评估和分析.

#### 5.1.1 单流 MCS 的性能评价

在单流 MCS 4 下, 对 AdaCode 的有效吞吐率和在长距离链路实验中实测平均有效吞吐率进行对比. 每组发送 100 个原始数据帧, 丢包率最低为 11%, 最高达到 35%, 平均丢包率为 22%. AdaCode 的编码率最小为 0.795, 最大达到了 0.851, 平均编码率为 0.813, 其中 RS 编码率平均为 0.985. 如图 9(a) 所示, 在 25 组发送过程中, 最大有效吞吐率达到了 64.22Mbps, 最小为 46.91Mbps, 平均达到 56.17Mbps. 最小的有效吞吐率为 66.96Mbps, 最大达到了 71.70Mbps, 平均的有效吞吐率

为 68.51,有效吞吐率比实测平均有效吞吐率提高了 21.9%.这主要是由于:一方面,基于 AdaCode 的 MAC 层采用连续发送和累积 ACK 的反馈方式,提高了信道利用率;另一方面,AdaCode 在 25 组发送过程中最终的丢包率始终为 0,即全部解码出了数据帧,没有超时重传.这两方面都使链路吞吐率得到有效提升.

### 5.1.2 双流 MCS 的性能评价

在双流 MCS11 下进行 MATLAB 的仿真.对 AdaCode 的有效吞吐率和在长距离链路实验中实测平均有效吞吐率进行对比.如图 9(b) 所示,在 25 组发送过程中,每组发送 100 个原始数据帧的丢包率,最低为 9%,最高达到 33%,平均丢包率为 20%.AdaCode 最小的编码率为 0.795,最大达到了 0.835,平均的编码率为 0.821,其中,RS 编码率平均为 0.986.能恢复出所有出错、损毁的数据包.实测有效吞吐率最小为 60.61Mbps,最大达到了 82.32Mbps,平均为 72.87Mbps.而 AdaCode 的有效吞吐率最小为 87.94Mbps,最大达到了 92.41Mbps,平均为 90.77Mbps,比实测平均有效吞吐率提高了 24.6%.

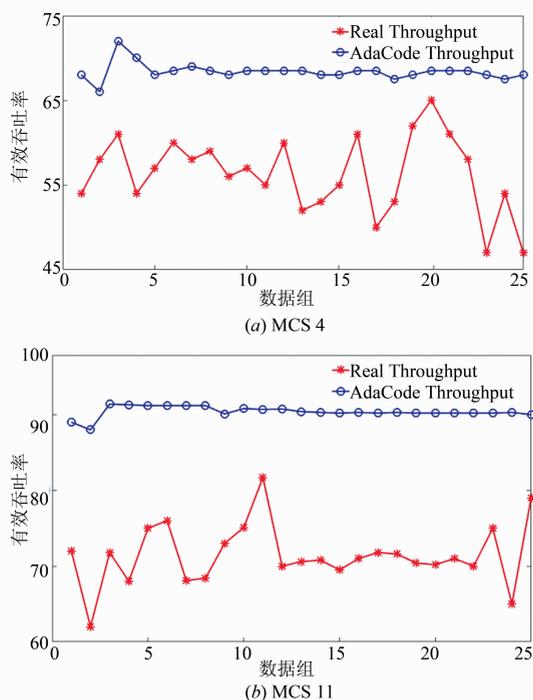


图9 MCS4和MCS11下AdaCode和实测平均有效吞吐率对比

### 5.2 动态 MCS 下的性能评价

在动态 MCS 场景下,将 AdaCode 与 RainbowRate<sup>[3]</sup>进行了比较. RainbowRate 是针对长距离无线链路设计的速率选择算法,优于其它适用于短距离链路的速率选择算法.

由于短时间内长距离链路的状态比较平稳, RSSI 变化不大,为了测试对链路状态的自适应性,在实验发

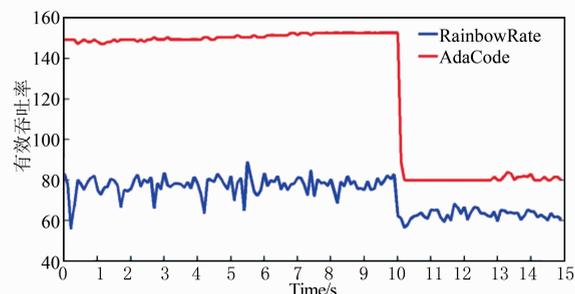


图10 AdaCode与RainbowRate的有效吞吐率对比

送过程中人为改变了发送功率,使得接收端 RSSI 发生一次剧烈变化.如图 10 所示,在这 15s 内, RainbowRate 有效吞吐率的范围是 [55.91, 88.95], 平均有效吞吐率为 72.50Mbps.而 AdaCode 的有效吞吐率范围是 [79.93, 152.64], 平均有效吞吐率为 127.75Mbps, 是 RainbowRate 的平均吞吐率的 1.76 倍.

## 6 总结

长距离无线 mesh 网络因其成本低带宽高,是偏远地区和人口稀疏地区网络接入的重要技术手段.论文在长距离无线 mesh 网络实验床上进行了大量实验测量,根据实测数据分析总结了长距离无线网链路的数据帧传输特性,并针对性地设计了链路自适应编码算法 AdaCode.采用真实网络数据对 AdaCode 进行了性能评测,验证了 AdaCode 能够有效提升长距离无线链路的吞吐率.该算法对提高长距离无线 mesh 网络的性能,推动其广泛应用具有重要意义.

在后续工作中,我们将在实际部署的长距离无线链路上开展测量工作,考察本文所观察到的帧出错模式的普遍性.

### 参考文献

- [1] KATIKALA S. Google project loon [J]. InSight: Rivier Academic Journal, 2014, 10(2): 1-6.
- [2] 赵增华,王楠,窦志斌,等.基于 IEEE 802.11 的长距离无线 Mesh 网络[J].计算机学报,2012,35(6):1209-1222. ZHAO Zeng-hua, WANG Nan, DOU Zhi-bin, et al. Long-distance IEEE 802.11 wireless mesh network: A survey [J]. Chinese Journal of Computers, 2012, 35(6): 1209-1222. (in Chinese)
- [3] ZHAO Z, ZHANG F, GUO S, et al. RainbowRate: MIMO rate adaptation in 802.11 n WiLD links[A]. IPCCC [C]. Austin, TX, USA: IEEE, 2014. 1-8.
- [4] RAMAN B, CHEBROLU K, GOKHALE D, et al. On the feasibility of the link abstraction in wireless mesh networks [J]. IEEE/ACM Trans on Networking, 2009, 17(2): 528-541.

- [5] HAN B, JI L, LEE S, et al. Are all bits equal?: experimental study of IEEE 802.11 communication bit errors [J]. IEEE Trans on Networking, 2012, 20(6): 1695 – 1706.
- [6] LI J, ZHOU Z, ZHANG C, et al. BEP: Bit error pattern measurement and analysis in IEEE 802.11 [A]. IEEE ICPCDS [C]. Melbourne, VIC, Australia: IEEE, 2015. 108 – 115.
- [7] LI Z, XIE Y, LI M, et al. Recitation: Rehearsing wireless packet reception in software [A]. ACM MOBICOM [C]. Paris, France: ACM, 2015. 291 – 303.
- [8] RENANI AA, HUANG J, XING G, et al. Harnessing hardware defects for improving wireless link performance: Measurements and applications [A]. IEEE INFOCOM [C]. Atlanta, GA, USA: IEEE, 2017. 1 – 9.
- [9] XIE Y, LI Z, LI M, et al. Augmenting wide-band 802.11 transmissions via unequal packet bit protection [A]. IEEE INFOCOM [C]. San Francisco, CA, USA: IEEE, 2016. 1 – 9.
- [10] YANG W, LI Y, YU X, et al. Rateless superposition spinal coding scheme for half-duplex relay channel [J]. IEEE Trans on Wireless Communications, 2016, 15(9): 6259 – 6272.
- [11] JAMIESON K, BALAKRISHNAN H. PPR: Partial packet-recovery for wireless networks [J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2007, 37(4): 409 – 420.
- [12] HUANG J, XING G, NIU J, et al. Coderepair: Phy-layer partial packet recovery without the pain [A]. IEEE INFOCOM-M [C]. Hong Kong: IEEE, 2015. 1463 – 1471.
- [13] BHARTIA A, CHEN Y C, RALLAPALLI S, et al. Harnessing frequency diversity in wi-fi networks [A]. ACM MOBICOM [C]. Las Vegas, Nevada, USA: ACM, 2011. 253 – 264.
- [14] ANGELOPOULOS G, MEDARD M, CHANDRAKASAN A P. Harnessing partial packets in wireless networks: through-hput and energy benefits [J]. IEEE Trans on Wireless Communications, 2017, 16(2): 694 – 704.
- [15] LIN K C J, KUSHMAN N, KATABI D. ZipTx: Harnessing partial packets in 802.11 networks [A]. ACM MOBICOM [C]. San Francisco, California, USA: ACM, 2008. 351 – 362.
- [16] XIE J, HU W, ZHANG Z. Revisiting partial packet recovery in 802.11 wireless lans [A]. ACM MobiSys [C]. Bethesda, Maryland, USA: ACM, 2011. 281 – 292.
- [17] STUDHOLME C, Blake I F. Random matrices and codes for the erasure channel [J]. Algorithmica, 2010, 56(4): 605 – 620.
- [18] 雷维嘉, 张梦, 谢显中. 基于度分布合并和可译集优化的 LT 码度分布设计方案 [J]. 电子学报, 2015, 43(4): 800 – 805.  
LEI Wei-jia, ZHANG Meng, XIE Xian-zhong. A design scheme for LT code degree distribution by combining degree distributions and optimizing ripple size [J]. Acta Electronica Sinica, 2015, 43(4): 800 – 805. (in Chinese)
- [19] 孙文珠, 王洪玉, 祝开艳, 等. 一种规则变量节点度 LT Codes 编码方案 [J]. 电子学报, 2014, 42(10): 1918 – 1924.  
SUN Wen-zhu, WANG Hong-yu, ZHU Kai-yan, et al. A novel encoding scheme for regular variable-node degree LT Codes [J]. Acta Electronica Sinica, 2014, 42(10): 1918 – 1924. (in Chinese)

#### 作者简介



刘康宁 男, 1992 年 3 月出生, 河北石家庄人. 天津大学智能与计算学部硕士研究生, 主要研究方向为无线(长距离) mesh 网络和无线 ad hoc 网络.

E-mail: lknwx@tju.edu.cn



赵增华(通信作者) 女, 1974 年 2 月出生, 河南南乐人. 天津大学智能与计算学部副教授. 主要研究方向为无线(长距离) mesh 网络, 无线 ad hoc 网络, 物联网和水下网络.

E-mail: zenghua@tju.edu.cn



王宇 男, 1991 年 2 月出生, 安徽宿州人. 天津大学智能与计算学部硕士研究生, 主要研究方向为无线(长距离) mesh 网络.

E-mail: 13920781632@163.com