

## 多跳无线网络中基于网络编码的多路径路由<sup>\*</sup>

陈贵海<sup>1+</sup>, 李宏兴<sup>2</sup>, 韩松<sup>3</sup>, 钟子飞<sup>3</sup>, 陈明达<sup>4</sup>

<sup>1</sup>(上海交通大学 计算机科学与工程系, 上海 200240)

<sup>2</sup>(香港大学 计算机科学系, 香港)

<sup>3</sup>(Department of Computer Science, University of Texas at Austin, Austin, USA)

<sup>4</sup>(香港城市大学 计算机科学系, 香港)

### Network Coding-Aware Multipath Routing in Multi-Hop Wireless Networks

CHEN Gui-Hai<sup>1+</sup>, LI Hong-Xing<sup>2</sup>, HAN Song<sup>3</sup>, ZHONG Zi-Fei<sup>3</sup>, Edward CHAN<sup>4</sup>

<sup>1</sup>(Department of Computer Science and Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

<sup>2</sup>(Department of Computer Science, University of Hong Kong, Hong Kong, China)

<sup>3</sup>(Department of Computer Science, University of Texas at Austin, Austin, USA)

<sup>4</sup>(Department of Computer Science, City University of Hong Kong, Hong Kong, China)

+ Corresponding author: E-mail: gchen@nju.edu.cn

**Chen GH, Li HX, Han S, Zhong ZF, Chan E. Network coding-aware multipath routing in multi-hop wireless networks. *Journal of Software*, 2010,21(8):1908–1919. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3810.htm>**

**Abstract:** This paper proposes a network coding-aware multi-path routing (CAMP) protocol, which forwards packets over multiple paths dynamically based on path reliability and coding opportunity. CAMP employs a route discovery mechanism which returns to the source multiple paths along with ETX (expected transmission count) of all links on each path. With its unique forwarding mechanism, CAMP splits the traffic among multiple paths and actively creates, while not merely waiting for, the coding opportunity by switching its path to maximize the switching gain and thus improves the network throughput. The experimental results demonstrate that CAMP can achieve much higher throughput than peer schemes for delivering packets in wireless networks.

**Key words:** network coding; multi-path routing; path switching; multi-hop; wireless network

**摘要:** 提出了一种基于网络编码的多路径路由机制 CAMP(network coding-aware multi-path routing).该机制能够根据路径的可靠性和编码机会,动态地在多条路径上进行数据包的传输.CAMP 的路由发现机制能够向源节点返回多条可能的路径以及各条路径的每条边上的 ETX(expected transmission count).与以往的多路径路由机制不同,CAMP 可以通过转换它的传输路径来动态地创造而非仅仅等待编码机会.利用这一独特的路由机制,CAMP 可以让多条路径分摊网络流量负载,并且最大化路径转换收益,从而改进网络的吞吐量.实验结果表明,在无线网络的数据传输过程中,CAMP 能够取得比其他路由机制高得多的网络吞吐量.

**关键词:** 网络编码;多路径路由;路径转换;多跳;无线网络

<sup>\*</sup> Supported by the National Natural Science Foundation of China under Grant Nos.60721002, 60825205 (国家自然科学基金); the National Basic Research Program of China under Grant No.2006CB303000 (国家重点基础研究发展计划(973))

Received 2008-04-08; Revised 2008-06-11; Accepted 2009-10-23

中图法分类号: TP393

文献标识码: A

无线网络具有不可靠的传输链路、动态的拓扑结构、受限的信道带宽和节点电量等显著特征.近年来,多路径路由在无线网络中得到了广泛的应用.多路径路由可以有效地提高数据传输的可靠性,在节点间平衡网络流量负载和电量消耗,降低端到端时延和路由发现频率,应对频繁的拓扑结构变化及其带来的不可靠的通信服务,以及改进网络的安全性等.但是,多路径路由又会导致多条路径上同时发送数据包所带来的网络拥塞问题,特别是当选择多条不相交的路径传输数据包时,拥塞会变得更加严重.

现有的多路径路由机制都在路由发现阶段预先确定了传输路径,没有考虑到数据包传输过程中存在的网络编码机会.这些编码机会在改进网络吞吐量方面起着重要的作用.本文提出了一种新型的基于网络编码的多路径路由机制,即 CAMP(network coding-aware multi-path routing),它可以根据各条路径的可靠性和网络编码的机会动态地改变传输路径.同时,文中提出了“路径转换收益”这一新的指标来决定转换到哪条路径,从而充分利用网络编码的机会.

CAMP 由两个阶段组成:路由发现阶段和数据包发送阶段.CAMP 的路由发现机制能够向源节点返回多条可能的路径以及各条路径上所有链路的 ETX.每条路径上的中间节点会为以后的路径交换决策保存其他候选路径信息.与现有的多路径路由机制不同的是,CAMP 可以从当前默认路径转换到具有最大路径转换收益的路径,从而动态地创造编码机会,而不仅是等待编码机会.实验结果表明,在无线网络的数据传输中,与其他基于网络编码的传统最佳路径路由、多路径路由和单路径路由机制相比,CAMP 能够大幅度提高网络吞吐量.

本文第 1 节介绍多路径路由机制和网络编码的相关工作.第 2 节详细描述基于网络编码的多路径路由机制(CAMP).第 3 节是相关的实验数据和性能分析.第 4 节对本文的工作进行总结,并指出未来可以进一步研究的工作.

## 1 相关工作

无线网络中已经提出了多种新型的路由标准,它们旨在提高可靠性和网络吞吐量并降低数据传输的端到端时延.下面将对此进行简单的讨论.

### 1.1 路由选择标准

期望传输次数(expected transmission count,简称 ETX)在文献[1]中被率先提出并应用于 DSR 和 DSDV 路由协议中.利用 ETX,路由协议能够在多跳无线网络中寻找出具有高吞吐量的路径.除了最小化成功传递一个数据包所需要的总的传输次数(包括重传)的期望值,ETX 还综合考虑了路径上相继链路之间的干扰、链路丢失率以及链路丢失率的不对称性等因素所带来的影响.

期望传输时间(expected transmission time,简称 ETT)和加权累计期望传输时间(weighted cumulative ETT,简称 WCETT)<sup>[2]</sup>是专门为多跳、多模应用场景设计的指标.它们被应用于多模链路质量源路由(multi-radio link quality source routing,简称 MR-LQSR)协议中.ETT 同时考虑了链路的丢失率和带宽,从而提高 ETX.WCETT 可以使用户通过修改控制参数的值,在信道多样性和路径长度之间作出权衡.

由于 CAMP 的目标是改进单模、多跳应用场景下的网络吞吐量,它的路由发现机制中采用了 ETX 进行路由管理.

### 1.2 多路径路由

网状网多路径路由(meshed multi-path routing,简称 M-MPR)<sup>[3]</sup>是一种网状网化的路由机制.它首先在源节点和目标节点之间构造一个网状网路径,然后在传输过程中每个转发节点有选择地向该网状网中某一个下游节点发送数据包.在每一跳中,系统会根据下游节点的状态动态地决定下一跳节点.

文献[4]对非连接多路径路由和网状网多路径路由的性能进行了分析,并提出在移动无线自组织网络中应用非连接多路径路由将降低路径的可靠性,而使用网状网化多路径路由可以取得更好的连通度和性能.文献[5]

提出了使用辫状多路径路由以提高无线传感器网络对节点失败的应对能力.该路由机制使用了一种被称为“局部路径加强”的路由发现方法.经过多次局部路径加强后,可以在一条主路径周围构造出一个辫状路径网.这种将路径加强局部化的方法在保证能量高效的同时,还为失败恢复找到了多条可选路径.自组织按需多路径距离向量(ad hoc on-demand multi-path distance vector,简称 AOMDV)<sup>[6]</sup>是一种基于 AODV<sup>[7]</sup>的协议.通过寻找出多条无环、链路不相交的路径,它可以从路由失败中快速、高效地恢复.多路径动态源路由(multi-path dynamic source routing,简称 MDSR)<sup>[8]</sup>在 DSR<sup>[9]</sup>的基础上进行了扩展.它能够计算出多条不相交的路径从而减少移动网络中的开销.分割多路径路由(split multi-path routing,简称 SMR)<sup>[10]</sup>是与 MDSR 相似的一种路由机制.不同的是 SMR 使用了一种改进的洪泛机制并且在多条路径之间分割了数据流量从而避免了网络拥塞.机会式多路径调度(opportunistic multi-path scheduling,简称 OMS)<sup>[11]</sup>根据各条路径的状态在多条路径之间灵活地分割数据流量.它优先选择那些具有低延迟、高吞吐量的路径.针对静态无线传感器网络和网状网中的单播、任播和组播问题,文献[12,13]给出了更多的其他多路径路由机制的介绍.

CAMP 与这些路由机制的不同之处在于路径选择方面.CAMP 所选取的路径不仅可以带来较高的可靠性和失败恢复能力,而且能够在传输过程中将进行网络编码的可能性最大化.

### 1.3 网络编码

网络编码是一种新兴工具,它可以用来改进无线网络的容错力、降低端到端时延以及提高网络的吞吐量.

COPE<sup>[14]</sup>是一种采用单路径路由的编码体系结构.它能够在无线网络中发掘更多的编码机会.COPE 的设计与实现表明,网络编码技术可以实际应用于真实的无线网络.但是,COPE 主要是针对单路径路由机制,并且它仅仅是等待而非主动创造编码机会.

增长编码(growth code)<sup>[15]</sup>通过复制数据包并将其密集地散布在邻居节点上来提高无线传感器网络对数据丢失的恢复能力.该方法的假设前提是节点不知道网络的拓扑结构,每个节点没有为数据包传输预先确定任何路径.一个编码后的数据包可能在多条路径上传输,而这些路径都没有预先确定.

文献[16]从理论角度对 COPE 类型的网络编码技术给无线网络吞吐量所带来的提高进行了分析.文中给出了一种理论上计算任意无线网络拓扑结构和任意并行单播流量模式下网络编码可取得的吞吐量的公式.与 COPE 路由机制不同的是,文献[16]中的路由机制考虑了可执行的网络编码机会.分析结果表明,与忽视网络编码的路由机制相比,考虑了可执行的网络编码机会的路由机制可以获得更高的端到端吞吐量.此外,该文献还针对是选取“邻近”路由以利用编码机会,还是选取“遥远”路由以减少相互干扰这两种方法之间的权衡进行了研究.

不同于 COPE 在一条预先确定的路径上等待机会的做法,CAMP 协议可以动态地转换路由来创造编码机会,同时又不会增加数据包的数目.

### 1.4 基于网络编码的多路径路由

为了达到更高的吞吐量,更好的失败恢复力、移动性和时延,目前有不少研究关注于多路径路由和网络编码的结合使用.

文献[17,18]基于 Diversity Coding<sup>[19]</sup>提出了一种多路径机制.该机制在编码过程中向原数据包添加一些冗余信息,然后将编码后的数据包分割成多个大小相同、互不重叠的数据块.这些数据块随后被发送到多条节点不相交的路径中.任意一个节点只要收集到足够的数据块使得它们的大小的总和不小于原数据包的大小,该节点就可以重建原数据包.

为了优化时延容忍网络(delay tolerant network,简称 DTN)中数据成功传递的概率,文献[20]提出了一种融合了擦除编码(eraser coding)和多路径路由的方法.该方法特别考虑了路径失败建模和 DTN 中的容量限制,并且成功地解决了擦除编码数据块在多条路径上的最优分配问题.文献[21]也给出了一种相似的方法,但它更多地关注于如何减少 DTN 中数据传递的时延.

以上这些方法都是将编码后的数据包分配在多条路径上传递.CAMP 则与 COPE 类似,只是将多个数据包

进行异或操作后把编码后的数据包广播出去.

## 2 CAMP 算法

本节详细介绍了 CAMP 的设计和实现细节.CAMP 由两个阶段组成:路由发现阶段和基于编码的数据传送阶段.理想情况下,如果在路由发现阶段就能预测出存在的编码机会,在进行路径选择时就可以优先考虑那些编码机会丰富的路径.但是,因为编码机会与数据流相关,在初始阶段预测出数据流模式是不可能的.CAMP 在数据传送过程中的每一跳动态地选取路径来将编码机会最大化,从而较好地解决了这个问题,并且改进了网络的吞吐量.表 1 总结了文中使用的标记

Table 1 Notations used in this paper

表 1 文中使用的标记

Notation	Description
$pre_i^s$	Predecessor of node $s$ on path $P_i$
$succ_i^s$	Successor of node $s$ on path $P_i$
$m_{i,j}$	Number of codable nodes on path $P_i$ and path $P_j$
$r_{i,j}$	Two-Way successful delivery probability between node $i$ and node $j$
$g_{i,j,k}$	Exchange gain at node $j$ when packets exchange between node $i$ and node $k$
$g_{i,j,k}^P$	Sum of exchange gain along path $P$
$G_{i,j,k}$	Gain of switching path from $P_i$ to $P_j$ , for packet exchanging with $P_k$

### 2.1 路由发现机制

本节将详细描述 CAMP 的路由发现方法.首先,第 2.1.1 节给出前提假设.然后,第 2.1.2 节对 EDSR 路由发现方法进行介绍.第 2.1.3 节展示优化 EDSR(EDSR-OPT).

#### 2.1.1 前提假设

无线网状网中,假设节点基本保持静止的状态.每个节点通过周期性地向邻居节点广播探测包,探测它的邻居节点并计算出自己与任意一个邻居节点之间链路的 ETX.文中假设无线网络中的链路是双向的,因此,路由应答数据包可以沿着路由请求所发现的路径原路返回.

#### 2.1.2 基本方法

CAMP 的路由发现方法 EDSR 由 DSR<sup>[9]</sup>演变而来.与 DSR 不同的是,它在将路由请求数据包转播出去之前,向其中添加链路的相关信息.在邻居节点接收到路由请求后,该节点将上一条链路的 ETX 添加到路由请求数据包中,再将其转发.如果节点收到重复的路由请求,则将其简单地丢弃.

目的节点收到路由请求时,向源节点发送一个包含所发现的路由以及路由上每条链路 ETX 信息的路由应答.一个路由请求通常会经过多条路径传送到目的节点.所以,路由发现过程结束时,源节点可以得到多条通往目的节点的路由.

但是,目的节点不必应答收到的每一个路由请求,目的节点仅需要将较好的路由返回给源节点.因此,目的节点需要把发现了较差路由的路由请求过滤掉.通常情况下,迟到的路由请求意味着它们经过了一些传输成功率很低的链路,或者经过了太多跳传输.因此,文中设定只有当路由请求在时间限制  $\tau$  内到达时,目的节点才会给出应答.所以,源节点在路由请求数据包中加入了一个计时器  $\tau$ .当  $\tau$  过期时,任何节点都不会转发或者应答该路由请求.

与 DSR 相似,EDSR 中每个节点在缓存中记录下新发现的路由以及路由上每条链路的 ETX.缓存机制不仅可以加快路由发现进程并减少路由请求的发送次数,而且为数据包传送阶段的路径转换提供了候选路由(如图 1 所示).

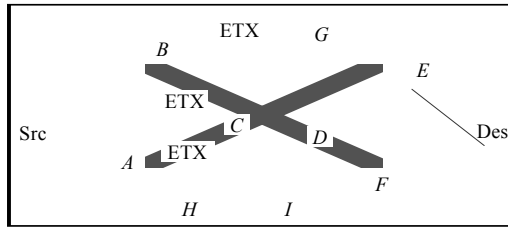


Fig.1 An example of EDSR  
图1 EDSR 示例图

2.1.3 优化处理(EDSR-OPT)

为了找出通向目的节点的路由,EDSR 在网络中进行洪泛查找.但是,洪泛方式会增加路由发现阶段的延迟并加重网络的负载,尤其是在网络规模较大的情况下.虽然 DSR 可以通过逐渐增加路由请求的 TTL 来限制传输次数,但仍然无法避免路由发现延迟的增加.

与 EDSR 不同的是,EDSR-OPT 进一步假设每个节点都了解自己以及源节点和目的节点所处的地理位置.由于无线网状网中的节点基本上处于静止状态的,各个节点可以在初始化阶段利用其他节点上的 GPS 设备进行三边测量操作得到自身的位置信息.利用地理信息 EDSR-OPT 可以把路由请求的洪泛范围限制在源节点和目的节点之间的一个菱形区域内.

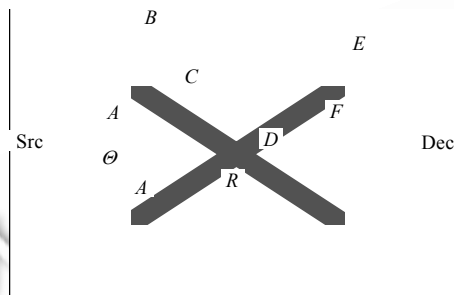


Fig.2 An example of EDSR-OPT  
图2 EDSR-OPT 示例图

图 2 给出了一个 EDSR-OPT 应用的例子.根据源节点设定的参数 $\theta$ ,EDSR-OPT 在源节点和目的节点之间定义了一个菱形区域  $R$  来限制路由请求的传播范围.当一个节点收到路由请求时,它首先会检查自己是否在区域  $R$  内,然后再决定是否向邻居节点转播这个路由请求.例如在图 2 中,节点  $B$  和节点  $E$  分别丢弃从节点  $A$  和节点  $D$  传来的路由请求,而节点  $C$  和节点  $F$  则把自己视为合适的转播者.通过引入受限区域  $R$ ,EDSR-OPT 不只是在目的节点对路径进行裁减,在网络中也会进行同样的操作.更重要是,由于受限区域的大小是与网络规模无关的,路由发现过程的可扩展性将得到显著提高.

假设当前节点、源节点和目的节点的物理坐标分别为 $(x,y)$ , $(x_s,y_s)$ 和 $(x_d,y_d)$ ,当前节点处在参数为 $\theta$ 的受限区域  $R$  中的条件如下:

$$\begin{cases} x > (y - y_s) \times \tan\left(\arctan\left(\frac{y_d - y_s}{x_d - x_s}\right) + \theta\right) + x_s \\ x < (y - y_d) \times \tan\left(\arctan\left(\frac{y_d - y_s}{x_d - x_s}\right) + \theta\right) + x_d \\ y > (x - x_s) \times \tan\left(\arctan\left(\frac{y_d - y_s}{x_d - x_s}\right) - \theta\right) + y_s \\ y < (x - x_d) \times \tan\left(\arctan\left(\frac{y_d - y_s}{x_d - x_s}\right) - \theta\right) + y_d \end{cases} \quad (1)$$

2.2 基于网络编码的数据包传送

本节将详细描述基于网络编码数据包传送机制的细节.首先在数据包传送阶段,源节点的数据流被同时分配到多条路径上.这些路径都是在第 2.1 节所描述的路由发现阶段探测到的.在数据包传送阶段,CAMP 会动态地转换路径来创造编码机会并提高网络吞吐量.

2.2.1 基本思想

在传统的单路径路由和多路径路由机制中,经过路由发现阶段后将得到确定的路由.虽然所选择的路径都















