

# 车载自组网中基于滑动窗口的网络编码传输策略

王万良 李桂森 姚信威 岑跃峰

(浙江工业大学计算机科学与技术学院 杭州 310023)

**摘要** 由于节点的高速移动和拓扑的快速变化,使得在车载自组网中传输时延敏感的数据是一个很大的挑战。针对此问题,提出了一种在机会路由上使用基于滑动窗口的网络编码传输策略。该策略根据网络状态自适应地调整滑动窗口的大小,来编码不同长度的编码包,去容忍 ACK 的延迟,使得在各种网络条件下都能保持较高的吞吐率;使用下三角形式的渐进编码使接收端逐步解码,从而平滑接收端的解码时间间隔。仿真结果表明,该策略具有更高的吞吐率,同时能够在接收端形成时延抖动小的数据流,为车载自组网中流媒体等时延敏感的数据流传输提供更好的服务质量。

**关键词** 滑动窗口,网络编码,机会路由,车载自组网

**中图法分类号** TP393 **文献标识码** A

## Sliding Window-based Network Coding Transmission Scheme for Vehicular Ad hoc Networks

WANG Wan-liang LI Gui-sen YAO Xin-wei CEN Yue-feng

(College of Computer Science and Technology, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

**Abstract** Time-sensitive data transmission in vehicular Ad hoc networks (VANET) is particularly challenging due to the high mobility and the rapidly changing topology. To address this problem, we proposed a scheme that uses network coding with dynamic sliding window in opportunistic routing. By adjusting the window size according to the network status, it encodes different number of native packets into a coded packet such that it can tolerate the acknowledgement delay and improve the throughput in different cases. The scheme uses a lower triangular matrix coding method to smooth the decoding interval in the receiver. Simulations show that the scheme is able to increase the throughput and decrease the delay jitter efficiently. It is especially appropriate for time sensitive multimedia applications in VANET.

**Keywords** Slide window, Network coding, Opportunistic routing, VANET

## 1 引言

车载自组织网络(vehicular Ad hoc networks, VANET)<sup>[1]</sup>是一种移动轨迹受限的移动自组织网络,它具有节点高速移动、网络拓扑快速变化、能量不受限等特点。在 VANET 中,如何基于不可靠的高度动态信道环境进行有效的数据传输是十分重要的问题,而进行时延敏感的传输更是一个很大的挑战。

近年来发展的两种技术:机会路由和网络编码,对提升无线网络的数据传输效率起到了很大的作用。机会路由(Opportunistic Routing, OR)<sup>[2]</sup>利用无线信道天然的广播特性,即一个节点发送的数据可能同时被多个邻居节点成功接收,把每一个邻居节点的数据接收机会都利用起来,采用协同传输的思想,提高了无线网络的吞吐率。期望的传输次数(Expected Transmission Count, ETX)是机会路由选择候选转发中继最为常见的度量,ExOR<sup>[2]</sup>和 MORE<sup>[3]</sup>均使用 ETX 来挑选下一跳候选中继。然而 ETX 的计算需要获取全局的网络拓扑

信息,这在节点快速移动的 VANET 网络中难以实现。根据 VANET 网络拓扑快速变化的特点,本文提出一种仅需一跳拓扑信息的候选中继选择策略。

网络编码在无线传输的可靠性和吞吐上也有十分重要的作用。在随机线性网络编码<sup>[4]</sup>策略中,源节点把要发送的信息分成  $k$  个包  $p_i$ ,并在有限域上随机选取  $k$  个系数  $c_i$ ,将它们进行线性组合形成  $k$  个编码包  $P = \sum c_i p_i$ ,然后把这  $k$  个编码包发送出去。因此,编码数据包在传输过程中不具差异性,可以更有效地利用无线网络的空间冗余进行传输,目的节点只要接收到任意  $k$  个线性无关的编码包就可以解码还原数据包。网络编码在较大的数据文件传输中,编码和解码的复杂度较大,对此,研究者提出分代<sup>[5]</sup>(Generation)(也叫分段、分块)的编码方法,其将需要传输的文件分成多个代,每代拥有相同数目的分块,编码和解码操作只在代内的数据块之间进行。分代技术虽然能降低计算开销,但在目的节点收集到足够的编码包之前,几乎无法解码出该代的任意数据,一旦收集到足够的编码包,就可一次解码出整代的数据。分代编码使得原始

到稿日期:2011-10-15 返修日期:2012-01-19 本文受国家自然科学基金项目(61070043)资助。

王万良(1957—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为计算机网络控制、计算机控制与智能化、人工智能及其应用, E-mail: wwl@zjut.edu.cn;李桂森(1980—),男,博士生,主要研究方向为车载自组网与网络编码;姚信威(1986—),男,博士生,主要研究方向为无线流媒体传输;岑跃峰(1986—),男,硕士生,主要研究方向为无线干扰。

报文的解码具有突发性,给车-车间的流媒体传输等时延敏感的应用带来障碍。

Kien Nguyen 等<sup>[6]</sup>提出一种视频流分层编码策略,使重要的数据包能以较高的概率被提前解码。分层网络编码可以降低重要数据的译码延迟,却增加了全部数据的解码延迟。机会路由采用集中调度的方式,同一时刻只能允许一个邻居节点进行发送,这不利于空间重用。为了解决空间重用的问题,Szymon Chachulski 等<sup>[3]</sup>首次将两种技术相结合,提出基于随机线性网络编码的机会路由 MORE。MPTCP<sup>[7]</sup>则将多径路由和网络编码相结合来提高吞吐量。Mohammed Haloulsh 等<sup>[8]</sup>提出多代混合编码,后面代编码的数据包包含前面代全部的数据包,同时通过额外的冗余编码包来保护前面可能不能被解码的代。针对 MORE 需要精确的链路信息来评估节点需要传输多少个数据包的缺点,CCACK<sup>[9]</sup>通过编码的 *ack* 来通知上游节点,从而令上游节点发送的数据包个数更准确。但由于上游节点发送的数据包个数依赖于下游节点反馈的编码 *ack*,因此 CCACK 对于 *ack* 的丢失表现较为敏感。在文献<sup>[10]</sup>中,作者定义“可见包”的概念,即可见包的个数等于编码系数矩阵的秩。基于可见包的概念,即使不能解码,也可以提前发送 *ack*,通知源节点发送后面的数据包。但这种方案不能保证可见包能及时解码,甚至会造成接收新的编码包之后只能形成新的可见包而不是解码包。为了进一步提高网络的吞吐量,CodeOR<sup>[11]</sup>利用 TCP 流控制的方法,提出基于滑动发送窗口的编码传输机制,但 CodeOR 只能通过减小代的大小来降低解码延迟,而这会损害编码带来的好处。SlideOR<sup>[12]</sup>同样使用滑动窗口的技术,不再对数据包进行分代处理,而是根据可见包来发送 *ack*,但 SlideOR 并没有专门针对提前获取可见包或解码包的策略。CodeOR 和 SlideOR 都十分依赖 *ack* 的传输。部分网络编码<sup>[13]</sup>中,源节点不再对数据包编码,由邻居节点根据接收到的数据包进行编码转发,因此编码长度是随机的。此方法可使部分数据被提前解码,从而使报文较为均衡。

综上所述,现有编码技术基本都从吞吐量这个指标来考虑。而在时延敏感的应用中,例如流媒体传输中,因接收端的解码时间间隔而造成的时延抖动对 QoS 的影响十分重大。本文在机会路由的基础上,提出一种基于动态滑动窗口的网络编码传输策略(下文简称滑动编码策略),其通过下三角形式的渐进编码方法,既可以有效利用网络编码来提高网络吞吐,又可令接收端解码过程平滑进行,比传统的分代网络编码策略具有更高的吞吐和更小的时延抖动,更适合流媒体等时延敏感的数据传输。

## 2 基于单跳拓扑的机会路由候选中继选择

VANET 网络中由于节点高速移动,网络拓扑快速变化,因此难以通过全局拓扑信息来获取精确的端到端链路状态。本文提出一种仅仅根据本地一跳拓扑来选择候选中继的策略。假定网络中每一辆车都具有 GPS 等定位系统,以获取自身的位置信息,然后周期性地广播自己的位置,这样网络中每一个节点都能获得一跳邻居的位置。根据文献<sup>[14]</sup>,本文采用 Nakagami-*m* 信道模型作为 VANET 网络中的信道传输模型,并取衰落系数 *m* 为 3,然后根据距离和信道模型来估计自己到邻居节点的丢包率,并取平均丢包率小于 50% 的范围为

有效的传输距离。节点要传输数据时,把位于传输方向上有效传输距离范围内的邻居节点按照由远到近的顺序进行排序,取前 *s* 个节点作为候选中继。

如图 1 所示,候选中继分为两类,一类是指定了下一跳候选中继的传输中继,另一类是没有指定下一跳候选中继的普通中继。候选中继按照距离划分优先级,距离越远优先级越高,高优先级的先转发成为传输中继,低优先级的节点若侦听到高优先级的节点已经成为传输中继,则自动成为普通中继,只需广播一跳的编码包即可。

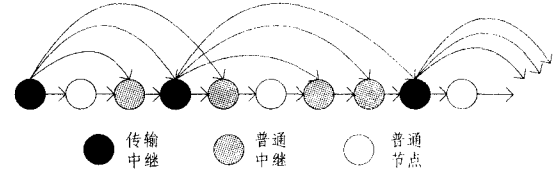


图 1 候选中继选择

## 3 分代网络编码中存在的问题

本文考虑源节点 *S* 和目的节点 *D* 之间的一个单播数据流。设在一次传输任务中要传输的原始数据包为  $p_i$ ,随机线性网络编码所发送的编码包为  $P_{m,n} = \sum_{i=1}^n c_i p_i$ ,其中  $c_i$  是在有限域中随机产生的编码系数。首先定义冗余编码包如下:

**定义 1** 源节点发送的编码包  $P_{m,n}(n \leq k)$  到达目的节点时,目的节点已解码数据包  $p_0 - p_k$ ,则称  $P_{m,n}(n \leq k)$  为冗余编码包。

### 3.1 分代网络编码中的冗余编码包

在基于分代的网络编码技术中,设代的规模为 *K*,即编码包中 *n* 固定为  $m + K - 1$ ,编码包为  $P_{m,m+K-1}$ ,源节点发送的数据包传输到目的节点的时延是  $T_{data}$ ,目的节点发送 *ack* 到源节点的时延是  $T_{ack}$ 。要令目的节点接收到 *K* 个线性无关的编码包,则源节点需要发送  $K'(\geq K)$  个编码包。源节点在接收该代编码包的 *ack* 之前的  $T_{data} + T_{ack}$  时间段内,将持续发送冗余的  $P_{m,m+K-1}$ 。 $T_{data}$  和  $T_{ack}$  由物理层设备和网络规模、负载等因素决定, $T_{data}$  和  $T_{ack}$  越长,源节点发送的冗余数据包就越多,端到端的吞吐就越小。利用类似 TCP 滑动窗口的机制,把滑动的单位由字节改为代,此类问题有所缓解。然而,在无法精确估计  $K'$  的情况下,对  $K'$  估计过小可能需要反复补偿传输编码包,大大增加了解码延迟;若估计过大又会增加冗余数据包的发送。下一跳节点一旦已获取到足够解码的编码包,就滑动到下一代进行发送<sup>[11]</sup>,这会降低传输的可靠性,特别是 VANET 这种高度动态的网络,节点随时会退出传输过程,更难保证可靠的传输。

### 3.2 分代网络编码中的时延抖动

分代编码技术在收集到足够解码整个代的数据之前不解码,一旦收集到足够的编码包,就可以一次解码出整代数据。因此,各个原始数据包的成功解码呈现突发性,编解码的过程造成数据流的时延抖动过大。分代编码的这个特征不利于时延抖动敏感的应用,例如流媒体数据流的传输。因此需要一种在链路质量较好时能够平滑解码,而在链路质量较差时又能充分利用网络编码来获得收益的编码方法。

## 4 基于动态滑动窗口的下三角网络编码

在无线传输中,可以通过减少冗余数据包的发送来提高

端到端的吞吐。然而由于无线信道不可靠,源节点无法知道发送完第  $K$  个编码包之后从第几个数据包开始是冗余数据包。要保证每次发送的数据包都是非冗余包,可以在每次发送的编码包中都添加新的信息,如每次都多编码一个新的原始数据包。

本文提出下三角网络编码方法。设最大的编码规模为  $K$ , 编码包  $P_{m,n}$  中的  $n$  并不是固定的值,而是从  $m$  逐步增加到  $m+K-1$ 。在  $m$  移动之前,编码系数组成的系数矩阵是一个下三角矩阵。

**定义 2** 参与编码的数据包的 ID 范围  $\{m,n\}$  称为编码窗口。

根据编码窗口的定义,其最大值是最大编码规模  $K$ 。

**定义 3** 节点缓存中保存的数据包的 ID 范围  $\{m_c, n_c\}$  称为缓存窗口。

编码窗口在源节点和中继节点中存在,而缓存窗口在中继节点和目的节点中存在。

首先给出编码包的格式。如图 2 所示,包头中的  $m$  和  $n$  指定本编码包的编码范围; $K$  是最大编码规模; $\maxID$  表示此数据流最大的数据包 ID; $rack$  表示本节点当前已知的目的节点的最大解码数据包 ID; $c_i$  是编码系数。在传输过程中,所有的数据发送和转发都使用广播,所有节点都使用混杂模式进行侦听。 $rack$  从目的节点逐跳感染到源节点,相当于延迟的  $ack$ 。由于编码窗口的滑动,本策略对  $ack$  的时延不敏感,只需要通过编码包中捎带的  $rack$  来获得  $ack$  平滑的前进速度即可。

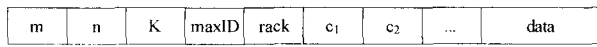


图 2 编码包格式

#### 4.1 源节点的编码窗口滑动过程

源节点  $S$  的编码窗口  $m$  和  $n$  的初始值都是 0,每发送一个数据包  $n$ ,就增加 1 直至最大值。若接收到  $ack/rack$ , $m$  就移动到所接收的  $ack/rack$  的位置,否则保持不动。

节点  $S$  的编码窗口变化过程如图 3 所示。当达到稳定状态时,编码窗口大小抵消了  $T_{data} + T_{ack}$  的影响,使得数据包的发送过程变得平滑。当链路质量不稳定时, $m$  前进的平均速度和  $n$  不一致,滑动窗口将会被动态地调整来适应不同的链路情况。当端到端的链路质量较稳定时, $m$  前进的平均速度将和  $n$  一致,编码窗口大小达到稳定状态。图 3 的虚线矩形框表示在  $m$  移动之前,发送出去的有效信息的系数呈现下三角矩阵的形状,当  $m$  移动时,则形成新的下三角矩阵。另外,为了保证目的节点能及时解码前面的数据包,当编码窗口大小超过阈值  $q=i \cdot K(i=0.1,0.2,\dots,1)$  时,发送  $r=0.25q$  个  $n$  相同的冗余编码包,然后  $n$  继续前进。

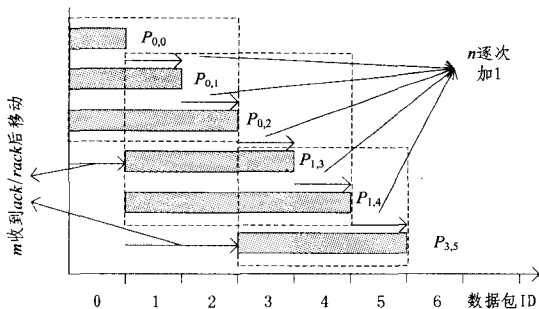


图 3 源节点的编码窗口滑动

#### 4.2 中继节点的缓存窗口滑动过程

每个中继节点维护一个缓存窗口和一个  $rack$  变量, $rack$  初始值和  $m_c$  相同。最大 ID 等于  $rack$  和最小 ID 等于  $rack$  的编码包都能对解码产生贡献,因此都需要保存,用于将来的编码转发,故缓存窗口大小为  $2K-1$ 。

当接收到一个新的编码包时,若编码包最大 ID 小于本节点  $rack$ ,则此编码包将被丢弃。当中继节点接收到更大的  $ack$  或者从编码包中捎带的  $rack$  时,将更新本节点的  $rack$ ,删除缓存中所有最大 ID 小于  $rack$  的编码包。当  $rack - m_c + 1 \geq K$  时,缓存窗口开始移动。

中继节点转发新的编码包时,应该尽可能编码所有可以被编码的数据包,以避免和其它中继节点转发的编码包相关。这里以一个例子来说明中继节点的窗口移动和编码窗口的决定过程。如图 4 所示,每一个编码包都被转发节点自己本身的  $rack$  划分为已确认解码和未确认解码两部分。当接收到新的编码包  $P_{7,14}$  时,将缓存窗口的  $rack=9$  更新为  $rack'=12$ ,并从缓存窗口中删除编码包  $P_{0,9}$ ,同时缓存窗口  $\{0,18\}$  更新为  $\{3,21\}$ 。在理想情况下,此中继节点应该转发  $rack'$  到最大 ID 之间的数据包的线性组合,即  $P_{12,14}$ 。然而,中继节点未必能解码至  $p_{11}$ ,因此满足上述条件的数据包的个数可能为零。为构造最大可能线性无关的编码包,编码长度应该增长到包含所有最大 ID 超过  $rack'$  的编码包直到达到最大编码长度  $K$ 。如图 4 所示,最佳的编码包是  $P_{5,14}$ ,共包含 3 个缓存中已有的编码包。

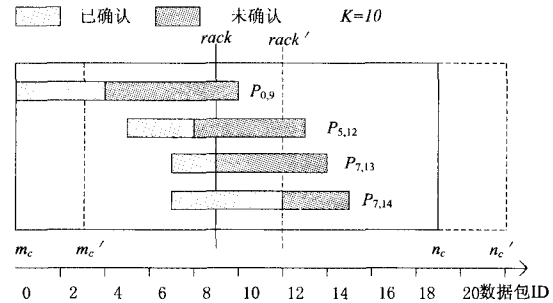


图 4 中继节点的缓存窗口滑动

编码窗口决定之后,先判断新接收的编码包在编码窗口范围内是否线性无关。若线性相关,则丢弃该编码包,否则将其加入缓存。若此时中继节点是被指定的候选中继之一,则还需要转发此编码窗口范围内的编码包的线性组合。

#### 4.3 目的节点的平滑解码

目的节点接收到的编码包长度不固定,因此其所包含的有效信息也不同。

**定义 4** 目的节点已解码数据包 ID 到编码包中最大数据包 ID 的距离为编码包的有效长度。

显然,若编码包  $P_{m,n}$  有效长度为零,即  $n$  小于  $ack$ ,此类编码包将被丢弃。若编码包有效长度小于其编码长度,即  $m$  小于  $ack$  时,将先移动编码包的编码窗口,再把  $P_{m,n}$  更新为  $P_{ack,n}$ ,如式(1)所示。

$$P_{ack,n} = P_{m,n} - \sum_{i=m}^{ack-1} c_i p_i \quad (1)$$

然后判断  $P_{ack,n}$  是否线性无关,若无关,则接收此编码包。最后,目的节点解码出新的数据包时,将发送一个携带  $ack$  的负载为空的编码包来通知它的邻居节点。

与分代的编码策略需要接收到  $k$  个线性无关的编码包才能开始解码不同,由于其有效长度没有固定,因此只要目的节

点接收到任意  $k$  个线性无关的有效长度小于等于  $k$  的编码包,即可解码出  $k$  个原始包。

**定义 5** 满足如下条件的矩阵称为类下三角矩阵:第  $i$  行前面  $k_i$  列元素非零;后面元素都是零; $k_i$  单调递增。

式(2)所示的是一个类下三角矩阵。根据类下三角矩阵的定义,目的节点接收到的编码包的系数矩阵就是一个类下三角矩阵(当  $k_i$  不满足单调递增时,对对应的行交换即可),其中,  $k_i$  就是该行系数所在编码包的有效长度。目的节点的编码系数矩阵形成一个  $k \times k$  方阵时,就可以解码出  $k$  个原始数据包。当链路质量较好时,  $k$  的值较小,获得平滑的解码过程;当链路质量较差时,  $k$  的值较大,通过解码较长的编码长度来获得网络编码增益。

$$\begin{pmatrix} c_{11} & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ c_{21} & c_{22} & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & c_{34} & \cdots & 0 \\ c_{41} & c_{42} & c_{43} & c_{44} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ c_{k1} & c_{k2} & c_{k3} & c_{k4} & \cdots & c_{kk} \end{pmatrix} \quad (2)$$

## 5 仿真实验与分析

本节分别对 MORE 协议和本文提出的编码策略使用 ns-3<sup>[15]</sup>进行仿真实验与分析,主要的度量指标是端到端吞吐率和目的节点的时延抖动。本文使用原始数据包解码时间间隔的标准差来衡量目标节点解码数据流时延抖动的程度,计算方法如式(3)所示。

$$E = \sqrt{\frac{1}{\max ID} \sum_{i=0}^{\max ID-1} (t_{i+1} - t_i - \bar{t})^2} \quad (3)$$

式中,  $\bar{t} = \frac{1}{\max ID} \sum_{i=0}^{\max ID-1} (t_{i+1} - t_i)$ ,  $t_i$  为第  $i$  个数据包的解码时间。标准差越小,表示目的节点解码越平滑,传输给上层的数据流越均衡,时延抖动就越小。

仿真实验场景是 4 车道的高速公路,节点间的距离服从指数分布<sup>[16]</sup>,源节点发送 512 个大小为 1kB 的数据包到目的节点。实验中,设定机会路由中最大的候选中继个数为 5,最大编码窗口大小和 MORE 中代的规模均为 128。MORE 是针对静态 mesh 网络的传输策略,在节点静止的网络中比较 MORE 和滑动编码策略的性能,而在模拟的交通流中对新策略进行测试。在交通流的模拟中,使用 IDM 智能车辆跟随模型和 MOBIL 换道模型<sup>[17]</sup>,在双向 4 车道的高速公路上,创建期望速度分别为 35m/s 和 20m/s 的两种类型的车辆,设源节点和目的节点为同一类型且为同向行驶的车辆。

(1) 实验一:固定端到端距离,密度变化。

第一组实验,源节点和目的节点在节点静止场景中相距 1000m,在模拟交通流场景中初始距离也为 1000m。在模拟交通流场景中,源节点和目的节点都是同类型且同向行驶的车辆,在整个仿真过程中它们的距离保持在 1000m 左右,误差不超过 50m,可认为是固定的距离。

图 5 显示了不同协议的吞吐率。MORE 的吞吐随着节点密度的增加反而降低,原因是 MORE 协议为了最大限度地重用空间,候选中继节点之间并没有互相协作,而是独立转发接收到的数据包。由于在 VANET 网络中,公路的宽度相对于节点的传输范围可忽略不计,因此网络可看作是线状的拓扑,机会路由形成的空间重用机会并不多,所以 MORE 中空间重用的机制在高密度的线状拓扑中反而会造成更多的冲

突,从而降低端到端的吞吐。低密度时,滑动编码策略由于机会路由而增加的可靠性不多,因此吞吐比 MORE 低。在交通流场景中,和数据传输方向同向行驶的车辆可利用车辆本身的运动来辅助数据的传输,因此吞吐反而比静止场景略高。在高密度时,滑动编码策略由于机会路由机制能够挑选出更合适的候选中继,因此通过节点运动来辅助数据传输的效果被动态的拓扑变化所抵消。故高密度时交通流场景的滑动编码策略吞吐比静止场景的小。图 5 的结果显示,即使在高度动态的场景,结合机会路由和下三角编码方法的滑动编码传输策略也能保持接近静止场景的性能,这表明此策略适合 VANET 网络的数据传输。另外,随着密度的增加,滑动编码策略的最大吞吐率比 MORE 提高了 78.16%。

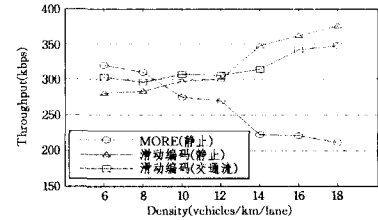


图 5 不同密度下的吞吐率

下面分析目的节点对各个数据包的解码时间间隔。从表 1 可以看出,随着密度的增加,MORE 的标准差越来越大,这是因为密度增大时,端到端的吞吐降低,代与代之之间的解码间隔越来越大。而滑动编码策略在两种场景中的标准差都要比基于分代的 MORE 小得多,平均分别为 44ms 和 46ms,因此解码过程平滑,传输到应用层的数据流时延抖动小。

表 1 不同密度解码间隔的标准差(单位:ms)

密度	MORE(静止)	滑动编码(静止)	滑动编码(交通流)
6	242	47	53
8	252	46	49
10	286	46	47
12	290	44	46
14	354	40	43
16	384	44	44
18	386	41	41

(2) 实验二:固定密度,端到端距离变化。

在第二组实验中,固定节点的密度为 10 vehicles/km/lane,改变源节点和目的节点之间的距离。

从图 6 可以看出,当距离较短时,滑动编码策略由于捎带 ack 的延迟,两种场景下的吞吐都比 MORE 小。当距离较长时,  $T_{data} + T_{ack}$  的影响变得十分显著,因此 MORE 的吞吐下降得很快。相反,滑动编码由于编码窗口的滑动,对因距离增大而造成的 ack 延迟不敏感,因此吞吐下降比 MORE 缓慢。当距离超过 1000m 时,滑动编码吞吐性能超过 MORE,显示滑动编码更具扩展性。

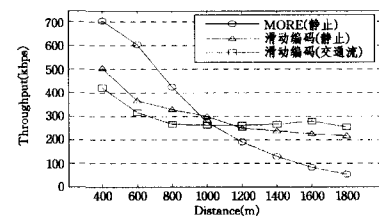


图 6 不同距离下的吞吐率

图 7 统计的不同距离下的平均编码窗口大小也显示了此 (下转第 93 页)

[7] 潘峰,李军,杨晓元,等. 基于图像复杂度的隐写方法研究[J]. 计算机应用研究,2011,8(27):2712-2714

[8] 王丽娜,郭迟,李鹏. 信息隐藏技术实验教程[M]. 武汉:武汉大学出版社,2004:119

[9] 李钢,张国良,张仁斌. 一种基于分块大容量的 LSB 算法[J]. 合肥工业大学学报,2006,29(6):707-711

[10] 高青山,罗向阳,刘铨,等. 一种基于混沌阵列的鲁棒零水印算法

[J]. 计算机科学,2005,32(9):76-81

[11] 谢建全,阳春华. 一种大容量的自适应信息隐藏方法[J]. 计算机应用,2007,27(5):1035-1037

[12] 肖磊. 一种具有高攻击类型判别能力的图像空域半脆弱水印算法[J]. 计算机科学,2010,37(2):286-289

[13] 陈登科,陈建华. 基于分块灰度统计特性的空域鲁棒信息隐藏算法[J]. 福州大学学报:自然科学版,2011,39(1):1-6

(上接第 88 页)

策略对网络规模的自适应性。在节点静止的场景中,当距离增大时,编码窗口也随之增大,以获得编码增益和缓和 *ack* 延迟的影响;动态交通流场景中因为节点的运动可以辅助数据传输,并且距离越长越明显,所以其编码窗口增长到一定程度后反而变小。

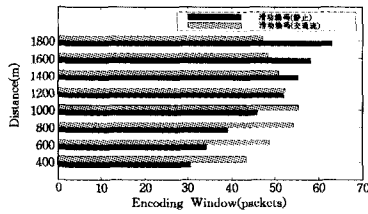


图 7 不同距离下的平均编码窗口大小

随着距离的增大, MORE 的吞吐迅速下降, 因为分代编码, 所以其时延抖动必然变得更剧烈, 表 2 中 MORE 的解码间隔标准差变大也证明了这一点。滑动编码策略虽然在这两种场景中的标准差都随着距离的增长而增长, 但最大仍然不超过 90ms, 其时延抖动仍然较小, 适合时延敏感的数据传输。

表 2 不同距离解码间隔的标准差(单位: ms)

距离	MORE(静止)	滑动编码(静止)	滑动编码(交通流)
400	110	41	42
600	129	39	41
800	189	37	43
1000	286	46	47
1200	418	56	55
1400	627	62	60
1600	1003	80	72
1800	1502	87	81

**结束语** 高度动态的车载自组织网络给多跳的时延敏感数据流传输带来了很大的挑战。利用机会路由和网络编码技术可有效提高传输的可靠性和吞吐。但机会路由中, 挑选候选中继的限制条件不利于在车载自组织网络中直接应用, 分代的网络编码技术也给数据的解码带来了较大的延迟。本文提出无需全局拓扑信息的机会路由和基于动态滑动窗口的下三角编码方法, 以此形成了一种能自适应不同网络环境的高效传输策略。其中滑动窗口依据实际的网络环境进行动态调整, 有效地提高了端到端的吞吐, 下三角的渐进编码方法平滑了数据包在接收端的解码时间间隔, 使之更适合流媒体等时延敏感的数据流传输。本文的主要不足在于未对冗余数据包发送个数和最大编码窗口的最优值进行讨论, 这还需要在后续工作中做进一步的完善。

### 参 考 文 献

[1] 常促宇, 向勇, 史美林. 车载自组网的现状与发展[J]. 通信学报, 2007, 28(11): 116-126

[2] Biswas S, Morris R. ExOR: opportunistic multi-hop routing for

wireless networks [A]// ACM SIGCOMM 2005 [C]. Philadelphia, PA, USA, August 2005

[3] Chachulski S, Jennings M, Katti S, et al. Trading Structure for Randomness in Wireless Opportunistic Routing [A]// ACM SIGCOMM 2007 [C]. Kyoto, Japan, August 2007

[4] Ho T, Médard M, Shi J, et al. On Randomized Network Coding [A]// Allerton Conference on Communication Control and Computing [C]. Monticello, IL, USA, October 2003

[5] Chou P A, Wu Y, Jain K. Practical network coding [A]// Allerton Conference on Communication, Control, and Computing [C]. Monticello, IL, USA, October 2003

[6] Nguyen K, Nguyen T, Cheung S C. Video Streaming with Network Coding [J]. Journal of Signal Processing Systems, 2010, 59: 319-333

[7] 夏卓群, 陈志刚, 赵明, 等. 无线网状网中自适应网络编码的 MPTCP 研究与设计[J]. 计算机科学, 2010, 37(4): 106-109

[8] Halloush M, Radha H. Network Coding with Multi-Generation Mixing: A Generalized Framework for Practical Network Coding [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2011, 10(2): 466-473

[9] Koutsonikolas D, Wang C C, Hu Y C. CCACK: Efficient Network Coding Based Opportunistic Routing Through Cumulative Coded Acknowledgments [A]// IEEE INFOCOM 2010 [C]. San Diego, CA, USA, March 2010

[10] Sundararajan J K, Shah D, Médard M, et al. Network coding meets TCP [A]// IEEE INFOCOM 2009 [C]. Riode Janeiro, Brazil, April 2009

[11] Lin Y, Li B, Liang B. CodeOR: Opportunistic routing in wireless mesh networks with segmented network coding [A]// The 16th IEEE International Conference on Network Protocols [C]. Orlando, Florida, USA, October 2008

[12] Lin Y, Liang B, Li B. SlideOR: Online Opportunistic Network Coding in Wireless Mesh Networks [A]// IEEE INFOCOM 2010 [C]. San Diego, CA, USA, March 2010

[13] 王晓东, 霍广城, 孙海燕, 等. 移动自组网中基于部分网络编码的机会主义路由 [J]. 电子学报, 2010, 38(8): 1736-1740

[14] Cheng L, Henty B E, Stancil D D, et al. Mobile Vehicle-to-Vehicle Narrow-Band Channel Measurement and Characterization of the 5.9 GHz Dedicated Short Range Communication (DSRC) Frequency Band [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2007, 25(8): 1501-1516

[15] The Network Simulator NS-3 [EB/OL]. <http://www.nsnam.org>. 2011. 10

[16] Bai F, Krishnamachari B. Spatio-temporal variations of vehicle traffic in VANETs: facts and implications [A]// Proceedings of the sixth ACM international workshop on Vehicular InterNetworking (VANET'09) [C]. Beijing, China, September 2009

[17] IDM/MOBIL [EB/OL]. <http://www.traffic-simulation.de>, 2011-10