

流间网络编码中的自适应通知报文发送机制*

杨 湘^{1,2}, 王伟平¹, 王建新¹

(1. 中南大学 信息科学与工程学院, 湖南 长沙 410083;
2. 武汉科技大学 计算机科学与技术学院, 湖北 武汉 430081)

摘要:流间网络编码机制需要借助通知报文来确定编码机会, 现有的机制一般采用“ τ 间隔通知机制”, 但对通知间隔 τ 的选取及其导致的开销并未进行分析。通过分析“ τ 间隔通知机制”所产生的通信开销及其对编码机会和吞吐量的影响, 提出一种自适应通知报文发送机制。在自适应通知报文发送机制中, 无线节点根据局部网络的流量自适应地确定发送间隔, 且通知报文仅携带最近 2 个通知间隔侦听到的数据包信息, 在保证编码机会的情况下降低通知报文中携带的信息量和通知报文的发送频度, 从而降低附加开销和冲突。网络模拟器仿真实验结果表明: 自适应通知报文发送机制能有效地减少通知报文发送的额外带宽开销, 取得比采用“ τ 间隔通知机制”的流间编码机制更高的吞吐量。

关键词:流间网络编码; 侦听数据包; 通知报文

中图分类号:TP393 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2017)02-120-08

Adaptive reception reports sending mechanism in inter-session network coding

YANG Xiang^{1,2}, WANG Weiping¹, WANG Jianxin¹

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

2. School of Computer Science and Technology, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China)

Abstract: The existing inter-session network coding mechanisms almost unanimously adopt “ τ -interval-notification”, which is used to determine the coding opportunities, and its overhead has not been analyzed. In the current study, its communication overhead and its impacts on coding opportunity and throughput were analyzed, and an adaptive reception report sending mechanism called AR²SM (Adaptive Reception Reports Sending Mechanism) was proposed. In AR²SM, the interval of broadcasting reception reports is determined adaptively according to the traffic of local network, and the reception reports carry the packets overheard in the last 2 intervals. As a result, the size of reception report and the frequency of sending reception report were both reduced on the condition of guaranteeing the coding opportunity. According to the simulator results in network simulator, the proposed mechanism reduces the overhead of transmitting the reception reports, and achieves higher throughput than the “ τ -interval-notification” mechanism.

Key words: inter-session network coding; overheard packet; reception report

无线网络固有的广播和易于侦听的特性, 使得网络编码技术能够很好地应用于无线网络环境, 提高了网络的吞吐能力。2006 年 Katti 等提出了一种实用的无线网络机会网络编码机制 COPE^[1]。COPE 借助于发现属于不同流的数据包之间的编码关系, 在一跳范围内完成编码和解码操作, 能够减少编码节点的传输次数, 提升网络的整体吞吐量。由于 COPE 中参与编码的数据包均来自不同数据流, 因此这一类机制被称为“流间编码机制”。

流间编码机制中, 编码节点需要借助其邻居节点发送的通知报文来确定编码机会。本文对现有的通知报文发送机制传输通知报文所产生的额外带宽开销进行了定量分析, 并通过仿真实验考察了不同的通知间隔 τ 下的额外带宽及其对编码机会和网络吞吐量等性能指标的影响。在此基础上, 提出了一种自适应调整通知间隔, 同时减少发送冗余的自适应通知报文发送机制 (Adaptive Reception Report Sending Mechanism, AR²SM)。

* 收稿日期: 2015-11-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61173169, 61402542, 61502359)

作者简介: 杨湘 (1980—), 男, 湖南娄底人, 博士研究生, E-mail: yangxiang1027@163.com;

王伟平 (通信作者), 女, 教授, 博士, 博士生导师, E-mail: wpwang@mail.csu.edu.cn

1 相关工作

COPE 机制被提出之后,人们针对流间编码机制进行了大量的研究。一类研究工作集中在编码方案的设计和性能分析上。文献[2]分析了流的数量对吞吐量的影响,并基于“编码对齐(code alignment)”提出了一种编码机制,有效地提高了网络的吞吐量。文献[3]提出了将流内编码和流间编码相结合的编码机制,有效地提高了吞吐量。文献[4]推导出了确定编码系统的吞吐量区域公式以及随机编码系统中有编码限制条件的吞吐量公式,并在此基础上提出了在两种编码系统中简单有效的编码策略。文献[5]研究了在不同网络场景下单条多播流和多条单播流的编码收益问题。文献[6]提出了一种无线网络中将数据包与反向的确认(ACKnowledgement, ACK)数据包编码的机制,以进一步提高吞吐量的增益和能量利用的效率。文献[7]分析了编码延时对 IEEE 802.11s 网络中传输控制协议(Transmission Control Protocol, TCP)流编码增益的影响,并在此基础上提出了一种动态调整编码延时的机制,能在保证编码效率的前提下有效地降低编码延时。文献[8]则分析了引入网络编码机制后数据包大小所带来的开销,并提出了一种数据包分解的方法,以降低因数据包大小不同带来的编码开销。

另一类研究工作的出发点在于更多地利用流间网络编码机会来提高吞吐量,在寻找路由时将编码机会作为路由度量值的计算指标之一,更多地增加传输路径上的编码机会,并提出了一系列的基于编码机会感知的路由协议。文献[9]提出了一种马尔科夫路由指标,并将其用于已部署编码机制的网络中,有效节约了发送数据的带宽消耗,同时提高了网络的吞吐量。分布式编码感知路由协议(Distributed Coding-Aware Routing, DCAR)提出了一种分布式的基于编码机会感知的路由协议,利用网络编码的优势提高网络的整体吞吐量^[10];CORE 通过将逐跳机会转发和流间编码相结合,达到提高吞吐量的目的^[11];文献[12]在考虑链路丢包的条件下,提出了一种联合网络编码、调度以及路由的控制策略,能有效提高网络吞吐量;文献[13]考虑了网络安全的因素,从理论上分析了易受攻击的网络中网络编码相对于传统路由协议的增益,并给出了应用编码感知路由协议的边界条件。

上述研究工作都沿用了 COPE 中采用的“ τ 间隔通知机制”,即节点每隔 τ 秒生成一个通知

报文(reception report)广播给邻居节点,通知报文中包含本节点侦听到的数据包的编号,邻居编码节点便可根据此通知报文来决定哪些数据包能进行编码发送。在之前的研究工作中,都没有对“ τ 间隔通知机制”所产生的开销进行分析,而这在实际编码机制的设计中是面临的重要问题之一。 τ 的取值过小会使得通知报文的发送过于频繁,不仅会增加传输通知报文所消耗的网络带宽,还会增加无线网络中产生冲突的概率;而 τ 取值过大会让通知报文的发送速度变慢,节点不能及时获得邻居侦听到数据包的信息而减少编码机会,降低网络的有效吞吐量。

2 “ τ 间隔通知机制”的代价分析

2.1 “ τ 间隔通知机制”以及通知报文格式

图 1 为流间编码的示例图。在该场景中,数据包 p_1 从节点 n_1 经由 n_3 发往 n_4 ,数据包 p_2 从节点 n_2 经由 n_3 发往 n_5 ,节点 n_5 和 n_4 分别能侦听到数据包 p_1 和 p_2 。每个节点都会将最近侦听到的数据包以固定时间间隔 τ 秒生成通知报文发送给邻居节点。在此例中,当 n_5 和 n_4 的通知报文到达 n_3 时, n_3 知道数据包 p_1 和 p_2 存在编码机会,从而发送编码包 $p_1 \oplus p_2$,当 n_4 和 n_5 接收到此编码包后便能解码得到数据包 p_1 和 p_2 。COPE 中节点每 τ 秒生成通知报文,其中包含最近 T 秒(COPE 中 T 默认值为 0.5 s)内侦听到的数据包的编号,并将通知报文携带在正常发送的数据包发送给邻居节点;如果 τ 秒内没有发送数据包,则生成仅包含通知报文的数据包,广播给邻居节点,这种机制被称为“ τ 间隔通知机制”。

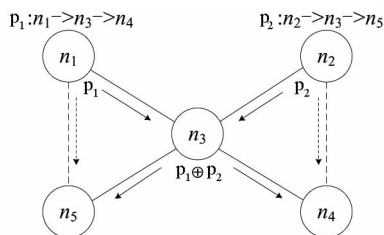


图 1 “ τ 间隔通知机制”示例图

Fig. 1 Diagram of “ τ -interval-notification” mechanism

“ τ 间隔通知机制”中,通知报文作为编码层头部的一部分,其格式如图 2 中的“Reception Reports”所示。这部分由一个 REPORT_NUM 和多条 $\langle \text{SRC_IP}, \text{LAST_PKT}, \text{BIT_MAP} \rangle$ 记录组成。REPORT_NUM 表示记录的条数,长度为 2 个字节;每条记录中 SRC_IP 表示数据包的源地址, LAST_PKT 表示数据包的编号, BIT_MAP 是由 8

位“0”或“1”组成的字符串。每条记录反映了从节点 SRC_IP 发出的连续 9 个数据包是否被侦听到的状况。其中最近被侦听到的数据包为 LAST_PKT, 它之前的 8 个数据包的状态则分别对应 BIT_MAP 中的 8 位, 1 表示被侦听到, 0 表示没有。例如, 记录 < 128.0.1.9, 50, 10000001 > 表示从节点 128.0.1.9 接收到的最新的数据包编号是 50, 同时从 42 号到 49 号的数据包中, 只有 42 号和 49 号数据包被侦听到。

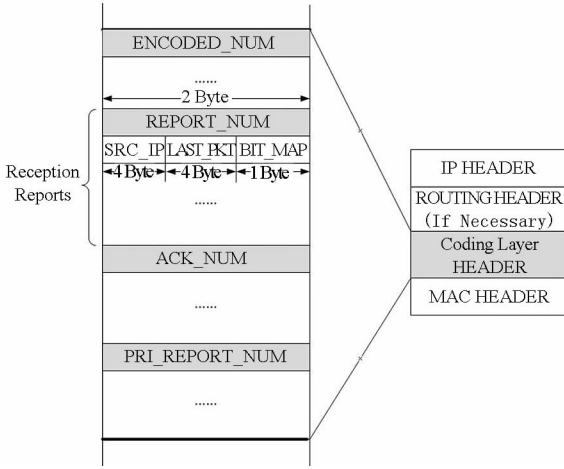


图 2 通知报文格式^[1]

Fig. 2 Format of reception report^[1]

2.2 额外带宽分析

在以往的研究中, 都没有对传输通知报文带来的附加开销做过分析, 通常认为其代价是可以忽略的。本节中主要对节点发送通知报文带来的额外带宽进行分析。

定理 假设节点最近 T 时间内侦听到的流的数目为 l , 侦听到第 i 条流的速率为 $r_i (1 \leq i \leq l)$, 链路成功传输概率为 p , 数据包大小均值为 w 。定义额外带宽为单位时间内发送通知所需的字节数, 那么在“ τ 间隔通知机制”中, 单个节点发送通知报文带来的额外带宽为:

$$C_\tau = \frac{2 + \sum_{i=1}^l \lceil r_i \cdot T / (9 \cdot p \cdot w) \rceil \cdot 9}{\tau} \quad (1)$$

证明: 设每个通知报文需携带的数据包个数为 m , 显然有 $m = \sum_{j=1}^l r_j \cdot T / w$ 。根据图 2 给出的通知记录格式, 一条记录最多能表示属于同一条流的连续编号的 9 个数据包, 但是由于存在丢包, 节点能侦听到的数据包不能保证是连续编号的。因此, 单条记录平均能表示的数据包数目为 $9 \cdot p$, 共需 $\lceil m / (9 \cdot p) \rceil$ 条记录来表示侦听到的一条流的数据包。所以单个节点的额外带宽为:

$$C_\tau = \frac{2 + \sum_{i=1}^l \lceil m / (9 \cdot p) \rceil \cdot 9}{\tau} = \frac{2 + \sum_{i=1}^l \lceil r_i \cdot T / (9 \cdot p \cdot w) \rceil \cdot 9}{\tau}$$

为了分析简便, 去掉式(1)中向上取整的操作, 则单个节点的额外带宽近似为:

$$C_\tau = \frac{2 + \sum_{i=1}^l r_i \cdot T / (p \cdot w)}{\tau} \quad (2)$$

定义冲突域的概念: 在一个冲突域中, 当一个节点占据信道发送数据包时, 别的节点不能发送数据包。由于在同一冲突域内, 节点间是共享信道的, 在此希望观察冲突域内的额外带宽与冲突域的整体吞吐量之间的比值 η , 从而分析额外带宽是否可以忽略。设冲突域内的节点数为 h , 同时

$\sum_{i=1}^l r_i$ 可以看成冲突域的整体吞吐量, 则 η 为:

$$\eta = \frac{h \cdot C_\tau}{\sum_{i=1}^l r_i} = \frac{2 \cdot h}{\tau \cdot \sum_{i=1}^l r_i} + \frac{h \cdot T}{\tau \cdot p \cdot w} > \frac{h \cdot T}{\tau \cdot p \cdot w} \quad (3)$$

以一个 IEEE 802.11 网络为例, 假设 $\tau = 0.1 \text{ s}$, $h = 5$, $p = 0.7$, T 取其默认值 0.5 s ^[1]。文献[14]中的统计数据表明, 目前无线网络中 60% 的数据包小于 500 Byte, 因此假设 $w = 500 \text{ Byte}$ 。代入式(3)中, $h \cdot T / (\tau \cdot p \cdot w) = 7.14\%$, 则有 $\eta > 7.14\%$, 即额外带宽至少会占用实际吞吐量 7.14% 的份额, 显然这个开销是不容忽视的。

2.3 “ τ 间隔通知机制”开销及其性能表现的仿真实验

由 2.2 节的分析可以看出, 传输通知报文需要消耗额外的带宽资源, 同时单独发送通知报文会加剧网络中竞争信道冲突的产生, 也会对网络性能产生影响。为了观察不同通知间隔 τ 所产生的实际额外带宽是否和之前的分析一致, 同时考察通知间隔对编码机会和吞吐量的影响, 改变通知间隔 τ , 在网络模拟器 (Network Simulator, NS) 进行了相关仿真实验。仿真实验中, 以图 3 所示拓扑结构部署 5 个节点, 节点的通信半径为 250 m, 载波侦听范围为 550 m, 链路层采用 IEEE 802.11b 媒体访问控制 (Media Access Control, MAC) 协议, 每条链路带宽为 11 Mbit/s, 链路丢包率为 20%。网络中部署了 4 条流 f_1, f_2, f_3 和 f_4 , 它们的传输路径如图 3 所示。所有流的数据包大小

设置为 500 Byte,每次实验中改变流的发送速率,以观察性能指标的变化情况。实验中测试的性能指标有:发送通知报文的额外带宽,编码次数以及有效吞吐量。

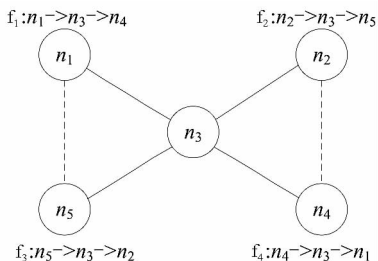


图3 仿真实验拓扑结构

Fig. 3 Topology of simulation

图4给出了冲突域的额外带宽的理论计算值和仿真结果之间的比较情况,可以看出在不同的 τ 和网络负载下,测试值与理论值吻合。而当网络负载达到 5400 Kbit/s 时,额外带宽达到最大值;之后,随着网络负载继续增大,额外带宽开始减小。这是因为当网络中负载较轻时,侦听到的所有流的整体发送速率 $\sum_{i=1}^l r_i$ 会随着网络负载的增加而加大,额外带宽也会随之增加;而当网络负载进一步增加,网络进入拥塞状态,此时竞争信道冲突加剧,导致 $\sum_{i=1}^l r_i$ 会因为冲突的加剧而减小,额外带宽自然也会随之减小。

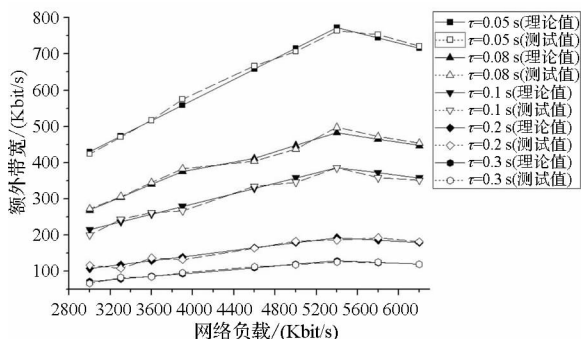
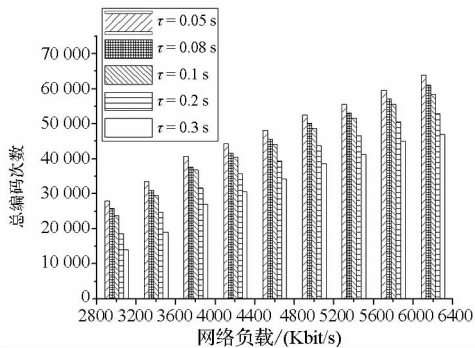


图4 不同 τ 值下额外带宽的对比

Fig. 4 Comparison of extra bandwidth with different τ

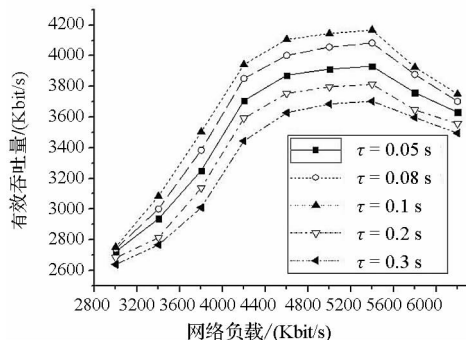
从图5(a)和图5(b)可以看出,尽管 τ 减小使得编码机会增多,但当 τ 减小到一定程度之后,有效吞吐量反而下降,如图5(b)中 $\tau = 0.1$ s时的吞吐量要高于 $\tau = 0.08$ s和 $\tau = 0.05$ s时的吞吐量。原因是当 τ 减小到一定程度后,发送通知报文所需的额外带宽及其冲突开销要高于其所带来的吞吐量增益,使得吞吐量出现下降的趋势。

由此可以看出通知间隔 τ 的取值对网络性能是有影响的,当 τ 的取值过大时,由于没有收到通



(a) 编码次数

(a) Coding times



(b) 有效吞吐量

(b) Effective throughput

图5 通知间隔 τ 取不同值时的对比

Fig. 5 Performance comparison with different τ

知报文,编码节点中本可存在的编码机会丧失,吞吐量下降;若 τ 的取值太小,会导致接受报告发送过于频繁,增加网络负载以及冲突的次数,同样也会使得吞吐量下降。因此,有必要考虑通知间隔 τ 的取值问题。

3 自适应的通知报文发送机制 AR²SM

本节提出了一种自适应的通知报文发送机制 AR²SM,该机制中每个节点动态地计算通知间隔,能很好地平衡编码机会和通知代价,取得更高的吞吐量。

3.1 AR²SM 的基本思想

第2节的分析以及仿真实验结果表明, τ 会影响编码机会和额外带宽。同时观察到在“ τ 间隔通知机制”中存在两个方面的问题:

1) 所有节点都采用同样的固定通知间隔。但实际上不同节点侦听到的数据包的数量是不同的,同时周围邻居节点的发送速率也是不同的,从而使得不同节点为了获得编码机会所需的间隔也是不一样的。

2) 每个通知报文中包含了 T 间隔时间内侦听到的数据包 ($T > \tau$),这样可能在前后连续的

多个通知报文中包含较多重复的数据包信息,这对提高编码效率是没有帮助的,同时增加了不必要的开销。

基于上述观察,分析了通知间隔与编码机会之间的关系,提出了一种依据无线节点局部流量和无线链路传输质量的变化,自适应调整通知报文发送频率的机制 AR²SM。

AR²SM 的基本思想是:

1) 采用自适应变化的通知间隔,其值是根据数据包在邻居编码节点缓存队列中存在的时间以及无线链路的传输质量计算得到的。计算的依据是在保证邻居编码节点能及时收到通知报文的前提下,取尽量大的通知间隔,降低传输通知报文带来的通信代价。

2) 每个通知报文中仅包含最近 2 个动态通知间隔内侦听到的数据包,即每个侦听到的数据包会被通知报文携带两次。通过这样的方法,既保证通知报文中的数据包信息在不可靠的无线环境中能以较高的概率被邻居节点接收,同时缩减通知报文的长度,以降低额外带宽。

3.2 自适应通知间隔 τ 的计算

不失一般性,如图 6 所示,给出了节点 v 与其编码邻居节点集合 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_k\}$,编码邻居节点是指具有编码机会的邻居节点。现在分析节点 v 以多大的间隔发送通知报文能让集合 V 中的节点获得编码机会。假设节点 v 侦听到数据包 p ,要使得节点 $v_i \in V$ 能够把握到 p 可能的编码机会,则需要 v_i 在将 p 发出之前收到 v 的通知报文。设节点 v_i 处的转发队列长度为 N_i ,发送速率为 r_i ,则数据包 p 在节点 v_i 处的最长等待时间为 N_i/r_i ,则有通知间隔 $\tau \leq \min_{v_i \in V} \{N_i/r_i\}$ 。同时考虑到通知报文丢失的可能,则有

$$\tau \leq \min_{v_i \in V} \left\{ s_i \cdot \frac{N_i}{r_i} \right\} \quad (4)$$

其中, s_i 为节点 v 到节点 v_i 的链路成功传输概率。

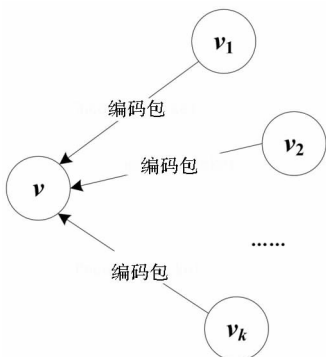


图 6 网络模型拓扑图

Fig. 6 Topology of network model

考虑到为了降低额外带宽以及单独发送通知报文带来的冲突概率,应在保证编码机会的前提下让通知间隔 τ 尽可能大。因此,取 $\tau = \min_{v_i \in V} \{s_i \cdot N_i/r_i\}$ 。

AR²SM 中,节点需要收集各个邻居编码节点的 N_i, r_i 以及 s_i ,以计算通知间隔 τ 。各个节点的 N_i 值被携带在通知报文里面发送给邻居节点,需要每个通知报文增加 2 个字节的存储空间。对于邻居节点的发送速率 r_i ,由于侦听机制的存在,可以根据连续侦听到多个来自同一节点的数据包的大小以及时间间隔,来估计当时该节点的发送速率 r_i 。而本节点与邻居编码节点之间链路的成功传输概率 s_i 则可以通过对数据包在 MAC 层的逐跳确认机制来进行估计^[15]。同时, τ 的计算开销很小,算法的时间复杂度和空间复杂度均为 $O(n)$,其中 n 为邻居编码节点的个数即集合 V 的大小。

3.3 通知报文冗余度的确定

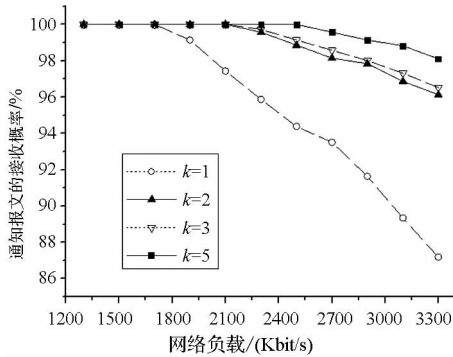
将通知报文冗余度定义为侦听到的数据包在通知报文中出现的次数。在“ τ 间隔通知机制”中,每个通知间隔 τ 发送的通知报文包含了最近 T 内侦听到的数据包,因此冗余度 $k = T/\tau$ 。考虑他们的默认取值 $\tau = 0.1 \text{ s}, T = 0.5 \text{ s}$,所以此时冗余度为 5,这意味着每个侦听到数据包将在该节点连续发出的 5 个通知报文中出现,这样的好处就是能够在链路丢包环境中保证节点接收到通知报文中的侦听数据包信息。但同时也增加了通知报文的大小,会导致额外带宽的增加。

为了确定通知报文冗余度,同时考察冗余度对编码机会以及有效吞吐量的影响,仿真实验中对冗余度 k 取不同的值进行考察。仿真实验中,2000 m × 2000 m 的区域内随机部署 100 个节点,节点的通信半径为 250 m,载波侦听范围为 550 m,链路层采用 IEEE 802.11b MAC 协议,每条链路带宽为 11 Mbit/s,链路丢包率为 20%。实验中随机生成 20 个不同的网络场景,实验结果取 20 次的均值。实验中测试的性能指标有:

- 1) 侦听数据包信息被成功接收的概率,即通知报文中包含的侦听数据包信息被邻居编码节点成功接收的概率;
- 2) 发送通知报文的额外带宽,即网络中所有冲突域额外带宽的均值,单位是 Kbit/s;
- 3) 有效吞吐量,即单位时间内网络中的所有数据流吞吐量的总和,单位是 Kbit/s。

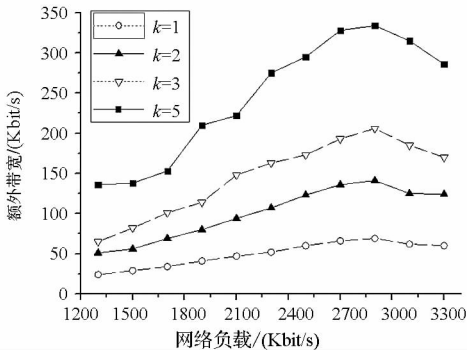
如图 7 所示,分别测试了 $k = 1, 2, 3, 5$ 情况

下的性能参数。可以看出,当 $k=5$ 时,可以取得很好的通知报文接收概率,但额外带宽也是最大的,从而其吞吐量是下降的。综合3个性能指标,当 $k=2$ 时,能保证通知报文的接收概率在96%以上,这样能够很好地保证编码效率;同时发送通知报文所产生的额外带宽也较低,有效吞吐量得到了提高。因此在接下来的仿真实验中,每个通知报文中都包含最近2个动态通知间隔内侦听到数据包的信息,即使得 $k=2$ 。



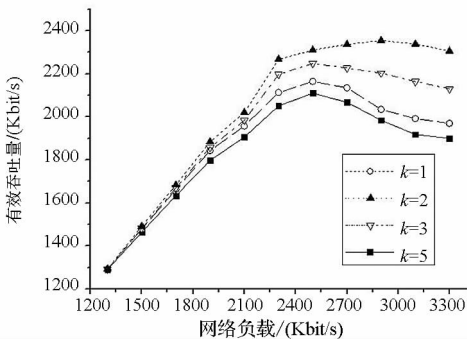
(a) 通知报文的接收概率

(a) Reception ratio of reception report



(b) 额外带宽

(b) Extra bandwidth



(c) 有效吞吐量

(c) Effective bandwidth

图7 不同 k 取值情况下的各性能参数Fig. 7 Performance comparison with different k

在确定了通知报文的冗余度 $k=2$ 之后,采用和2.2节中的定理相同的方法分析 AR^2SM 机制的单个节点额外带宽。

$$C_{AR^2SM} = \frac{4 + \sum_{i=1}^l r_i \cdot (\tau_{last} + \tau_{present}) / (p \cdot w)}{\tau_{present}} \quad (5)$$

其中, τ_{last} 为上一个通知间隔的值,而 $\tau_{present}$ 为当前通知间隔的值。推导过程与定理类似,但有两处不同:① AR^2SM 中通知报文需携带的数据包个数 $m = \sum_{j=1}^l r_j \cdot (\tau_{last} + \tau_{present}) / w$;② AR^2SM 中每个通知报文会多用2个字节来携带节点的转发队列长度,故式(5)中分子第一项为4。

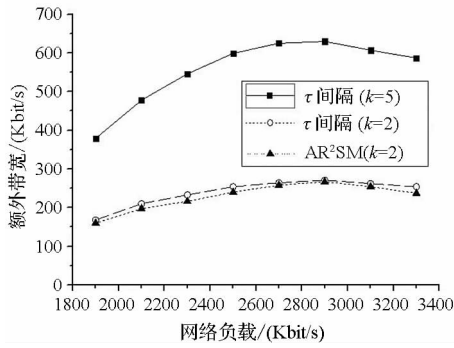
为了比较两种机制单个节点的额外带宽大小,将式(2)和式(5)进行对比。由于两式分子中第一项均为定值,且与第二项相比其值可忽略,故两式之间的比较可转换为 T/τ 和 $(\tau_{last} + \tau_{present})/\tau_{present}$ 之间的比较。假设 $\tau_{last} = \tau_{present}$, 则 $(\tau_{last} + \tau_{present})/\tau_{present} = 2$ 。由此可知,当 $T/\tau > 2$ 时,“ τ 间隔通知机制”的额外带宽会大于 AR^2SM 机制,而当 $T/\tau = 2$ 时,两者的额外带宽会基本相当。

4 性能仿真测试

本节中将 AR^2SM 和“ τ 间隔通知机制”在各性能参数方面进行对比,编码方法均采用 COPE 机制中的编码方法。仿真实验中节点、链路以及数据流的设置和3.2节中的一样。在仿真实验中,由于之前实验中“ τ 间隔通知机制”在通知间隔 $\tau = 0.1$ s 时有效吞吐量最高,所以在本次实验中,取 $\tau = 0.1$ s 作为“ τ 间隔通知机制”的固定通知间隔。仿真实验随机生成20个不同的网络场景,进行对比的性能参数与2.3节中仿真实验测试的性能参数相同,包括额外带宽、网络中总的编码次数以及有效吞吐量,同时还测试不同网络场景下各自的性能参数。具体对比情况如图8~10所示。

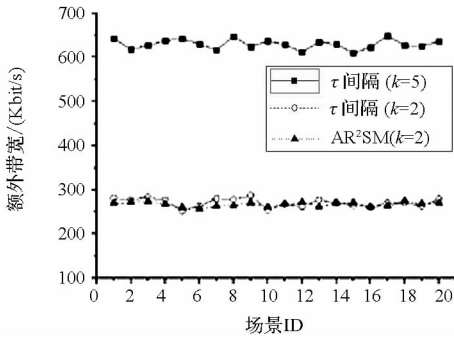
在本次仿真测试中,针对“ τ 间隔通知机制”,不仅测试了 $T=0.5$ s, $\tau=0.1$ s (即冗余度 $k=5$) 的情况,同时还测试了 $T=0.2$ s, $\tau=0.1$ s, 即 $k=2$ 的情况。

从图8(a)和图9(a)可以看出,相对于 $k=5$ 时的“ τ 间隔通知机制”, AR^2SM 机制的额外带宽有了明显的下降,同时编码机会也有所增加。编码机会之所以会增加,是因为 τ 是随着网络负载的变化而自适应调整的,这样会在保证编码机会的前提下,减少网络中冲突的次数,使得原本因为冲突而丧失发送机会的编码包获得发送机会。同时可以看到,当 $k=2$ 时,两者的额外带宽相差不多,和3.3节中最后的分析一致,但是 AR^2SM 机制拥有更多的编码机会。



(a) 不同负载下额外带宽对比

(a) Average effective bandwidth comparison

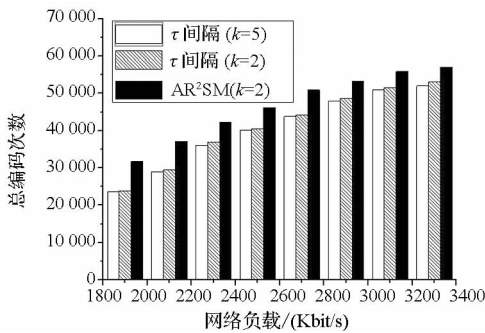


(b) 不同场景下额外带宽对比

(b) Effective bandwidth comparison in scenarios

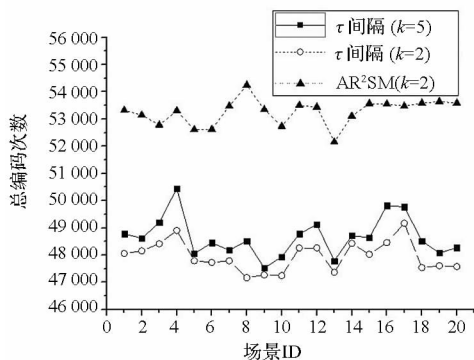
图 8 额外带宽对比图

Fig. 8 Effective bandwidth comparison



(a) 不同负载下编码次数对比

(a) Average coding times comparison



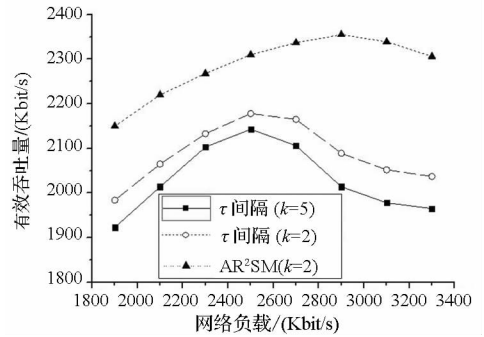
(b) 不同场景下编码次数对比

(b) Coding times comparison in scenarios

图 9 编码次数对比图

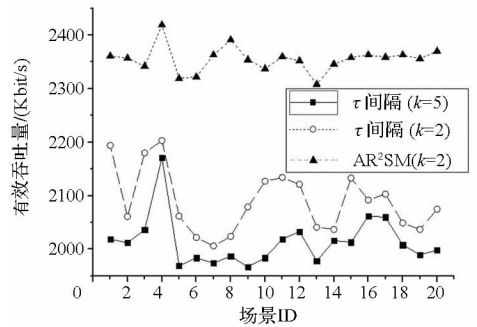
Fig. 9 Coding times comparison

从图 10(a)可以看出,AR²SM 机制在不同网络负载情况下均能显著提高网络的有效吞吐量。这是由于在不同网络负载下,AR²SM 机制能有效地降低传输通知报文的额外带宽,同时增加编码次数,有效吞吐量自然会得到提高。同时,当冗余度 $k=2$ 时,AR²SM 机制相对“ τ 间隔通知机制”,有效吞吐量有显著的提升,而“ τ 间隔通知机制”中 $k=2$ 相对于 $k=5$ 的情况吞吐量提升较小,这说明在 AR²SM 机制中,自适应调整通知间隔 τ 的方法对吞吐量的提升起到了主要作用。



(a) 不同负载下有效吞吐量对比

(a) Average effective throughput comparison



(b) 不同场景下有效吞吐量对比

(b) Effective throughput comparison in scenarios

图 10 有效吞吐量对比图

Fig. 10 Effective throughput comparison

同时从图 8(b)、图 9(b)、图 10(b) 可以看到,在不同的网络场景下,AR²SM 机制都能在保证编码次数的前提下降低额外带宽,从而提高网络的有效吞吐量。在负载为 2900 Kbit/s 的情况下,传输额外通知报文的额外带宽减少了 60% 左右,编码次数增加了 10% 左右,有效吞吐量也有 15% 左右的提升。

5 结论

针对流编码机制中普遍采用的“ τ 间隔通知机制”产生的开销进行了分析和研究,并在此基础上提出了一种自适应的通知报文发送机制 AR²SM。AR²SM 机制根据局部网络的流量自适

应地调整发送间隔,并在每个通知报文中只发送最近2个通知间隔内侦听到的数据包,通过这样的方法,有效降低发送通知报文的频率,同时降低传输通知报文的额外带宽,从而提高网络的有效吞吐量。通过在NS2上的仿真实验证明,AR²SM机制与“ τ 间隔通知机制”相比,能够在保证编码机会的前提下降低传输通知报文的额外带宽,能够很好地提高网络的有效吞吐量。

参考文献 (References)

- [1] Katti S, Rahul H, Hu W J, et al. XORs in the air: practical wireless network coding [J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2008, 16(3): 497 - 510.
- [2] Wang C C. On the capacity of wireless 1-hop intersession network coding—a broadcast packet erasure channel approach [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2012, 58(2): 957 - 988.
- [3] Seferoglu H, Markopoulou A, Ramakrishnan K K. I²NC: intra-and inter-session network coding for unicast flows in wireless networks [C]//*Proceedings of the 30th IEEE International Conference on Computer Communications*, 2011: 1035 - 1043.
- [4] Paschos G S, Fragiadakis C, Georgiadis L, et al. Wireless network coding with partial overhearing information [C]//*Proceedings of the 32th IEEE International Conference on Computer Communications*, 2013: 2337 - 2345.
- [5] Keshavarz-Haddad A, Riedi R H. Bounds on the benefit of network coding for wireless multicast and unicast [J]. *IEEE Transactions on Computing*, 2014, 13(1): 102 - 115.
- [6] Palacios R, Granelli F, Paramanathan A, et al. Coding-aware MAC: providing channel access priority for network coding with reverse direction DCF in IEEE 802.11-based wireless networks [C]//*Proceedings of IEEE International Conference on Communications*, 2014: 1272 - 1277.
- [7] Carrillo E, Ramos V. On the impact of network coding delay for IEEE 802.11 s infrastructure wireless mesh networks [C]//*Proceedings of IEEE the 28th International Conference on Advanced Information Networking and Applications*, 2014: 305 - 312.
- [8] Compta P T, Fitzek F H P, Lucani D E. On the effects of heterogeneous packet lengths on network coding [C]//*Proceedings of the 20th European Wireless Conference*, 2014: 1 - 6.
- [9] Wu Y N, Das S M, Chandra R. Routing with a Markovian metric to promote local mixing [C]//*Proceedings of the 26th IEEE International Conference on Computer Communications*, 2007: 2381 - 2385.
- [10] Le J L, Lui J C S, Chiu D M. DCAR: distributed coding-aware routing in wireless networks [J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2010, 9(4): 596 - 608.
- [11] Yan Y, Zhang B X, Zheng J, et al. CORE: a coding-aware opportunistic routing mechanism for wireless mesh networks [J]. *IEEE Wireless Communications*, 2010, 17(3): 96 - 103.
- [12] Jones N M, Shrader B, Modiano E. Optimal routing and scheduling for a simple network coding scheme [C]//*Proceedings of the 31th IEEE International Conference on Computer Communications*, 2012: 352 - 360.
- [13] Zhu D H, Yang X Y, Yu W, et al. Network coding versus traditional routing in adversarial wireless networks [J]. *Ad Hoc Networks*, 2014, 20: 119 - 131.
- [14] Compta P T, Fitzek F H P, Lucani D E. On the effects of heterogeneous packet lengths on network coding [C]//*Proceedings of the 20th European Wireless Conference*, 2014: 1 - 6.
- [15] Baccour N, Koubaa A, Mottola L, et al. Radio link quality estimation in wireless sensor networks: a survey [J]. *ACM Transactions on Sensor Networks*, 2012, 8(4): 34.