

多跳无线网络中基于网络编码的多路径路由^{*}

陈贵海¹⁺, 李宏兴², 韩松³, 钟子飞³, 陈明达⁴

¹(上海交通大学 计算机科学与工程系,上海 200240)

²(香港大学 计算机科学系,香港)

³(Department of Computer Science, University of Texas at Austin, Austin, USA)

⁴(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-Hai¹⁺, LI Hong-Xing², HAN Song³, ZHONG Zi-Fei³, Edward CHAN⁴

¹(Department of Computer Science and Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

²(Department of Computer Science, University of Hong Kong, Hong Kong, China)

³(Department of Computer Science, University of Texas at Austin, Austin, USA)

⁴(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

^{*} 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)^[2]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)^[3]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)^[6]是一种基于 AODV^[7]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)^[8]在 DSR^[9]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)^[10]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)^[11]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^[14]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)^[15]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^[19]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^[9]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 τ 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 τ .当 τ 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).

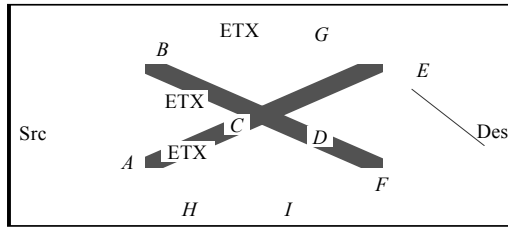


Fig.1 An example of EDSR
图1 EDSR 示例图

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.

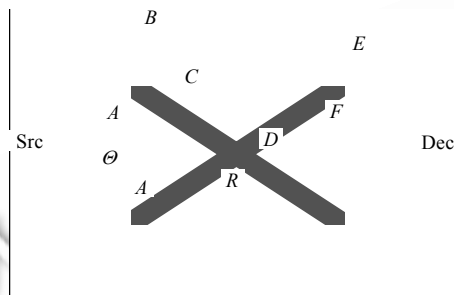


Fig.2 An example of EDSR-OPT
图2 EDSR-OPT 示例图

图2给出了一个 EDSR-OPT 应用的例子.根据源节点设定的参数 θ ,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 θ 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

是某种标准(例如最短路径)下的最优选项,但是它们忽视了其他路径上可能存在的丰富的编码机会.因此,系统的整体性能没有被充分发挥出来.

为了克服这个缺点,CAMP 使用了一种基于网络编码的数据包传送方法来充分利用编码机会.它可以动态地改变传送路径来主动创造编码机会,而不是单纯地等待.图 3 给出了一个应用场景的示例.其中,节点 A 需要将数据包 a 传送到节点 D,同时节点 B 需要将数据包 b 传送到节点 C.假设从节点 A 到节点 D 的最佳路径是 A-E-G-D,并且从节点 B 到节点 C 的最佳路径是 B-E-F-C.示例中进一步假设节点 G 无法监听到节点 B,同时节点 F 无法监听到节点 A.在这个场景下,COPE^[14]机制无法发现任何编码机会.这是因为这里不存在数据包交换,而 COPE 的机会式监听也没有起到作用.但是,如果把路径 E-A-C(目的节点为 C)和 E-B-D(目的节点为 D)缓存于节点 E 上,则 CAMP 将可以在节点 E 上对数据包 a 和 b 进行网络编码(异或操作),并将编码后的数据包(a⊕b)传输到节点 A 和 B(此时,A 到 D 的传输路径已转换为 A-E-B-D,B 到 C 的传输路径已转换为 B-E-A-C).节点 A 和 B 可以分别对 a⊕b 进行解码从而得到数据包 b 或 a.然后,节点 A 传送数据包 b 到节点 C,节点 B 传送数据包 a 到节点 D.需要注意的是,这个编码机会是无法由单路径路由机制发现的.因为在单路径路由中,节点 E 无法知道任何通往目的节点的备选路径.传统的多路径路由机制也无法利用这个编码机会,因为它们的路径是确定的,不能被动态地转换.

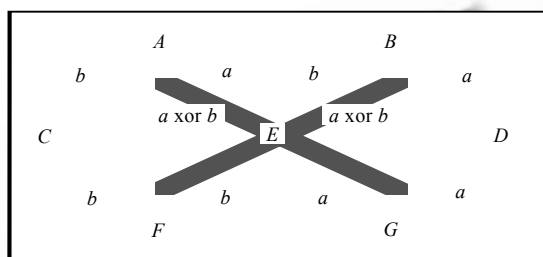


Fig.3 An example of packet forwarding with CAMP

图 3 CAMP 数据包传送示例图

2.2.2 流量分割

路由发现阶段结束后,源节点得到了多条通向目的节点的路径以及每条路径上所有链路的 ETX 信息.源节点对每条路径的 ETX 进行比较并选取其中最优的 K 条.这里,K 是一个由用户指定的参数.它定义了流量分割的粒度,并且通常情况下是一个较小的数值.例如,假设 e_i 是路径 P 上链路 i 的 ETX 值,那么路径 P 的 ETX 值, ETX^P 可以计算如下:

$$ETX^P = \sum_{i \in P} e_i, i \in P \tag{2}$$

假设源节点选择路径集 $\{P_i\}_{i=1}^K$ 来传送数据流 F,并且 $\{P_i\}_{i=1}^K$ 的路径 ETX 为 $\{ETX_i^P\}_{i=1}^K$,那么数据流 F 中被分配到路径 P_i 的部分为

$$F_i = \frac{ETX_i^P}{\sum_{j=1}^K ETX_j^P} \cdot F \tag{3}$$

CAMP 没有将数据流分配到所有可用的路径上来降低数据包传输时延,这样做有 3 个理由:(1) ETX 值较低的路径可靠性差,并会引发大量的数据包重传;(2) 试图在尽可能多的路径上同时传输数据包会造成严重的网络拥塞并将反过来影响到网络吞吐量;(3) TCP 协议层的数据包重组问题会带来更严重的后果.

2.2.3 路径转换收益的理论分析

基于网络编码的路径转换不是一个简单的操作.通过路径转换,CAMP 算法可以充分利用存在的编码机会.但是,从最佳路径转换到其他路径也会带来 ETX 的增加.CAMP 算法必须在所获得的编码收益和路径转换所带来的 ETX 损失之间作出一个权衡.只有当编码收益大于路径 ETX 值的损失时,路径转换操作才会被执行;否则,将仍然使用默认的路径.

下面,我们首先通过一个例子对交换收益给出定义并推导出它的理论期望值.然后,基于交换收益定义路径转换收益.通过对它进行定量的分析,系统决定是否执行路径转换操作.

定义 1(交换收益 $g_{i,j,k}$). 交换收益 $g_{i,j,k}$ 是在节点 i 和节点 k 之间,经过中间节点 j 成功地进行一次基于网络编码的数据包交换所减少的传输次数.

首先对图 4(a)中的简单应用场景进行分析.假设从节点 i 到节点 j 的单向传递成功率为 $r_{i \rightarrow j}$, $r_{i,j}$ 表示一次包括确认操作的双向传递的成功概率,例如 $r_{i,j} = r_{i \rightarrow j} r_{j \rightarrow i}$. 根据 ETX 标准^[1],在不考虑网络编码机会的情况下,一次成功的交换操作的期望传输次数为 $\frac{2}{r_{1,2}} + \frac{2}{r_{1,3}}$. 即使考虑了网络编码机会,由于只有节点 1 执行了编码操作,网络也需要 $\frac{1}{r_{1,2}} + \frac{1}{r_{1,3}}$ 次传输才能分别完成节点 2 和节点 3 到节点 1 的数据包传递.为了完成整个交换过程,节点 1 需要将编码后的数据包成功地传递给节点 2 和节点 3.

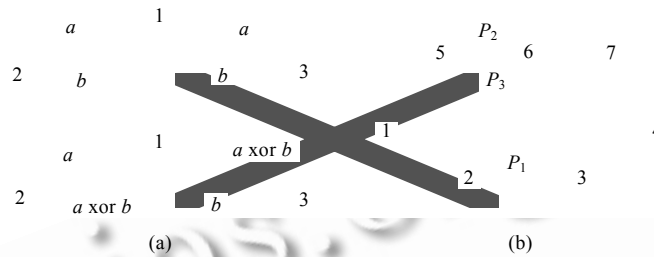


Fig.4 Examples of exchange gain and path switching gain
图 4 交换收益和路径转换收益示例图

假设在成功完成数据传输之前,需要 k 次重传操作.用 $p_{1,2}^k$ 表示从节点 1 到节点 2 的数据包传输任务仅在第 k 次成功完成,而另一个从节点 1 到节点 3 的数据包传输任务在第 k 次之前(包括第 k 次)就成功完成的概率,

$$p_{1,2}^k = s_{1,2}^{k-1} r_{1,2} \sum_{i=1}^k s_{1,3}^{i-1} r_{1,3}$$

从节点 1 到节点 3 的数据包传输任务仅在第 k 次成功完成,而另一个从节点 1 到节点 2 的数据包传输任务在第 k 次之前(包括第 k 次)就成功完成的概率标记为 $p_{1,3}^k$,

$$p_{1,3}^k = s_{1,3}^{k-1} r_{1,3} \sum_{i=1}^k s_{1,2}^{i-1} r_{1,2}$$

从节点 1 到节点 2 的数据包传输任务和从节点 1 到节点 3 的数据包传输任务都仅在第 k 次成功完成的概率标记为 $p_{1,2,3}^k$,

$$p_{1,2,3}^k = s_{1,2}^{k-1} s_{1,3}^{k-1} r_{1,2} r_{1,3}$$

因此,在带有网络编码的情况下,传输次数的期望值为

$$T = \sum_{k=1}^{\infty} (p_{1,2}^k + p_{1,3}^k - p_{1,2,3}^k) k$$

k 是成功完成传输时所执行的重传次数.这里, $s_{i,j} = 1 - r_{i,j}$, 可以归纳为 $\frac{1}{r_{1,2}} + \frac{1}{r_{1,3}} - \frac{1}{r_{1,2} + r_{1,3} - r_{1,2} r_{1,3}}$.

由于篇幅所限,文中省略了推导过程.因此,一次成功的基于网络编码的交换过程需要的传输次数的期望值为 $\frac{2}{r_{1,2}} + \frac{2}{r_{1,3}} - \frac{1}{r_{1,2} + r_{1,3} - r_{1,2} r_{1,3}}$. 同时,在节点 1 上的交换收益 $g_{1,2,3}$ 的值为 $\frac{1}{r_{1,2} + r_{1,3} - r_{1,2} r_{1,3}}$. 假设节点 i 和节点 k 成功地通过节点 j 交换数据包,那么在节点 j 的交换收益可以计算如下:

$$g_{i,j,k} = \frac{1}{r_{i,j} + r_{i,k} - r_{i,j}r_{j,k}} \quad (4)$$

基于交换收益的定义,可以给出路径编码收益和路径转换收益的定义,同时推导出其理论值的计算方法.

定义 2(路径编码收益 $g_{i,j,k}^P$). 路径编码收益 $g_{i,j,k}^P$ 是通过从路径 P_i 转换到路径 P_j 以便利用路径 P_k 上的编码机会而减少的传输次数.

定义 3(路径转换收益 $G_{i,j,k}$). 将路径从 P_i 转换到 P_j 以便与路径 P_k 交换数据包时,路径转换收益 $G_{i,j,k}$ 的值就是路径编码收益 $g_{i,j,k}^P$ 与路径 ETX 损失 $(ETX_1^P - ETX_2^P)$ 之间的差.

在图 4(b)中,节点 1 试图从路径 P_1 转换到 P_2 .这样,它就可以与路径 P_3 进行数据包交换并充分利用编码机会.但是,只有当节点 5 和节点 6 的路径编码收益大于路径转换所带来的路径 ETX 值增加(即 $G_{1,2,3}>0$)时,路径转换操作才会被执行:

$$g_{1,2,3}^P = g_{1,5,6} + g_{5,6,7} \quad (5)$$

$$G_{1,2,3} = ETX_1^P - ETX_2^P + g_{1,2,3}^P \quad (6)$$

假设路径 P_i 将被转换到路径 P_j 从而与路径 P_k 进行数据包交换. $\{N_s\}_{s=1}^{m_{j,k}}$ 代表路径 P_j 和 P_k 共有的节点集合.那么,路径编码收益 $g_{i,j,k}^P$ 和路径转换收益 $G_{i,j,k}$ 可以计算如下:

$$g_{i,j,k}^P = \sum_{s=1}^{m_{j,k}} g_{pre_j^s, succ_j^s} \quad (7)$$

$$G_{i,j,k} = ETX_i^P - ETX_j^P + g_{i,j,k}^P \quad (8)$$

这里, pre_j^s 和 $succ_j^s$ 分别是路径 P_j 上节点 N_s 的前驱节点和后继节点.只有当 $G_{i,j,k}>0$ 时,路径 P_i 和 P_j 之间才会进行转换.

2.2.4 路径选择算法

基于第 2.2.3 节中的路径转换收益计算方法,CAMP 在中间节点上为每一条路径 P_k 选取一条候选路径以便创造编码机会,并最大化路径转换收益.每当有新数据包到达本地节点时,针对当前队列中所有数据包,路径选择算法将每一条候选路径与除了其本身以外的所有路径的转换收益进行比较.然后,它选取出拥有最大收益的候选路径来传送数据包.假设当前存在 m 条默认路径及 n 条候选路径,路径选择算法的复杂度是 $O(m \cdot n)$.算法细节详见算法 1.

算法 1. 路径转换收益.

输入:路径集合 $P = \{P_i\}_{i=1}^m$ ($m \geq 1$),默认路径 P_k 和候选路径集合 $\{\tilde{P}_j^k\}_{j=1}^n$.

输出:最大化路径转换收益的候选路径的标号 l .

1: {第 2 行、第 3 行:初始化}

2: $G_{MAX} \leftarrow 0$

3: $k \leftarrow 0$

4: {第 5~19 行:计算最大收益}

5: **for** 候选路径 $j=1$ **to** n **do**

6: $G \leftarrow 0$

7: **for** 路径 $i=1$ **to** n **do**

8: $G_{old} \leftarrow G$ {将当前值备份}

9: **if** $i \neq k$ and $P_i \cap P_j \neq \emptyset$ **then**

10: {计算收益}

11: $G \leftarrow \text{CalcGain}(P_k, \tilde{P}_j^k, P_i)$

12: **if** $G \leq G_{old}$ **then**


```

13:          $G \leftarrow G_{old}$ 
14:     else
15:         continue
16: if  $G_{MAX} < G$  then
17:      $G_{MAX} \leftarrow G$  {更新最大收益}
18:      $l \leftarrow j$ 
19: return  $l$  {返回所选路径的标号}

```

3 性能比较

本节对 CAMP 机制的性能进行评估.测评中使用了 NS2 模拟实验平台^[22].以网络吞吐量为标准,通过两次实验来比较 CAMP 和其他机制的性能.在第 1 个实验中,网络的规模为 6 个节点.第 2 个实验使用了一个 4×4 共 16 个节点的网格拓扑结构.在所有的实验中,设定数据包大小为 1 500 字节.由于研究对象为多跳多路径无线网络,待选择的路由算法可区分为单路径路由、多路径路由、考虑网络编码的单路径路由和考虑网络编码的多路径路由.前文中已介绍了相关背景.实验中,针对每一类路由方法选取一种代表性的路由机制.它们分别是传统的最佳路径路由机制、多路径路由机制、COPE 机制和 CAMP.本节将 CAMP 与其他 3 种路由机制进行了比较.

3.1 6节点线状拓扑

在 6 个节点的网络中,假设每条链路的传递成功率都为 1.0.基于该拓扑结构,文中设计了两个实验场景.两个场景中,传输速率都被设置为 1Mbit/s,传输间隔为 0.2s.因此,网络流量负载实际上是很轻的.每个实验场景中,每种机制运行 50s.

算法 2. $CalcGain(i,j,k)$.

输入:路径 P_i, P_j 和 P_k .

输出: $G_{i,j,k}$.

```

1: {计算转换到更长的路径所带来的损失}
2:  $G_{i,j,k} \leftarrow ETX^{P_i} - ETX^{P_j}$ 
3: {第 4~7 行:计算路径转换收益}
4: for all 节点  $v \in P_j$  do
5:     {计算每个节点上交换收益的总和}
6:      $G_{i,j,k} \leftarrow G_{i,j,k} + g_{pre^v, v, succ^v}$ 
7: return  $G_{i,j,k}$ 

```

在第 1 个实验场景中,网络中仅有 1 条数据流在传输.从源节点到目的节点,该数据流经过了 3 跳.图 5 给出了该场景下,应用不同路由机制所得到的单条数据流的吞吐量.通过观察可以发现:

- (1) COPE 与传统的最佳路径路由机制具有同样的性能.这是由于在只有 1 条数据流的网络中,COPE 没有任何编码机会.
- (2) CAMP 与多路径路由机制的性能相同.同样由于只有 1 条数据流,CAMP 也没有获得任何编码机会.因此,它和多路径路由一样,仅仅是在多条路径上传送数据包而没有其他操作.
- (3) CAMP 与多路径路由机制的性能优于其他两种机制.这是因为它们不像其他两种机制那样仅仅使用最佳路径,而是在多条路径上传送数据.

在第 2 个实验场景中,网络中添加了一条从原目的节点到原源节点的逆向数据流.这样,网络中就有了两条相向传送数据包的数据流.这个场景中,因为产生了很多数据包交换操作,所以存在执行网络编码的机会.图 6 给出了 4 种路由机制下的单数据流吞吐量的比较.如图 6 所示,CAMP 的单数据流吞吐量最高,然后依次是多路径路由机制、COPE 机制和传统的最佳路径路由机制.CAMP 性能最佳的原因是,它同时采用了多路径路由和网

络编码.另外,在这种网络负载较轻的场景下,与传统的路由机制相比,COPE 并没有明显地提高吞吐量.这意味着各个节点上的数据包队列的长度较短,因而影响到了编码机会.

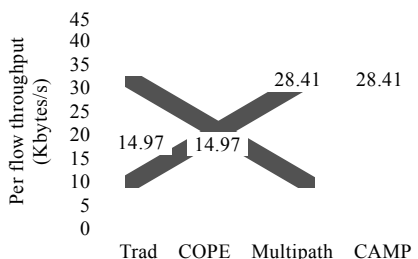


Fig.5 Per-Flow throughput of each routing scheme when there is only one data flow

图 5 仅有 1 条数据流时,各种路由机制的单数据流吞吐量

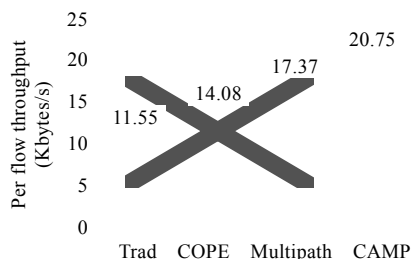


Fig.6 Per-Flow throughput of each routing scheme when there are two data flows

图 6 存在 2 条数据流时,各种路由机制的单数据流吞吐量

3.2 4x4网格状拓扑

本轮实验采用了一个 4x4 共有 16 个节点的网络.图 7 给出了该网络的拓扑结构,网络中引入了链路传输丢失率的概念.图中虚线标记的链路的丢失率为 10%,而实线标记的链路皆为零丢失率.

网络中存在着两条数据流,一条从网络的左上方节点流向右下方节点,另一条则沿着相反的方向传输.这两条数据流经过的跳数不同,并且它们的最佳路径上只有 2 跳是重合的.

图 8 对两种不同的网络负载下,CAMP 和其他 3 种路由机制的单数据流吞吐量进行了比较.两种情况下,CAMP 的性能都优于其他路由机制.当数据传输间隔为 0.15s 时,两条数据流的最佳路径的重合部分将承担很高的负载.这个情况下,传统的路由机制承受着严重的冲突和拥塞,并且其性能低于网络负载较轻时(传输间隔为 0.2s).由于利用了网络编码从而显著减少了网络负载,COPE 的性能优于传统路由机制.而 CAMP 的表现最优.主要原因是,它通过主动创造编码机会可以执行更多的网络编码操作.当然,CAMP 的多路径路由特性也帮助其增加了吞吐量.

为了更加彻底地对 CAMP 和 COPE 进行比较,实验中改变了传输速率参数.如图 9 所示,在 1Mbit/s~4Mbit/s 这 4 种传输速率中,CAMP 总是明显地比 COPE 具有更高的单数据流吞吐量.CAMP 所得到的吞吐量平均比 COPE 提高了 70%.

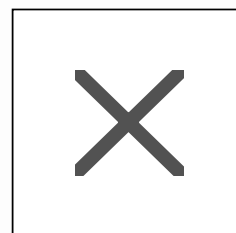


Fig.7 Example of 4x4 grid topology
图 7 4x4 网格拓扑示例图

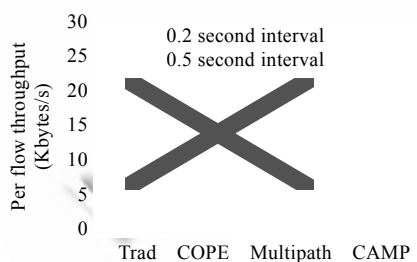


Fig.8 Per-Flow throughput comparison of each routing scheme under different traffic load

图 8 不同网络负载情况下,各种路由机制单数据流吞吐量的比较

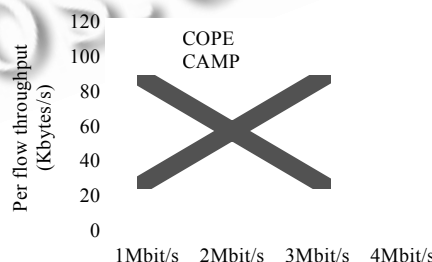


Fig.9 Per-Flow throughput comparison of CAMP and COPE under different traffic load

图 9 不同传输速率下,CAMP 和 COPE 单数据流吞吐量的比较

4 总 结

本文提出了一种基于网络编码的多路径路由机制(CAMP).它基于路径的可靠性和编码机会,动态地在多条路径上传送数据包.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接的 ETX.与以往的多路径路由机制不同的是,CAMP 可以通过转换它的传输路径来动态地创造而不是仅仅等待编码机会.利用这一独特的路由机制,可以让多条路径分摊网络负载并且最大化路径交换收益,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中,CAMP 能够取得比其他路由机制高得多的网络吞吐量.

未来的工作将在网络规模更大、拓扑结构更复杂的应用场景中对 CAMP 的性能进行分析,并研究 CAMP 中数据包重组的问题,以及考虑 CAMP 在实际应用中实现.第 2.2.4 节所介绍的算法使用两两配对的方式比较出最大路径转换收益,但是没有考虑到多条路径对于路径转换收益的综合影响.另一方面,复杂的评价标准将大幅度增加中间节点上的计算开销并延长传输时延.今后的工作将探寻一种简单而又精确的方法,使其能够综合考虑多条路径带来的影响.另外,还会对基于网络编码的计时控制进行探索,希望能够在多跳无线网络中最大化编码机会,同时保持端到端时延不变.

References:

- [1] de Couto DSJ, Aguayo D, Bicket J, Morris R. A high-throughput path metric for multi-hop wireless routing. In: Proc. of the 9th Annual Int'l Conf. on Mobile Computing and Networking (ACM MOBICOM 2003). New York: ACM Press, 2003. 134–146.
- [2] Draves R, Padhye J, Zill B. Routing in multi-radio, multi-hop wireless mesh networks. In: Proc. of the 10th Annual Int'l Conf. on Mobile Computing and Networking (ACM MOBICOM 2004). New York: ACM Press, 2004. 114–128.
- [3] De S, Qiao CM, Wu HY. Meshed multipath routing with selective forwarding: An efficient strategy in wireless sensor networks. Elsevier Computer Communications Journal, 2003,26(4):481–497.
- [4] Mosko M, Garcia-Luna-Aceves JJ. Multipath routing in wireless mesh networks. In: Proc. of the 1st IEEE Workshop on Wireless Mesh Networks (IEEE WiMesh 2005). IEEE Press, 2005.
- [5] Ganesan D, Govindan R, Shenker S, Estrin D. Highly-Resilient, energy-efficient multipath routing in wireless sensor networks. ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review, 2001,5(4):11–25.
- [6] Marina MK, Das SR. On-Demand multipath distance vector routing in ad hoc networks. In: Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Network Protocols (ICNP 2001). IEEE Press, 2001. 14–23.
- [7] Perkins CE, Royer EM. Ad hoc on-demand distance vector routing. In: Proc. of the 2nd IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications. IEEE Press, 1999.
- [8] Nasipuri A, Castañeda R, Das SR. Performance of multipath routing for on-demand protocols in ad hoc networks. ACM/Kluwer Mobile Networks and Applications (MONET) Journal, 2001,6(4):339–349. [doi: 10.1023/A:1011426611520]
- [9] Johnson DB, Maltz DA, Broch J. DSR: The dynamic source routing protocol for multihop wireless ad hoc networks. In: Perkins CE, ed. Proc. of the Ad hoc Networking. Boston: Addison-Wesley, 2001. 139–172.
- [10] Lee SJ, Gerla M. Split multipath routing with maximally disjoint paths in ad hoc networks. In: Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Communications (IEEE ICC 2001). IEEE Press, 2001. 3201–3205.
- [11] Cetinkaya C, Knightly EW. Opportunistic traffic scheduling over multiple network paths. In: Proc. of the 23rd IEEE Conf. on Computer Communications (INFOCOM 2004). IEEE Press, 2004.
- [12] Flury R, Wattenhofer R. Routing, anycast, and multicast for mesh and sensor networks. In: Proc. of the 26th IEEE Conf. on Computer Communications (INFOCOM 2007). IEEE Press, 2007. 946–954.
- [13] Lou WJ, Liu W, Zhang YC. Performance optimization using multipath routing in mobile ad hoc and wireless sensor networks. Combinatorial Optimization in Communication Networks, 2006,18:117–146. [doi: 10.1007/0-387-29026-5_5]
- [14] Katti S, Rahul H, Hu WJ, Katabi D, Médard M, Crowcroft J. Xors in the air: Practical wireless network coding. IEEE/ACM Trans. on Networking (TON), 2008,16(3):497–510. [doi: 10.1109/TNET.2008.923722]

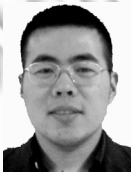
- [15] Kamra A, Misra V, Feldman J, Rubenstein D. Growth codes: Maximizing sensor network data persistence. In: Proc. of the 2006 Conf. on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communications (ACM SIGCOMM 2006). New York: ACM Press, 2006. 255–266.
- [16] Sudipta S, Rayanchu S, Banerjee S. An analysis of wireless network coding for unicast sessions: The case for coding-aware routing. In: Proc. of the 26th IEEE Conf. on Computer Communications (INFOCOM 2007). IEEE Press, 2007. 1028–1036.
- [17] Tsirigos A, Hass ZJ. Analysis of multipath routing, part 1: The effect on the packet delivery ratio. IEEE Trans. on Wireless Communications, 2004,3(1):138–146. [doi: 10.1109/TWC.2003.821207]
- [18] Tsirigos A, Hass ZJ. Analysis of multipath routing, part 2: Mitigation of the effect of frequently changing network topologies. IEEE Trans. on Wireless Communications, 2004,3(2):500–511. [doi: 10.1109/TWC.2004.825355]
- [19] Ayanoğlu E, I CL, Gitlin RD, Mazo JE. Diversity coding for transparent self-healing and fault-tolerant communication networks. IEEE Trans. Communications, 1993,41(11):1677–1686. [doi: 10.1109/26.241748]
- [20] Jain S, Demmer M, Patra R, Fall K. Using redundancy to cope with failures in a delay tolerant network. ACM SIGCOMM Computer and Communication Review, 2005,35(4):109–120.
- [21] Wang Y, Jain S, Martonosi M, Fall K. Erasure-Coding based routing for opportunistic networks. In: Proc. of the SIGCOMM Workshop on Delay Tolerant Networking and Related Networks. New York: ACM Press, 2005. 229–236.
- [22] NS2. <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>



陈贵海(1963—),男,江苏盐城人,博士,教授,博士生导师,CCF 高级会员,主要研究领域为并行算法,无线网络.



钟子飞(1982—),男,博士,主要研究领域为无线网络.



李宏兴(1982—),男,博士生,主要研究领域为 P2P 网络,无线网络.



陈明达(1960—),男,博士,副教授,主要研究领域为实时系统调度,无线网络.



韩松(1981—),男,博士生,主要研究领域为实时系统调度,无线网络.