

基于 Markov 状态转移方法的网络编码时延分析

屈毓铮, 陈晨, 董超, 王海
(解放军理工大学 通信工程学院, 江苏 南京 210007)

摘要: 网络编码已被验证是改善无线网络吞吐量、可靠性等性能的有效手段, 但其对业务流时延性能影响的研究还不充分。针对得到广泛应用的随机线性网络编码, 提出了一种基于马尔可夫状态转移的方法对单跳场景下单播业务流时延的期望值以及概率分布进行了分析, 同时给出了相应的递推解析式, 然后数值分析了有限域大小、信道丢失率、编码批次大小等编码参数对时延的影响。结果表明, 随着有限域 q 的增大, 时延的方差不断变小; 时延的期望值与信道丢失率、编码批次大小几乎都成线性关系。

关键词: 网络编码; 马尔可夫链; 时延分布; 时延期望值

中图分类号: TN393

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2013)09-0077-07

Analysis of network coding delay: a Markov state transfer approach

QU Yu-ben, CHEN Chen, DONG Chao, WANG Hai

(College of Communications Engineering, PLAUST, Nanjing na)

Abstract: Network coding has been validated as an effective means to improve network throughput and reliability, but the study of its delay performance is not enough. Against the widely used random linear network coding, the proposed method, based on the Markov state transfer, analyzed the delay expectation and probability distribution of the unicast flow in a single hop scene, and presented the exact recursions. Then according to numerical simulation, the effect of the encoding parameters were analyzed such as the finite field size, the channel loss rate and the encoding batch size on the delay. The results show that, as the finite field q increases, the delay variance continues to become smaller; the average delay is almost linear with the channel loss rate and the encoding batch size individually.

Key words: network coding; Markov chain; delay distribution; delay expectation

1 引言

网络编码^[1]是进入 21 世纪后通信理论领域的一项重大突破, 其核心思想是网络节点对于接收到的多个分组编码后再转发。自 2000 年提出以来, 经过研究验证, 网络编码被认为是改善无线网络吞吐量^[2]、可靠性^[3]等网络性能的重要途径。当前, 流内网络编码^[4]是无线网络网络编码领域的研究热点, 应用最广泛的策略是随机线性网络编码^[5], 即节点将待发送的数据分成固定大小的批次, 然后将一个批次内的多个分组随机线性组合后再转发, 目

的节点收到足够多线性无关的编码分组后, 通过高斯消元法即可解码出该批次的原始分组。

虽然随机线性网络编码对无线网络吞吐量、可靠性等性能的影响已经得到了广泛研究^[6,7], 但这些方法以及结果无法直接应用于网络编码的时延性能分析, 从而会影响网络编码的进一步推广与应用。一方面, 在无线网络的许多实时应用中, 业务都有明确的端到端时延要求, 例如多媒体点播业务, 如果简单地应用随机线性网络编码来提高其吞吐量与可靠性, 很可能会伤害业务流的时延性能, 但当前对网络编码的时延性能研究还很有限, 因此

收稿日期: 2012-09-15; 修回日期: 2012-11-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61103224, 61371124); 江苏省自然科学基金资助项目(BK2011118); 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)基金资助项目(2009CB3020402)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61103224, 61371124); The Natural Science Foundation of Jiangsu Province (BK2011118); The National Basic Research Program of China (973 Program) (2009CB3020402)

对是否应用网络编码还心存疑虑；另一方面，网络编码的引入的确将对无线网络业务的时延组成与时延量级等因素带来变化。以随机线性网络编码为例，由于编码分组通常由多个数据分组编码而成，因此业务流的时延不再仅由单个分组的发送时延与传播时延等^[8]组成，时延的构成发生了变化；同时，由于目的节点只有在收到足够多的线性无关的编码分组后才能一次性解出所有的数据分组，因此业务时延不仅包含单个分组的传播时延与发送时延，还包括多个分组产生的时间间隔，而实际中，分组的产生时间间隔和传播时延往往具有不同的量级，时延的量级也发生了变化。

因此，当将随机线性网络编码应用于无线网络尤其是实时业务时，必须充分考虑其时延性能。本文利用马尔可夫状态转移的方法，分析研究了单跳场景下单播业务应用随机线性网络编码时的时延分布情况以及期望值，主要工作如下。

1) 通过分析目的节点秩的状态变化过程，证明此过程为马尔可夫过程。

2) 在步骤 1) 的基础上应用状态转移的方法分析单跳场景下单播业务流的时延概率分布及期望值，给出了相应的递推解析式。

3) 根据得到的递推解析式，利用 MATLAB 数值分析有限域大小 q 、信道丢失率 e 、编码批次大小 M 对业务流时延的概率分布以及期望值的影响。

4) 基于上述理论结果和数值分析，讨论了将随机线性网络编码应用于实时业务时，进行相关编码参数调整的可行性。

2 相关工作

随机线性网络编码自提出以来在无线网络中得到了大量应用^[4,9,10]，极大改善了网络吞吐量、可靠性等性能。然而，对随机线性网络编码时延性能的研究在最近才得到越来越多的关注。影响随机线性网络编码时延性能的主要因素有编码批次大小、有限域大小、链路质量、跳数大小以及网络节点数等。根据影响因素是否有限的不同研究前提，可以将现有研究分成以下两大块：1) 渐进的时延分析，即考虑上述某些影响因素趋近于无穷时的时延性能；2) 非渐进的时延分析，即考虑上述某些影响因素有限时的时延性能。而对时延性能具体主要关注平均时延（时延的期望值）、最大时延以及时延分布情况（时延的概率分布）等方面。

李晓航等人^[11]分析了当编码批次大小趋于无穷时，业务流平均时延的变化情况；张弛等人^[12]研究了当网络节点数趋于无穷时，随机线性网络编码对业务流的平均时延与吞吐量性能的影响情况。以上研究均是渐进性的分析，因此无法得到给定编码批次大小、网络规模等参数，业务流时延与吞吐量等性能的变化情况，其结论不适用于实际应用。

Eryilmaz 等人^[13]证明了在单跳广播场景下，相比传统的调度法则，无论是否有先验信道质量状况信息，应用随机线性网络编码总会带来一定的时延增益，这里的时延主要指业务流的平均时延，但是平均时延这一指标只能体现出网络编码的平均性能，文献并没有给出相应时延概率分布的分析，在实时应用时无法进行精确的控制。Barros 等人^[14]随后给出了特定随机线性网络编码策略下业务流时延的概率分布及期望值，并讨论了当分组存在时延需求时如何调整编码法则使分组满足其时延要求，但其结论仅限于异或编码，缺乏针对随机线性网络编码的一般性分析。Nistor 等人^[15]研究了在单跳场景下应用随机线性网络编码的单播业务流的时延分布与有限域大小、编码批次大小以及信道擦除概率等的关系，但其方法不适合实时应用。

其他与随机线性网络编码时延性能相关的一类研究是以最小化时延为目标^[16-18]，这类研究考虑如何调整才能使时延达到最优，事实上单纯追求时延的最小化往往带来其他性能的恶化，如吞吐量性能降低等^[19,20]。实际上，在业务具有严格时延需求的应用中只需使时延要求满足即可，没有必要一味追求时延的最小化。

3 基于 Markov 状态转移方法的网络编码时延分析

本节通过引入马尔可夫状态转移方法分析单跳场景下单播业务流的时延分布与平均时延，给出了相应的递推解析式。下面首先介绍相应的模型假设与问题描述，随后给出具体解法。

3.1 模型假设与问题描述

考虑单跳场景下的单播业务，如图 1 所示，源节点 S 与目的节点 D 之间一跳可达，信道不可靠且其分组丢失率为 e 。

假设将时间片划分成多个相同大小的时隙，信道每个时隙只处理一个分组，包括分组从源节点发送到目的节点接收的过程。现在要将 M 个分组传输

到目的节点，这 M 个分组即为原始分组，假设它们记为 s_1, \dots, s_M ，考虑使用随机线性网络编码的策略，即源节点在每个时隙开始时将 s_1, \dots, s_M 随机线性组合成一个编码分组 $p = \sum_{i=1}^M l_i \cdot s_i$ ，其中，系数 l_1, \dots, l_M 均随机地取自于 $GF(q)$ ，这里 M 即为编码批次大小，而 q 为有限域大小。每次生成编码分组时要考虑到 l_1, \dots, l_M 可能全为 0 的情况，如果全为 0，则重新选择，直到 l_1, \dots, l_M 不全为 0。生成编码分组后，源节点将系数 l_1, \dots, l_M 作为一个向量放在分组头部，以便目的节点收到足够多的线性无关的编码系数向量，通过高斯消去解码出原始分组。

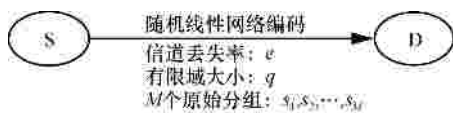


图 1 单跳场景下的单播业务

根据随机线性网络编码的原理，目的节点只要收到 M 个线性无关的编码系数向量的编码分组即可解码出所有原始分组。源节点一直发送编码分组直到目的节点收齐 M 个线性无关的编码分组为止。

依据上述假设，问题可归结为：要将 M 个原始分组成功传输到目的节点需要多少个时隙，不妨假设需要 T 个，显然 $T \geq M$ 。进一步，问题可简化为：给定编码批次大小 M 、信道丢失率 e 、有限域大小 q ，求 T 的概率分布 $P\{T=t\}$ ， $t = M, M+1, \dots$ 以及 T 的数学期望 $E[T]$ 。

3.2 基于马尔可夫状态转移的时延分析

考虑目的节点的接收情况，每个时隙中目的节点要么接收不到分组，即信道发生丢失；要么接收到分组，但此分组可能与之前目的节点收到的编码分组线性相关（编码分组线性相关即其编码系数向量线性相关，下同），也可能线性无关，目的节点只接收线性无关的编码分组。

定义 1 目的节点接收到线性无关的编码分组的个数称为秩。

记目的节点接收到的秩为 r ，可知 r 从 0 开始，每经过一个时隙后存在 2 种可能：不变或加 1，最终为 M （注意到成功接收到的第一个编码分组肯定是线性无关的，因为其编码系数向量不为零向量）。

引理 1 目的节点秩 r 的状态变化为马尔可夫链。

证明 由秩的定义可知， r 只能为 $0, 1, \dots, M$ 中的一个。前面提到，每经过一个时隙， r 的取值要

么不变要么加 1。假设某个时隙 r 的取值为 i ，那么下一时隙 r 要么继续为 i （对应于事件“信道发送丢失或者接收的编码分组线性相关”），要么为 $i+1$ （对应于事件“成功收到一个线性无关的编码分组”），而目的节点在下一个时隙收到的编码分组是否无关只与 i 有关，与 $i-1, i-2, \dots, 1$ 无关，即 r 的状态变化过程是一个马尔可夫链，证毕。

如图 2 所示， r 取值从状态 i 到状态 $i+1$ 的单步转移概率记为 p_i ，则从状态 i 回到状态 i 的单步转移概率为 $1-p_i$ ，注意到状态 0 为初始态，而状态 M 为吸收态，即状态 $M-1$ 到达状态 M 后停止。于是问题转化为秩 r 从状态 0 到状态 M 总共要花费多少步，或者求花费 T 步（即 T 个时隙）的概率。下面求单步转移概率 p_{i0} 。

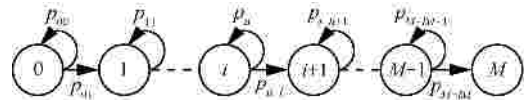


图 2 目的节点的秩 r 的状态变化

引理 2 秩 r 所处状态的单步转移概率为

$$p_i = (1-e) \frac{q^M - q^{i-1}}{q^M - 1} \quad (1)$$

其中， $i=1, \dots, M$ 。

证明 根据 p_i 的定义，其对应的事件为 r 的当前状态为 $i-1$ ，经过一个时隙跳到状态 i ，即目的节点在已经收到 $i-1$ 个线性无关的编码分组的情况下，经过一个时隙成功收到一个编码分组，且此编码分组与前 $i-1$ 个编码分组线性无关。于是：

$$\begin{aligned} p_i &= P\{\text{成功收到一个编码分组, 且此分组是线性无关的} \mid \text{目的节点已收到 } i-1 \text{ 个编码分组的}\} \\ &= (1-e)P\{\text{收到的编码分组与已收到的 } i-1 \text{ 个编码分组线性无关}\} \end{aligned}$$

考察成功收到这个编码分组的可能性情况。若不考虑线性无关与否，此编码分组的选择可能有 $q^M - 1$ 种情况（除去系数全为 0 的情况）。若考虑与已收到的 $i-1$ 个编码分组线性无关，易知与这 $i-1$ 个编码分组线性相关的编码分组有 $q^{i-1} - 1$ 种可能情况（也要除去系数全为 0 的情况），因此，成功收到的这个编码分组只有 $(q^M - 1) - (q^{i-1} - 1) = q^M - q^{i-1}$ 种可能情况，故

$$p_i = (1-e) \frac{q^M - q^{i-1}}{q^M - 1} \quad (2)$$

其中， $i=1, \dots, M$ ，证毕。

下面求一般情况下秩 r 由状态 i 转移到状态 j ($0 < i < j < M$) 需要 t_{ij} 步的概率。

引理 3 记事件“秩由状态 i 转移到状态 j 需要 t_{ij} 步”的概率为 $P(t_{ij}, i, j)$, 则 $P(t_{ij}, i, j)$ 可由下列式子得到

$$\begin{cases} P(t_{ij}, i, j) = \sum_{k=1}^{t_{ij}-(j-(i+1))} P(k, i, i+1)P(t_{ij}-k, i+1, j) \\ P(k, i, i+1) = (1-p_{i+1})^{k-1} p_{i+1} \end{cases} \quad (3)$$

其中, $0 < i < j < M, t_{ij} = j-i$, 且 p_{i+1} 可由引理 2 得到。

证明 考虑将此事件拆成两步完成, 秩 r 首先由状态 i 转移到状态 $i+1$ 花费 k 步, 再从状态 $i+1$ 转移到状态 j 花费 $t_{ij}-k$ 步, 由于相邻状态的转移至少需要 1 步, 因此 $k=1, 2, \dots, t_{ij}-(j-(i+1))$ 。于是

$$P(t_{ij}, i, j) = \sum_{k=1}^{t_{ij}-(j-(i+1))} P(k, i, i+1) \cdot P(t_{ij}-k, i+1, j) \quad (4)$$

若记事件“在某时隙成功收到一个编码分组, 且此分组是线性无关的”为成功, 则秩由状态 i 到状态 $i+1$ 花费 k 步表示在前 $k-1$ 个时隙失败, 在第 k 个时隙成功, 同时由于在前 $k-1$ 个时隙失败的概率均为 $(1-p_{i+1})$, 因此此过程是一个贝努利过程, 可得

$$P(k, i, i+1) = (1-p_{i+1})^{k-1} p_{i+1} \quad (5)$$

结合式(4)与式(5)即为式(3), 若已知 M, e, q , 则由式(2)可得 p_i , 继而根据式(3)递推求得秩由状态 i 转移到状态 j 需要 t_{ij} 步的概率, 证毕。

根据 3.1 节模型假设, 目的节点收齐 M 个线性无关的编码分组需要 T 个时隙, 即秩由状态 0 到状态 M 需要 T 步, 则 T 的分布为

$$P\{T=t\} = P(t, 0, M), t = M, M+1, \dots \quad (6)$$

定理 1 在给定编码批次大小 M 、信道丢失率 e 以及有限域大小 q 的条件下, 单播场景下应用随机线性网络编码的单播业务流时延 T 的概率分布及期望值分别为

$$\begin{cases} P\{T=t\} = P(t, 0, M), t = M, M+1, \dots \\ P(t, i, j) = \sum_{k=1}^{t-(j-(i+1))} P(k, i, i+1)P(t-k, i+1, j), \\ 0 < i < j < M \\ P(k, i, i+1) = (1-p_{i+1})^{k-1} p_{i+1}, k = 1, 0 < i < M-1 \\ p_i = (1-e) \frac{q^M - q^{i-1}}{q^M - 1}, i = 1, \dots, M \end{cases} \quad (7)$$

$$E[T] = \sum_{i=M, M+1, \dots, L} i \cdot P(i, 0, M) \quad (8)$$

证明略。

至此, 通过证明目的节点秩的变化过程为马尔可夫链, 并应用马尔可夫状态转移的方法求出了单跳场景下单播业务流时延的概率分布及数学期望。

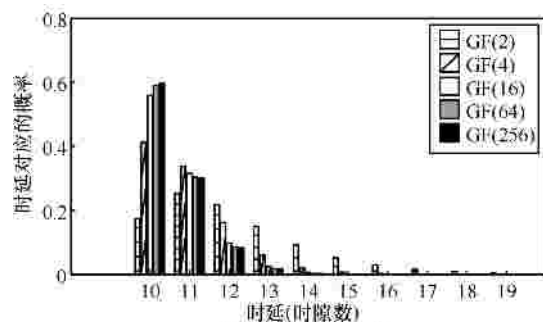
4 仿真结果与分析

从第 3 节推导结果可知, 单跳场景下应用随机线性网络编码的单播业务时延的概率分布及数学期望只与有限域大小 q 、信道丢失率 e 以及编码批次大小 M 等参数有关, 下面通过 MATLAB 仿真分别考察 q, e, M 对时延的概率分布以及数学期望的影响。

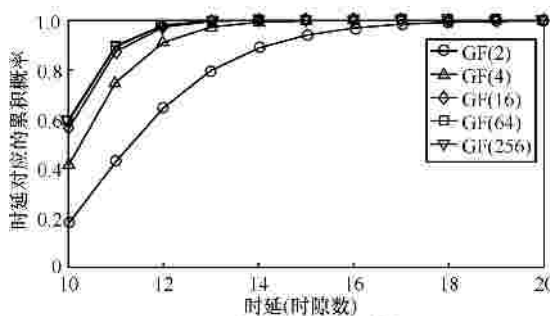
4.1 有限域大小 q

为了研究有限域大小 q 对随机线性网络编码时延的影响, 首先将 q 从 2、4、16、64 变化到 256, 同时编码批次大小固定为 $M=10$, 并考虑 2 种不同的信道丢失率 $e=0.05$ 和 $e=0.2$ 。

图 3 所示为 $M=10, e=0.05$ 时不同 q 的时延分布。从图 3(a)可以看到, q 为 2 时对应的时延概率分布比较均匀。比如, q 为 2 时, 时延 $t=10$ 的概率大概为 17%, $t=14$ 的概率约为 9%; 而 q 为 16 时,



(a) 时延的概率分布



(b) 时延的累积概率分布

图 3 $M=10, e=0.05$, 不同 q 时的概率分布

$t=10$ 的概率达到 56% , $t=14$ 的概率几乎为 0。从图 3(b)可以更清楚地看到,对于相同 M 和 e ,当 $q=16$ 时,时延 $t=14$ 的概率几乎为 99% ;而 $q=2$ 时对应的概率仅为 90%。由此可以说明,当有限域较大时,其时延的方差较小,这是因为有限域较大时,所生成的编码分组基本上都是线性无关的,时延主要由 M 和 e 确定,其不确定性低,时延的变化范围窄,因而时延的方差小;而当有限域较小时,所组成的编码分组可能线性无关,也可能线性相关,时延取值的不确定性增大,因此时延的方差较大。上述结论在信道丢失率较大时也成立,如图 4 所示为 $M=10, e=0.20$ 时不同 q 的时延分布。从图 4 中可以看到, $q=2$ 时,时延 $t=10$ 的概率约为 3.1% , $q=16$ 时,取相同时延的概率在 10%~10.7%之间;而 $q=2$ 时,时延 $t=19$ 的概率为 5% , $q=16$ 时,取相同时延的概率约为 1%。

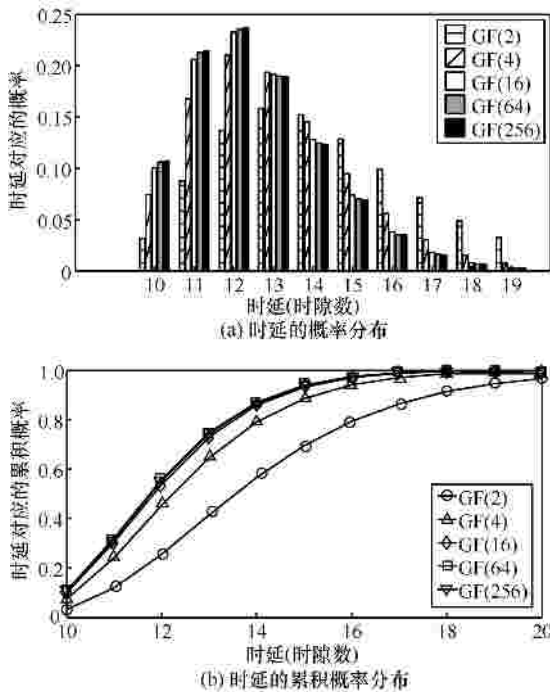


图 4 $M=10, e=0.2$, 不同 q 时的概率分布

图 5 显示的是不同有限域大小的平均时延图。注意到,在仿真中为了充分研究有限域大小对平均时延的影响,不仅选取 2 个不同大小的信道丢失率 $e=0.05$ 和 $e=0.2$,而且还选取 2 个不同的编码批次大小 $M=4$ 和 $M=10$ 。从图中可以看到:首先,不论 q 和 M 取何值,只要 q 和 M 固定, $e=0.2$ 时的平均时延都要大于 $e=0.05$ 时的平均时延,这是因为在 M 和 q 相同的情况下,信道丢失率越大,所

需要的时隙数越多;其次,当 $q < 16$ 时,平均时延随 q 的不断增大而下降,而当 $q=16$ 之后,平均时延的曲线几乎趋近于直线,这是由于不论 M 取何值,只要 M 固定,当 q 较小时发送的编码分组线性无关的概率较小,随着 q 的不断增大,线性无关的概率不断增大,因此平均时延不断减小,而当 $q=16$ 时概率已经接近于 1,因此 $q > 16$ 时平均时延保持稳定。

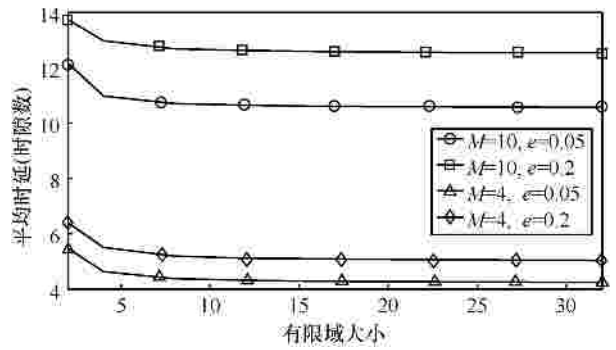


图 5 有限域大小对平均时延的影响

综上,在随机线性网络编码的策略下,有限域大小对单跳场景下的单播业务的时延的影响如下: 1) 有限域 $q=16$ 时其时延的方差较小,而 $q=2$ 时其时延的方差较大,变化范围增大; 2) 在编码批次大小和信道丢失率确定后,有限域较小时时延的期望值随有限域的不断增大而减小,有限域大于一定值后时延的期望值几乎不变。

从上述结论可以得到如下启示:有限域 $q=16$ 时其时延的方差较小,时延分布的范围较窄,比较适合于时延控制,但 q 越大,导致编码系数带来的头部开销越大;而有限域取 $q=2$ 时,虽然开销较小(异或编码),但其时延分布很分散,不利于满足时延要求;在编码批次大小和信道状况已知的情况下,当 $q=16$ 之后平均时延基本保持稳定。

4.2 信道丢失率 e

从 4.1 节可知,相同 $M、e$ 时 $q=16$ 的时延分布几乎一致,因此,为了研究信道丢失率对时延的影响,仍然将 M 固定为 10,而对于 q 只取 2 和 16 作为代表,信道丢失率 e 分别取 0.05、0.1、0.2、0.3。

图 6 所示为 $M=10, q$ 分别为 2、16 时不同 e 的时延累积概率分布图。从图中可以看到,不论 $q=2$ 还是 $q=16$,信道丢失率越大,其时延分布曲线越靠下,取较大时延的概率越大。结合图 7 来看,在 M 确定的情况下,增加相同信道丢失率, $q=2$ 时平均

时延的增幅与 $q=16$ 时平均时延的增幅基本一致。例如, $q=2$ 时, $e=0.05$ 的平均时延为 12.20, $e=0.3$ 的平均时延为 16.39, 增幅约为 35%; 而 $q=16$ 时, $e=0.05$ 的平均时延为 10.60, $e=0.3$ 的平均时延为 14.38, 增幅同样为 35%。另外注意到, 无论 e 取何值, $q=2$ 时的平均时延均要大于 $q=16$ 时的平均时延, 这是因为有限域越大, 编码分组线性无关的概率越大, 所需要的时隙数越小, 这与 4.1 节有限域对平均时延的影响的结论一致。

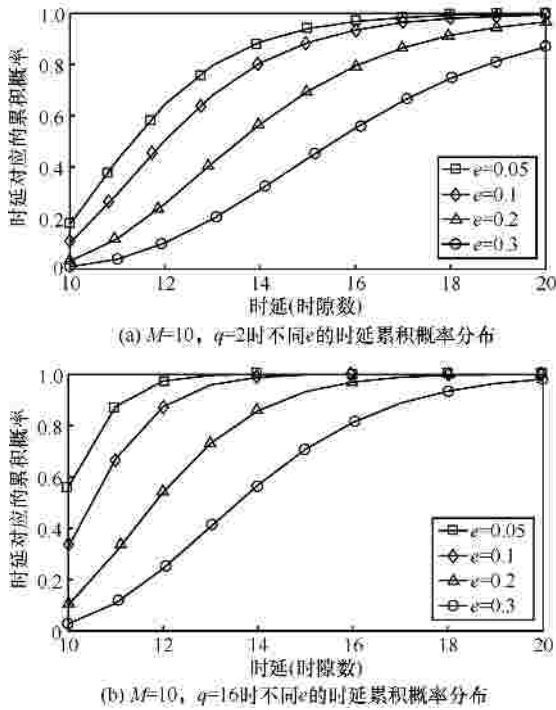


图 6 信道丢失率对时延分布的影响

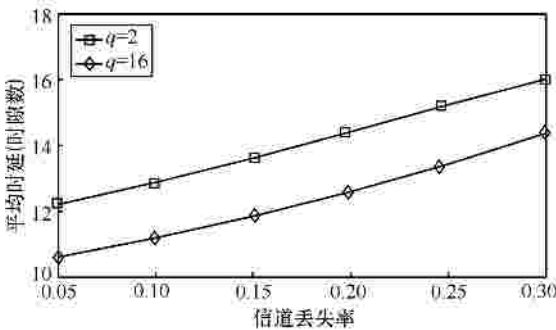


图 7 信道丢失率对平均时延的影响

4.3 编码批次大小 M

本节着重研究了编码批次大小对时延的影响, q 仍然分别取 2 和 16 作为代表, 而 e 取为 0 (信道无丢失), M 则取 3、6、9、12、15。注意到, 在仿真编码批次大小对时延概率分布的影响时采用的度量是归一化时延, 即 $(t - M)$ 。

图 8 所示为编码批次大小对归一化时延概率分布的影响, 由图可见, $q=16$ 时归一化时延的概率分布几乎一致, 而 $q=2$ 时只有从 $M=9$ 时才几乎一致, 这说明有限域越大, 较小的编码批次大小就可以使归一化时延的分布几乎相同。这是因为在信道无丢失 ($e=0$) 的情况下, $q=16$ 时目的节点若收到 M 个编码分组, 则这些编码分组线性无关的概率几乎为 1。

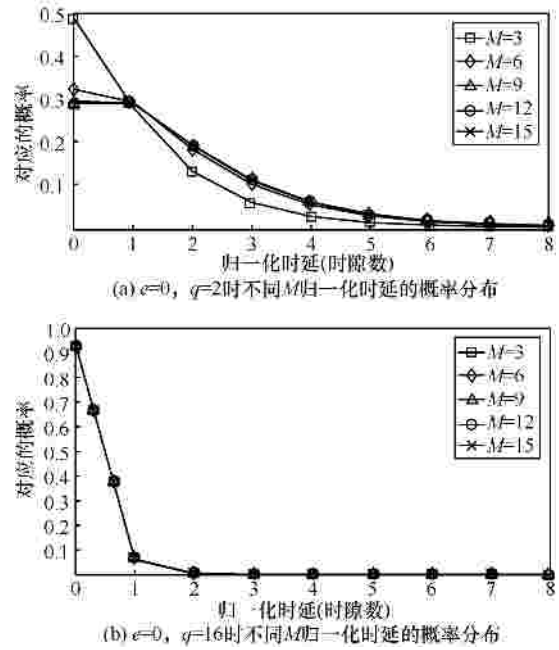


图 8 编码批次大小对时延分布的影响

另外, 从图 9 可以看到, 在 q 、 e 固定的情况下, 编码批次大小 M 与时延的期望值几乎呈线性关系。在实时应用时, 业务具有明确的时延要求, 则编码批次大小可以根据相应时延需求来调整, 至于具体如何调整是下一步工作需要考虑的内容。

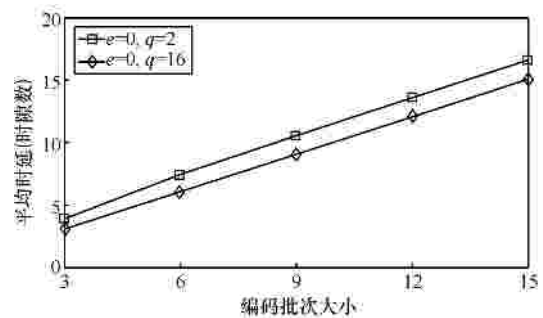


图 9 编码批次大小对平均时延的影响

5 结束语

本文通过将目的节点接收的秩的状态变化证明为马尔可夫链, 进一步将问题转化为状态之间的转

移,分析了单跳场景下应用随机线性网络编码的单播业务的时延问题,得出业务时延的概率分布及期望值的递推解析式,并借助 MATLAB 具体分析有限域大小、信道丢失率、编码批次大小等对时延的影响,同时讨论了在实时应用中参数调整的可行性问题。本文的研究结论可以为业务具有明确时延需求的应用提供有效的解决思路。下一步,将研究方法推广到多跳等更加复杂的场景;另外,利用其时延分布特征来实现时延控制将是未来主要的工作方向。

参考文献：

- [1] AHLWEDE R, CAI N, LI S R. Network information flow[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2000, 46(4):1204-1216.
- [2] ALIREZA K H, RUDOLF R. Bounds of benefit of network coding: throughput and energy saving in wireless networks[A]. Proceedings of the 27th IEEE International Conference on Computer Communications (INFOCOM 2008)[C]. Phoenix, AZ, USA, 2008.
- [3] MAJID G, DON T, JIM K. Reliability gain of network coding in lossy wireless networks[A]. Proceedings of the 27th IEEE International Conference on Computer Communications (INFOCOM 2008)[C]. Phoenix, AZ, USA, 2008.
- [4] CHACHULSKI S, JENNINGS M, KATTI S. Trading structure for randomness in wireless opportunistic routing[A]. Proceedings of International Conference on Special Interest Group on Data Communications (SIGCOMM 2007)[C]. Kyoto, Japan, 2007.
- [5] HO T, KOETTER R, MEDARD M. The benefits of coding over routing in a randomized setting[A]. Proceedings of ISIT 2003[C]. Yokohama, Japan, 2003.
- [6] HO T, LUN D. Network Coding: an Introduction[M]. Cambridge University Press, 2008.
- [7] FRAGOULI C, SOLJANIN E. Network coding applications[J]. Foundations and Trends in Networking, 2007, 2(2):135-269.
- [8] 董超,田畅,倪明放. Ad hoc 网络时钟同步研究[J]. 通信学报, 2006, 27(9):110-117.
DONG C, TIAN C, NI M F. Research on clock synchronization of ad hoc networks[J]. Journal on Communications, 2006, 27(9): 110-117.
- [9] CHOU P, WU Y, JAIN K. Practical network coding[A]. Proceedings of 43rd Allerton Conference on Communication Control and Computing[C]. Illinois, USA, 2005.
- [10] KATTI S, RAHUL H, HU W. XORs in the air: practical wireless network coding[A]. Proceedings of International Conference on Special Interest Group on Data Communications (SIGCOMM 2006)[C]. Pisa, Italy, 2006.
- [11] LI X H, WANG C C, LIN X J. Throughput and delay analysis on uncoded and coded wireless broadcast with hard deadline constraints[A]. Proceedings of 29th IEEE International Conference on Computer Communications (INFOCOM 2010)[C]. San Diego, CA, USA, 2010.
- [12] ZHANG C, FANG Y U, ZHU X Y. Throughput-delay tradeoffs in large-scale manets with network coding[A]. Proceedings of 28th IEEE International Conference on Computer Communications (INFOCOM 2009)[C]. Rio de Janeiro, Barzil, 2009.
- [13] ERYILMAZ A, OZDAGLAR A, MEDARD M. On delay performance gains from network coding[A]. Proceedings of 40th Annual Conference on Information Sciences and Systems (CISS 2006)[C]. Princeton, NJ, USA, 2006.
- [14] BARROS J, COSTA R, MUNARETTO D. Effective delay control in online network coding[A]. Proceedings of 28th IEEE International Conference on Computer Communications (INFOCOM 2009)[C]. Rio de Janeiro, Barzil, 2009.
- [15] NISTOR M, COSTA R, VINHOZA T. Non-asymptotic analysis of network coding delay[A]. Proceedings of 2010 IEEE International Symposium on Network Coding (NetCod 2010)[C]. Toronto, Canada, 2010.
- [16] COSTA R, MUNARETTO D, WIDMER J. Informed network coding for minimum decoding delay[A]. Proceedings of 5th IEEE International Conference on Mobile Ad Hoc and Sensor Systems (MASS 2008)[C]. Atlanta, Georgia, 2008.
- [17] SADEGHI P, SHAMS R, TRASKOV D. An optimal adaptive network coding scheme for minimizing decoding delay in broadcast erasure channels[J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2010, (4):1-14.
- [18] SUNDARARAJAN J, SHAH D, MEDARD M. Online network coding for optimal throughput and delay—the three-receiver case[A]. Proceedings of International Symposium on Information Theory and Its Applications (ISITA 2008)[C]. Auckland, New Zealand, 2008.
- [19] SHARMA G, MAZUMDAR R, SHROFF N. Delay and capacity trade-offs in mobile ad hoc networks: a global perspective[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2007, 15(5):981-992.
- [20] MORAES R, SADJADPOUR H, GARCIA J. Throughput-delay analysis of mobile ad hoc networks with a multi-copy relaying strategy[A]. Proceedings of First Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks (SECON 2004)[C]. Santa, Clara, USA, 2004.

作者简介：



屈毓镡 (1987-), 男, 湖北孝感人, 解放军理工大学博士生, 主要研究方向为无线网络编码技术。



陈晨 (1986-), 男, 四川成都人, 解放军理工大学博士生, 主要研究方向为网络编码和感知路由。



董超 (1980-), 男, 山东滨州人, 博士, 解放军理工大学副教授, 主要研究方向为无线网络编码技术、认知路由技术和 ad hoc 网络组网技术。

王海 (1972-), 男, 湖北襄阳人, 博士, 解放军理工大学教授、博士生导师, 主要研究方向为 ad hoc 网络技术。