

无线多媒体传感器网络并发传输性能建模及实验评估

余思翰^{1,2,3}, 张晓玲^{1,2}, 梁 炜^{1,2}

1. 中国科学院沈阳自动化研究所, 辽宁 沈阳 110016; 2. 中国科学院网络化控制系统重点实验室, 辽宁 沈阳 110016; 3. 中国科学院大学, 北京 100049

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61202418, 61172145); 中科院网络化控制系统重点实验室课题资助项目(WLHKZ2014011); 中国科学院科技创新交叉与合作团队计划资助项目

通信作者: 梁炜, weiliang@sia.cn 收稿/录用/修回: 2015-08-12/2015-10-13/2015-10-14

摘要

针对无线多媒体传感器网络(wireless multimedia sensor network, WMSN)在多路视频并发传输性能方面缺乏量化评估的问题, 对WMSN的并发性能进行了建模分析与实验验证. 首先利用排队论和概率论原理构造了一个基于IEEE 802.11的WMSN数据链路层延迟模型, 为实验提供理论依据. 而后实验测量了基于IEEE 802.11的WMSN在不同网络拓扑下, 不同因素(如距离、跳数、并发视频数)对视频评价指标(延迟、抖动、信道利用率)的影响. 理论及实验结果表明, IEEE 802.11协议仅能支持四路以下视频并发传输, 不适合高并发视频传输, 亟待开展WMSN专属协议及算法的研究.

关键词

IEEE 802.11
无线多媒体传感器网络
并发视频传输
延迟
中图分类号: TN919
文献标识码: A

Concurrent Transmission Performance Modeling of Wireless Multimedia Sensor Network and Its Experimental Evaluation

YU Sihan^{1,2,3}, ZHANG Xiaoling^{1,2}, LIANG Wei^{1,2}

1. Key Laboratory of Networked Control System, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;
2. Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;
3. University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract

Existing studies on wireless multimedia sensor networks (WMSNs) lack quantitative evaluations of concurrent video transmissions. In this study, we construct a model to analyze and validate the concurrent performance of the WMSN. First, in order to provide a theoretical basis for experiments, we construct a delay model on IEEE 802.11-based WMSN data link layer by utilizing queuing theory and probability theory. Then, the impacts of different factors (distance, hop count, and concurrent video count) on the video transmission quality (delay, jitter, and channel utilization) of the IEEE 802.11-based WMSN under different network topologies are measured. Theoretical and experimental results show that the IEEE 802.11 protocol can only support four concurrent video transmissions, which makes it unsuitable for high concurrent video transmissions. Therefore, specialized WMSN protocols and algorithms should be developed.

Keywords

IEEE 802.11;
wireless multimedia sensor network;
concurrent video transmission;
delay

1 引言

随着多媒体技术和无线通信技术的发展, 传统的仅能支持“一对一”、“一对多”视频传输的无线视频传输系统已无法满足大规模应用场景的需求. 在此背景下, 能够支持多路视频并发传输的WMSN应运而生.

由于针对WMSN的研究刚刚起步, 人们对WMSN的整体性能仍然缺少量化认知, 无法指导网络协议的设

计. 现有针对WMSN视频传输性能的研究大多基于仿真平台^[1-9]. 文[1-3]分别研究了视频编码方式、错误隐藏机制、无用帧丢弃机制等视频自身属性对于视频传输质量的影响. 文[4-7]分别研究了缓存大小、数据传输速率、网络吞吐率等硬件参数对于视频传输质量(延迟、抖动、丢包率、峰值信噪比)的影响. 文[8-9]研究了距离、障碍、移动、干扰等环境因素对于视频传输质量的影响.

然而, 基于仿真平台的实验结果往往过于理想化, 与

基于物理平台的实际结果存在较大差异^[10]。目前, 基于物理平台的研究较为少见^[11-15]。其中, 文[11-14]研究了报文长度、视频帧率、编码方式、传输协议等软件参数对于视频传输质量的影响。文[15]研究了多径效应对于视频传输质量的影响。

综上所述, 现有针对 WMSN 的研究尚不完善, 无法有效指导网络协议的设计。本文针对不同网络拓扑(点对点网络、线型网络和星型网络)结构下的视频传输性能进行了全面的分析和研究, 并进行了物理实验。本文贡献包括: (1) 针对并发视频传输构造了一个数据链路层延迟模型。(2) 实验测试了不同网络拓扑下的报文延迟、抖动和信道利用率, 并分析了多种因素对于视频传输质量的影响。(3) 针对如何有效利用网络资源以满足视频用户的体验质量(quality of experience, QoE)给出了相应指导。

2 数据链路层延迟建模

对于基于 IEEE 802.11 RTS/CTS 握手机制的 WMSN, 数据链路层的延迟主要由排队延迟和接入延迟两部分组成。需要指出的是, 延迟并不仅仅表示数据未按时到达, 它也反映了网络的整体性能, 如信道拥塞状况等。视频传输系统延迟较大时造成的后果绝不仅仅是视频滞后那么简单, 而是会造成画面停滞, 有时可达十几秒。

目前针对 IEEE 802.11 协议延迟的研究主要集中于接入延迟, 忽视了排队延迟。而针对排队延迟的研究大多面向 TDMA 协议, 而非 IEEE 802.11 协议。为此, 本文针对 IEEE 802.11 协议的排队延迟进行了建模, 将总延迟定义为排队延迟与接入延迟之和, 进而为后文实验性能评估提供理论参考。

2.1 排队延迟

排队延迟定义为数据帧从进入缓存队列到离开缓存队列所经历的时间。当系统处理速度一定时, 数据帧的排队延迟主要取决于位于该帧之前的正在排队的帧的数量。新进入数据链路层缓存队列的数据帧可能面临下列两种情况之一: (1) 缓存队列为空, 该数据帧可以率先接受服务。(2) 缓存队列中有其它数据帧正在排队, 该数据帧需要等

待其它数据帧成功发送后, 才能接受服务。

缓存队列是否为空, 即系统繁忙的概率, 取决于数据量及系统处理数据的能力。在某一时段内, 如果系统的处理速率大于数据帧进入缓存队列的速率, 则缓存队列为空; 否则, 缓存队列不为空。因此, 缓存队列不为空的概率可表示为

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu} \quad (1)$$

其中, λ 为数据帧的平均到达率, μ 为数据帧的平均离开率。

根据 Little 定理^[16], 当缓存队列非空时, 数据帧的平均数量为

$$\bar{L} = \lambda t \quad (2)$$

其中, t 为发送一个数据帧所需的平均时间, 可理解为两次发送数据帧之间的时间间隔。

当缓存队列为空时, 新到达的数据帧虽然可以率先接受服务, 但未必能够立即接受服务, 它也可能需要等待 t 时间, 原因在于: 虽然缓存队列为空, 但是系统可能刚刚从队列中取走了仅有的一个数据帧, 并且正在为其服务。因此, 当队列为空时, 新到达的数据帧平均需要等待的时间为 $(0 + t)/2$ 。

因此, 总的排队延迟为

$$T = \frac{(1 - \rho)t}{2} + \rho \bar{L} t \quad (3)$$

其中, $1 - \rho$ 表示缓存队列为空的概率; $t/2$ 表示当队列为空时, 数据帧的平均等待时间; ρ 表示缓存队列非空的概率; $\bar{L}t$ 是队列非空时数据帧的平均等待时间。

根据式(1)~(3), 可得到数据链路层的排队延迟为

$$T = \frac{\lambda^2 t^2}{\mu} + \frac{(\mu - \lambda)t}{2\mu} \quad (4)$$

2.2 接入延迟

接入延迟取决于信道的使用机制。基于 IEEE 802.11 RTS/CTS 机制的数据帧传输原理如图 1 所示。站点在发送数据之前需要发送 RTS 帧竞争信道使用权。因此, 接入延迟定义为站点竞争信道使用权所消耗的时间, 如图 1 阴影部分所示。接入延迟的建模过程参照文[17]所建立的模型, 涉及到的符号和缩略语如表 1 所示。

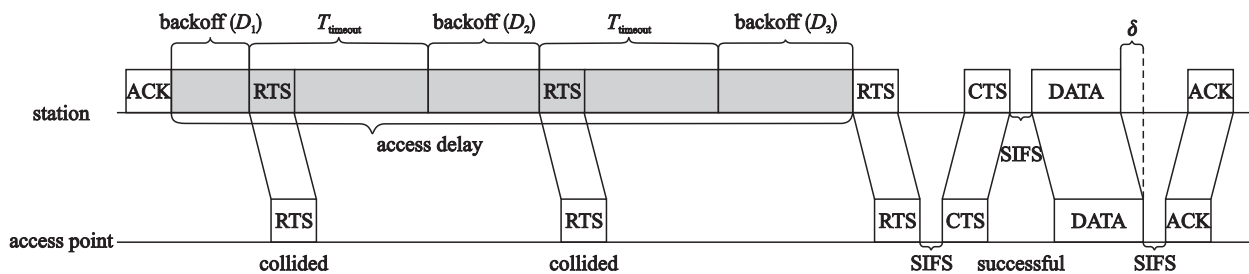


图 1 RTS/CTS 机制的数据包传输过程

Fig.1 Packet transmission with RTS/CTS mechanism

假设数据帧经过 i 次 RTS/CTS 尝试后发送成功, 则接入延迟 D 可以表示为

$$D = \sum_{j=1}^i D_j + (i - 1) \cdot T_{\text{timeout}} \quad (5)$$

其中, T_{timeout} 表示 CTS 响应超时的时间; D_j 表示第 j 次退避所等待的时间, 即退避计数器从开始倒计时到减为 0 的时间。

D 的条件期望值计算为

表1 符号描述
Tab.1 Notation description

缩写	描述
RTS/CTS	请求发送/允许发送
ACK	确认帧
DIFS	分布式帧间间隔
EIFS	扩展帧间间隔
SIFS	短帧间间隔
δ	传播延迟
R_{\max}	重传次数上限

$$E(D | D_1, D_2, \dots, D_{R_{\max}}) = \sum_{i=1}^{R_{\max}} P_i \cdot \left[\sum_{j=1}^i D_j + (i-1) \cdot T_{\text{timeout}} \right] \quad (6)$$

其中, P_i 表示数据帧在经历 i 次 RTS/CTS 尝试后发送成功的概率。

定义 p 为数据帧发生碰撞的概率, P_i 可以表示为

$$P_i = p^{i-1} \cdot (1-p) \quad (7)$$

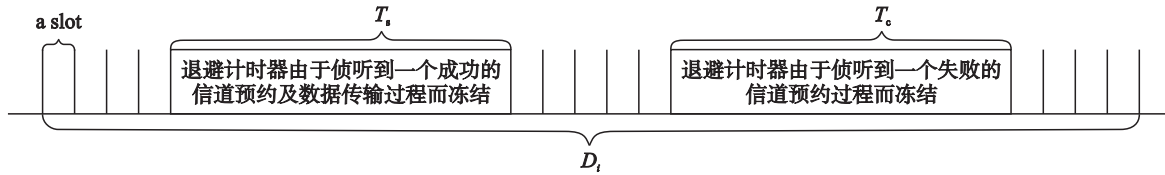


图2 计时器退避过程

Fig.2 Backoff process of the timer

根据 IEEE 802.11 协议的定义, T_c 、 T_s 和 W_i 可以表示为

$$\begin{cases} T_c = \text{EIFS} + \text{RTS} + \delta \\ T_s = \text{DIFS} + \text{RTS} + \delta + \text{SIFS} + \text{CTS} + \delta + \\ \quad \text{SIFS} + \text{DATA} + \delta + \text{SIFS} + \text{ACK} + \delta \end{cases} \quad (10)$$

$$W_i = \text{uniform}(0, 2^i \times w - 1) \quad (11)$$

其中, w 为最小竞争窗口 CW_{\min} 。

式(8)中的 $E(D_i)$ 可以由式(12)~(15)导出:

$$E(D_i) = E\left(\sum_{j=1}^{W_i} d_j\right) + E(W_i \cdot t_{\text{slot}}) \quad (12)$$

$$E\left(\sum_{j=1}^{W_i} d_j\right) = E(W_i) \cdot E(d_j) \quad (13)$$

$$E(W_i) = \begin{cases} \frac{2^{i-1} \cdot w - 1}{2}, & 1 \leq i \leq m \\ \frac{2^m \cdot w - 1}{2}, & m < i \leq R_{\max} \end{cases} \quad (14)$$

$$E(d_j) = T_c \cdot P_c + T_s \cdot P_s \quad (15)$$

其中, P_s 表示数据帧传输成功的概率, P_c 表示数据帧发生碰撞的概率, 可由式(16)算得

$$\begin{cases} P_s = n\tau(1-\tau)^{n-1} \\ P_c = 1 - (1-\tau)^n - n\tau(1-\tau)^{n-1} \end{cases} \quad (16)$$

其中, n 表示网络中站点的数量, τ 表示站点选中某个时隙进行数据发送的概率。根据文[18], τ 的值可以通过联立式(17)和(18)得到:

根据全期望公式, D 的平均值表示为

$$E(D) = E(E(D | D_1, D_2, \dots, D_{R_{\max}})) = D_\alpha + \sum_{i=1}^{R_{\max}} (p^{i-1} - p^{R_{\max}}) \cdot E(D_i) \quad (8)$$

其中, D_α 为

$$D_\alpha = \frac{p}{1-p} \cdot (1 - p^{R_{\max}} - R_{\max} \cdot p^{R_{\max}-1} + R_{\max} \cdot p^{R_{\max}}) \cdot T_{\text{timeout}}$$

根据图2所示过程, D_i 可表示为

$$D_i = \sum_{j=1}^{W_i} d_j + W_i \cdot t_{\text{slot}} \quad (9)$$

其中, d_j 表示当站点更新退避计数器数值时在第 j 个更新点所停留的随机冻结时间。当信道状态分别为空闲、发生碰撞和成功传输时, d_j 的值分别等于 0 、 T_c 、 T_s (如图2和式(10)所示)。 T_s 是站点成功预约信道并发送数据所用的时长; T_c 是站点预约信道时发生冲突所用的时长; t_{slot} 表示退避时隙的长度; W_i 是进行第 i 次重传时的退避计数器初始值。

$$\tau = \frac{2(1-2p)(1-p^{R_{\max}+1})}{A+B+C} \quad (17)$$

$$A: w(1-(2p)^{m+1})(1-p) \quad (17)$$

$$B: (1-2p)(1-p^{R_{\max}+1})$$

$$C: w \cdot 2^m p^{m+1} (1-2p) (1-p^{R_{\max}-m})$$

$$p = 1 - (1-\tau)^{n-1} \quad (18)$$

至此, 可以求得系统的平均接入延迟:

$$E(D) = D_\alpha + \frac{1}{2} (T_c \cdot P_c + T_s \cdot P_s + t_{\text{slot}}) \cdot \left[\frac{1-(2p)^m}{1-2p} w - \frac{1-p^m}{1-p} - (2^m-1)wp^{R_{\max}} + mp^{R_{\max}} + (2^m w - 1) \cdot \left(\frac{p^m - p^{R_{\max}}}{1-p} - R_{\max} p^{R_{\max}} + mp^{R_{\max}} \right) \right] \quad (19)$$

3 实验与分析

3.1 性能评价指标

本节从数据帧延迟、抖动、信道利用率三方面评价视频传输质量。3个性能评价指标分别定义如下。

(1) 延迟。延迟定义为从“源节点开始发送一个数据帧”到“目的节点完整接收这个数据帧”所耗费的时间。第 i 个数据帧的延迟表示为

$$\Delta T_i = T_{\text{ir}} - T_{\text{is}} \quad (20)$$

其中, T_{ir} 表示目的节点收到数据帧 i 的最后1个比特的时刻, T_{is} 表示源节点开始发送数据帧 i 的第1个比特的时刻。

本文实验中, 通过测量 RTT/2 统计延迟值, RTT 为往

返时延.

(2) 抖动. 抖动定义为延迟的变化量^[7], 即数据帧 i 和数据帧 $i-1$ 的延迟的差值. 第 i 个数据帧的抖动表示为

$$J_{i-1,i} = \Delta T_i - \Delta T_{i-1} \quad (21)$$

本文实验中, 抖动通过计算“相邻的两个数据包的延迟之差”的平均值获得.

(3) 信道利用率. 信道利用率定义为“单位时间内信道实际传输的数据量(实际数据传输率)”与“单位时间内信道可传输的最大数据量(最大数据传输率)”的比值, 表示为

$$U = \frac{DR_a}{DR_m} \quad (22)$$

其中, DR_a 表示实际数据传输率, DR_m 表示最大数据传输率. 由于实际数据传输率往往小于最大数据传输率, 因此 $0 \leq U < 1$.

本文实验中, IP 摄像机采用固定速率(2 Mb/s)发送视频数据. 当信道条件恶化时, 真实的数据发送速率将会小于 2 Mb/s. 因此, 本文对信道利用率进行如下归一化: 如果 IP 摄像机的数据发送速率达到 2 Mb/s, 则认为信道利用率达到 100%. 在实验中, 信道利用率可由 Wireshark 软件测得.

3.2 实验设置

实验中使用的软硬件及参数取值如表 2 和表 3 所示.

表 2 硬件设置
Tab.2 Hardware setting

名称	数量	型号
笔记本电脑	1	Thinkpad T420
网络摄像机	6	EZVIZ C2
无线路由器	3	TL-WR881N

表 3 软件设置
Tab.3 Software setting

名称	描述
操作系统	Windows 7
抓包软件	Wireshark
视频客户端	IVMS-4000 (V2.0)
视频参数	格式: H.264
	比特率: 2 Mb/s
	帧率: 25 f/s
	分辨率: 1 280 × 960

3.3 实验过程与结果分析

本节分别实验测量了点对点网络、线型网络、星型网络结构下的视频传输质量.

3.3.1 点对点网络实验

(1) 场景描述. 实验场景由一个网络摄像机和一个接入点(无线路由器)构成, 如图 3 所示. 摄像机与接入点以无线方式连接, 视频经一跳直接传回接入点. 摄像机和接入点之间的距离变化为: 从 10 m 增加至 100 m. 测量不同距离情况下的延迟、抖动、信道利用率.



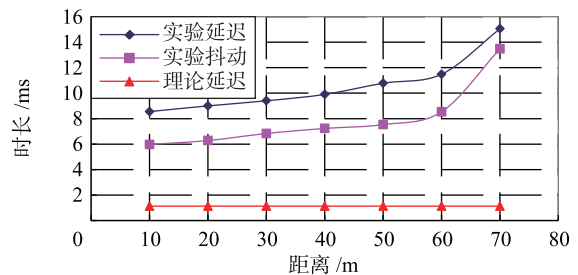
图 3 点对点网络拓扑

Fig.3 Topology of peer-to-peer network

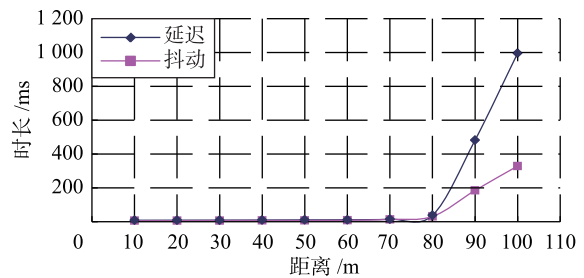
(2) 结果分析. 不同距离下, 点对点网络的数据链路层延迟和抖动变化情况如图 4 所示. 其特征如下: 在无线网络信号覆盖范围内, 延迟和抖动增长缓慢; 在无线网络信号覆盖边缘, 延迟和抖动突然增加.

当摄像机与接入点之间的距离从 10 m 增加至 70 m 时, 延迟和抖动增长缓慢, 如图 4(a) 所示, 延迟增长了 6.5 ms, 抖动增长了 7.5 ms. 理论延迟几乎没有改变, 因为理论延迟的计算基于“无线信号无衰减”这一假设.

当距离从 80 m 增加至 100 m 时, 延迟和抖动急剧增长, 如图 4(b) 所示, 延迟增长至 996 ms, 抖动增长至 328 ms. 在该状态下, 视频发生了停滞, 原因是信号衰减.



(a) 10 m~70 m 延迟及抖动变化情况



(b) 10 m~100 m 延迟及抖动变化情况

图 4 距离对延迟及抖动的影响

Fig.4 Effect of distance on delay and delay jitter

不同距离下, 点对点网络的信道利用率变化情况如图 5 所示. 信道利用率的变化特点与延迟和抖动相似, 当距离从 10 m 增加至 70 m 时, 信道利用率从 99.53% 下降至 99.02%, 变化幅度微小, 如图 5(a) 所示. 但是当距离从 80 m 增加至 100 m 时, 信道利用迅速下降至 26.94%, 如图 5(b) 所示. 信道利用率发生突变的原因也与信号覆盖范围有关.

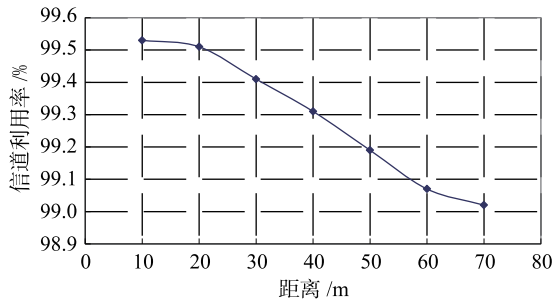
延迟和抖动的分布情况如图 6 所示. 二者的分布呈多峰函数, 而非正态分布. 相似的结论在文[19]中也有论述.

延迟的分布通常由 1 个主峰和 2~3 个副峰组成. 主峰的位置取决于当时的网络拥塞状况. 抖动的分布特征与延迟相似, 抖动的主峰与延迟的主峰位置相近, 但抖动的副峰数量通常比延迟多, 这表明抖动的变化情况比延迟的

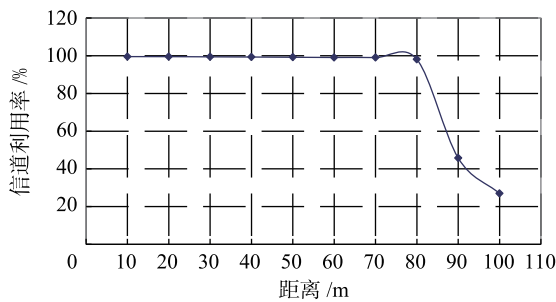
变化状况更不稳定。

3.3.2 线型网络实验

(1) 场景描述. 实验场景由一个网络摄像机和多个中继站点组成, 如图 7 所示. 各站点之间相距 10 m, 以无线方式连接, 视频经过多跳传回主机. 由于本实验希望测量跳数对视频传输质量的影响, 因此各站点之间相距较近, 可保证信号不会因距离过大而衰减, 影响实验结果. 实验中, 将中继站点的数量从 0 增加至 3, 即线性网络总长度从 10 m 增加至 40 m, 以测试 1~4 跳情况下的视频传输质量.



(a) 10 m~70 m信道利用率变化情况



(b) 10 m~100 m信道利用率变化情况

图 5 距离对信道利用率的影响
Fig.5 Effect of distance on channel utilization

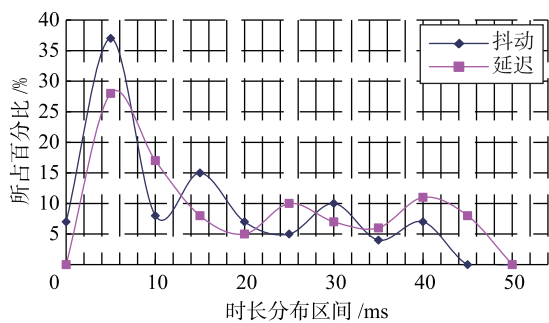


图 6 延迟及抖动分布情况

Fig.6 Distribution of delay and delay jitter



图 7 线型网络拓扑

Fig.7 Topology of linear network

(2) 结果分析. 不同跳数下, 线型网络的数据传输延

迟和抖动变化情况如图 8 所示. 二者呈现近似线性增长趋势. 原因在于: 每个中继节点需要一定的时间来接收、处理和转发视频, 总的延迟和抖动近似等于每个中继节点的延迟和抖动之和, 而且总延迟和抖动随着跳数增加而累加.

不同跳数下, 线型网络的信道利用率如图 9 所示, 信道利用率呈现近似线性下降趋势. 当跳数从 1 增长至 4 时, 信道利用率从 99.53% 下降至 98.07%, 下降幅度较小. 其原因是: 线型网络仅传输一路视频, 独占 2 Mb/s 带宽, 远远没有达到中继站点的传输能力上限. 因此, 每个中继站点都有足够的带宽传输该视频, 不存在信道拥塞问题.

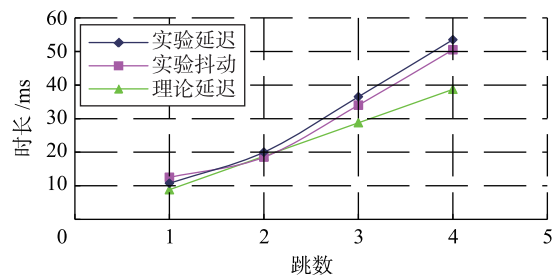


图 8 跳数对于延迟及抖动的影响

Fig.8 Effect of hops on delay and delay jitter

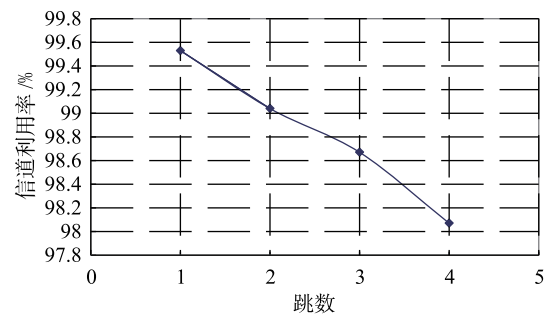


图 9 跳数对信道利用率的影响

Fig.9 Effect of hops on channel utilization

3.3.3 星型网络实验

(1) 场景描述. 实验场景由多个网络摄像机和 1 个接入点组成, 如图 10 所示. 多个摄像机以正多边形的方式坐落于接入点周围, 以无线方式与接入点相连, 视频数据经一跳发送到接入点. 接入点与主机之间采用有线连接方式. 摄像机与接入点之间相距 10 m, 采用距离较近的实验方案, 既可以防止信号衰减对实验结果产生影响, 又可以保证 6 个摄像机发送的信号可以相互干扰, 便于测试并发视频传输的效果. 实验中, 设置多个摄像机同时发送视频数据, 以模拟并发传输. 摄像机数量从 1 个增加至 6 个, 测试并发数对于星型网络延迟、抖动、信道利用率的影响.

(2) 结果分析. 并发视频传输对星型网络数据链路层延迟和抖动的影响如图 11 所示. 延迟和抖动随着视频数量的增加而增加. 其中, 延迟从 13 ms 增加至 311 ms, 抖动从 11.75 ms 增加至 309.25 ms. 二者数值相近, 差值在 15 ms 以内.

并发视频传输对星型网络信道利用率的影响如图 12 所示. 信道利用率随着视频数量的增加而降低, 且下降速

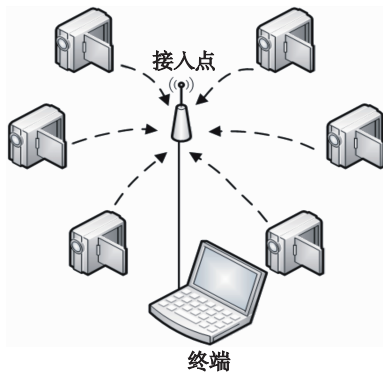


图 10 星型网络拓扑

Fig.10 Topology of star network

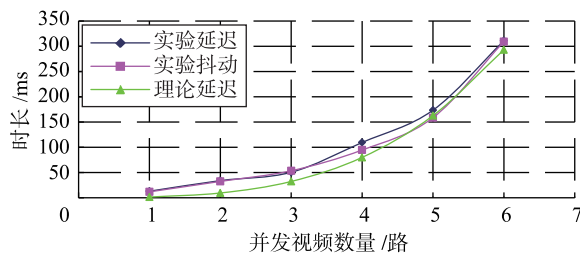


图 11 并发传输对延迟及抖动的影响

Fig.11 Effect of concurrent transmission on delay and delay jitter

度很快, 从 98.82% 快速下降至 45.63%, 3 项实验中, 星型网络的并发视频传输对于延迟、抖动、信道利用率的影响最为显著, 表明 IEEE802.11 协议承受并发视频传输的能

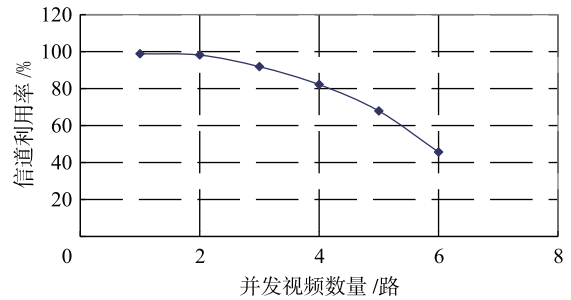


图 12 并发传输对信道利用率的影响

Fig.12 Effect of concurrent transmission on channel utilization

力较差, 在支持多点并发传输时性能衰退严重, 这是由于 IEEE 802.11 协议的竞争机制所造成的. 为此, 本文提出的建议是: 在进行高并发无线视频传输时, 网络设计者应该采用分层的方式, 部署较多的接入点进行分流, 以缓解信道争用带来的性能快速衰退问题.

4 结束语

本文针对基于 IEEE 802.11 的 WMSN 的视频并发传输性能进行了建模与实验分析. 利用排队论和概率论原理建立了数据链路层延迟模型, 并实验测试了典型 WMSN 拓扑结构(点对点网络、线型网络及星型网络)下的视频传输质量. 实验结果表明, 目前的 IEEE 802.11 协议不适合多路视频并发传输, 亟待开展相关专属协议的开发工作. 下一步将设计适合高并发无线视频传输的 MAC 协议, 以满足视频用户的需求.

参考文献

- [1] Yoon Y, Kim M, Lee S, et al. Performance analysis of H.264/AVC, H.264/SVC, and VP8 over IEEE 802.11 wireless networks[C]//IEEE Symposium on Computers and Communications. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2012: 151 - 156.
- [2] Xiao Y, Zhang Y, Nolen M, et al. A cross-layer approach for prioritized frame transmissions of MPEG-4 over the IEEE 802.11 and IEEE 802.11e wireless local area networks[J]. Systems Journal IEEE, 2011, 5(4): 474 - 485.
- [3] Gatimu K, Lee B, Lee T W, et al. Weighted nearest valid motion vector averaging for spatial motion vector recovery in wireless HD video transmission using H.264 over WLANs[C]//2013 Fourth International Conference on the Network of the Future (NOF). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2013: 1 - 6.
- [4] Sendrei L, Valiska J, Marchevský S. H.264 video transmission over wlan in Opnetmodeller[J]. Journal of Electrical Engineering, 2013, 64(2): 112 - 117.
- [5] Claudio D C M, Roberto D L G P. Improving video quality in 802.11 networks[C]//INFOCOM Workshops. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2009: 1 - 6.
- [6] Li D, Pan J. Performance evaluation of video streaming over multi-hop wireless local area networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2010, 9(1): 338 - 347.
- [7] Cocoradal S, Szekely I. Simulation-based performance analysis of multicast transmissions in an 802.11g WLAN[C]//International Symposium on Signals, Circuits and Systems. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2007: 1 - 4.
- [8] Ennaji Y, Boulmalf M, Alaoui C. Experimental analysis of video performance over wireless local area networks[C]//International Conference on Multimedia Computing and Systems. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2009: 488 - 494.
- [9] Hayajneh T, Al-Mashaqbeh G. Multimedia traffic over WLANs: QoS support and performance evaluation[C]//5th International Conference on Information and Communication Systems. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2014: 1 - 6.
- [10] Kostuch A, Gierłowski K, Wozniak J. Performance analysis of multicast video streaming in IEEE 802.11 b/g/n testbed environment[M]//Wireless and Mobile Networking. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2009: 92 - 105.
- [11] Cranley N, Davis M. Performance evaluation of video streaming with background traffic over IEEE 802.11 WLAN networks[C]//Wireless Multimedia Networking and Performance Modeling. New York, NJ, USA: ACM, 2005: 131 - 139.
- [12] Gierłowski K, Kostuch A, Wozniak J, et al. Testbed analysis of video and VoIP transmission performance in IEEE 802.11 b/g/n networks

- [J]. Telecommunication Systems, 2011, 48(3/4): 247 – 260.
- [13] Adeyemi-Ejeye A O, Walker S D. Ultra-high definition Wireless Video transmission using H.264 over 802.11n WLAN: Challenges and performance evaluation[C]//12th International Conference on Telecommunications. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2013: 109 – 114.
- [14] 陈亮, 顾翔. 基于混合流拥塞控制的 Ad Hoc 网络视频传输[J]. 信息与控制, 2015, 44(2): 135 – 141.
Chen L, Gu X. Ad Hoc network video transmission based on hybrid flow congestion control[J]. Information and Control, 2015, 44(2): 135 – 141.
- [15] Rehman S U, Turletti T, Dabbous W. Multicast video streaming over WiFi networks: Impact of multipath fading and interference[C]//IEEE Symposium on Computers & Communications. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2011: 37 – 42.
- [16] 胡奇英. 随机运筹学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2012: 5 – 28.
Hu Q Y. Stochastic operations research[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2012: 5 – 28.
- [17] Li Y, Wang C, Long K, et al. Modeling channel access delay and jitter of IEEE 802.11 DCF[J]. Wireless Personal Communications: An International Journal, 2008, 47(3): 417 – 440.
- [18] Wu H, Peng Y, Long K, et al. Performance of reliable transport protocol over IEEE 802.11 wireless LAN: Analysis and enhancement[J]. Proceedings – IEEE INFOCOM, 2002, 2(2): 599 – 607.
- [19] 毕经平, 吴起, 李忠诚. Internet 中的包延迟分布与包丢失关系研究[J]. 计算机工程, 2002, 28(10): 20 – 22.
Bi J P, Wu Q, Li Z C. Study on the relationship between packet delay distribution and packet loss on internet[J]. Computer Engineering, 2002, 28(10): 20 – 22.

作者简介

余思翰(1990 –), 男, 硕士生. 研究领域为工业无线网络.
 张晓玲(1982 –), 女, 博士, 副研究员. 研究领域为工业无线网络.
 梁 炜(1974 –), 女, 博士, 研究员. 研究领域为工业无线网络, 无线传感器网络等.

(上接第 319 页)

- [19] Alfaro V M, Vilanova R. Robust tuning and performance analysis of 2DoF PI controllers for integrating controlled processes[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2012, 51(40): 13182 – 13194.
- [20] Skogestad S. Simple analytic rules for model reduction and PID controller tuning[J]. Journal of Process Control, 2003, 13(4): 291 – 309.

作者简介

李 敏(1990 –), 女, 硕士生. 研究领域为多变量过程控制及优化.
 王 琪(1969 –), 男, 硕士生. 研究领域为复杂工业对象的鲁棒内模控制方法研究与应用.
 靳其兵(1971 –), 男, 教授, 博士生导师. 研究领域为先进控制, 过程建模及优化, 多变量过程控制.

(上接第 327 页)

- [19] Rasool F, Nguang S K, Krug M. Robust H_{∞} output feedback control of networked control systems with multiple quantizers[C]//Proceedings of Industrial Electronics and Applications. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2011: 1541 – 1546.
- [20] Wang Z D, Yang F W. Robust H_{∞} control for networked systems with random packet losses[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2007, 37(4): 916 – 922.

作者简介

刘 艳(1990 –), 女, 硕士生. 研究领域为网络化控制系统.
 潘 丰(1963 –), 男, 博士, 教授. 研究领域为生产过程建模、优化与控制.