

# 无线网络编码综述<sup>\*</sup>

熊志强 黄佳庆 刘 威 杨宗凯

(华中科技大学电子与信息工程系 武汉 430074)

**摘 要** 网络编码是近年来通信领域的重大突破,其基本思想是网络节点不仅参与数据转发,还参与数据处理,这样可以大幅提高网络性能。本文关注网络编码在无线网络环境中的研究与应用,在评述了网络编码在无线自组织网络、无线传感器网络和无线网状网三种无线网络类型上的最新研究进展之后,对其发展趋势进行展望。

**关键词** 网络编码,无线自组织网络,无线传感器网络,无线网状网

## Network Coding in Wireless Networks: A Survey

XIONG Zhi-Qiang HUANG Jia-Qing LIU Wei YANG Zong-Kai

(Department of Electronics and Information Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)

**Abstract** The Network Coding evolved recently is an important breakthrough in field of communications. The basic concept of Network Coding is that intermediate nodes in the network not only forward but also process the incoming information flows, which results in significant benefits. In fact, wireless networks are a most natural setting for Network Coding because the very characteristics of wireless links that complicate routing, namely, their unreliability and broadcast nature, are the very characteristics for which coding is a natural solution. This paper firstly overviews the development of Network Coding, and then summarizes its latest research in wireless ad hoc networks, wireless sensor networks and wireless mesh networks. In conclusion, we point out its future direction based on the analysis and remark of problems remaining unsolved in wireless networks.

**Keywords** Network coding, Wireless Ad Hoc networks, Wireless sensor networks, Wireless mesh networks

## 1 引言

网络编码(Network Coding)是进入 21 世纪后通信领域的一项重大突破<sup>[1]</sup>,它融合了编码和路由的概念,通过允许对来自不同链路的信息进行编码组合,使得网络节点既实现路由功能又实现编码功能。在这种全新的体系结构下,网络性能可以达到最大流传输的理论极限。图 1 所示的蝴蝶网络是网络编码实现多播最大容量的例子。源节点  $S_1$  和  $S_2$  分别组播 1 比特到目的节点  $R_1$  和  $R_2$ ,假设各链路的容量为 1。图 1(a)中采用的是传统路由方法,即节点 C 一次只能传送 1 比特到节点 D,节点 D 也只能传送 1 比特到节点 E 和 F,节点 C 和 D 之间的链路不得不使用了两次,节点 E 和 F 总共收到 3 比特,平均速率是 1.5 比特/单位时间;图 1(b)采用网络编码方法,节点 C 对输入信息流进行编码,将编码的结果  $x_1$  和  $x_2$  的异或值(模 2 和)传送到节点 D,再传送给节点 E 和 F。节点 E 根据自身已收到的信息  $x_1$  和  $x_1+x_2$ ,可以解码出  $x_2$ 。同样,节点 F 也能解码出完整的信息,这样所能达到的平均速率是 2 比特/单位时间。在本例中,采用网络编码使得每条链路只使用了一次,这样既使得网络负载比较均衡,又节省了传输次数,同时减小了网络时延,增大了网络吞吐量。

网络节点对信息比特流进行特定操作,如模 2 和、有限域上的运算等,而不是仅仅复制转发,就称之为网络编码。如果网络中所有节点对其输入信息进行线性操作,则称为线性网络编码,否则称为非线性网络编码。如果网络节点对信息进

行操作的系数是随机选取的,则称为随机网络编码;如果是通过算法确定出来的,则称为确定性网络编码。

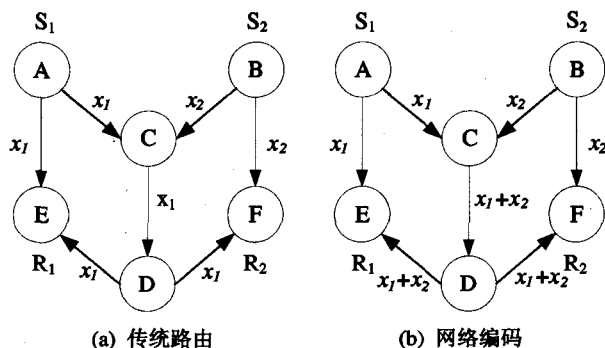


图 1 蝴蝶网络

继 Ahlswede 等提出网络编码概念之后<sup>[1]</sup>,Li 等人证明了使用线性网络编码已经能够足够达到网络多播容量<sup>[2]</sup>。Médard 等提出了网络编码的代数框架<sup>[3]</sup>,并证明了存在满足多播容量的线性时不变编码。后两者的工作为网络编码的发展准备了必要的理论条件。随机网络编码<sup>[6]</sup>是由 Ho、Médard 等人在 2003 年提出的,它的提出拓宽了网络编码的适用场景,使得网络编码不再局限于确定的网络拓扑和集中式的算法。Cai 利用分布式网络编码来纠正整个网络中的差错<sup>[4]</sup>,并论述了网络编码在安全方面的应用<sup>[5]</sup>,为网络编码增加了新的应用领域。

<sup>\*</sup>国家自然科学基金资助项目(60572049)。熊志强 博士研究生,研究方向为传感器网络、网络编码;黄佳庆 副教授,研究方向为 P2P 网络、多媒体;刘 威 副教授,研究方向为无线网络;杨宗凯 博士后,教授,博士生导师,研究方向为现代通信网络。

目前,网络编码已被证明是可以逼近网络容量理论传输极限的有效方法,已被国际学术界和美国军方认定为解决网络问题的重要手段。具有确定拓扑的有线网络的网络编码已受到广泛的关注,但网络编码的无线研究和应用还处于探索阶段。然而,无线网络环境应该是网络编码首先被应用的领域<sup>[7]</sup>,因为无线链路的不可靠性和物理层广播特性非常适合使用编码的方法。应用网络编码,可以解决传统路由、跨层设计等技术无法解决的问题,提高网络性能。具体来说,网络编码在无线网络中的应用可以提高网络的吞吐量,尤其是组播吞吐量;可以减少数据包的重传次数,降低无线发送能耗;采用随机网络编码,即使网络部分节点或链路失效,最终在目的节点仍然能恢复原始数据,增强网络的容错性和鲁棒性;无需复杂的加密算法,采用网络编码就可以提高网络的安全性,等等。本文考虑的无线网络主要指的是无线自组织网络(wireless Ad hoc networks)、无线传感器网络(wireless sensor networks)和无线网状网(wireless mesh networks)。

网络编码的应用可以改善网络性能,甚至可以改变网络结构、改变网络协议设计方法,可以说网络编码正在给现有的网络带来革命性的变化。国外多所著名大学如普林斯顿大学、麻省理工、瑞士 EPFL 学院等多家 IT 公司的研究中心,包括微软研究院、贝尔实验室、AT&T 的香农信息实验室等都在积极开展对网络编码理论和应用的研究。而国内目前对该领域的研究还没有起步,期望本文能推动国内对网络编码这一新兴网络技术的关注与研究。本文定位在跟踪无线网络编码这一国际前沿课题的发展,并从提高吞吐量、节能和增强网络鲁棒性、安全性等主要方面归纳了国内外网络编码在无线网络方面的研究进展情况。最后,基于对网络编码未解决问题以及应用网络编码而产生的新问题的分析和评述,讨论了今后该领域的研究方向。

## 2 无线自组织网络

### 2.1 吞吐量

为了解决优化 Ad Hoc 网络吞吐量的问题,Jun Yuan 等<sup>[9]</sup>把该问题分解为两个子问题:第一个子问题是优化网络层的多跳路由问题;第二个子问题是优化物理层能量分配问题。他们提出的是一种跨层优化的策略,该策略分别在网络层和物理层平衡链路带宽的供需,在这种平衡状态下,提供了利用网络编码优化吞吐量的流路由方法。与此类似,Wu Yunnan 等提出了一种中心化的算法<sup>[8]</sup>,该算法主要是进行递归的跨层优化,在获知物理层状态的同时,对 MAC 层分时调度和网络层最大流指派进行联合优化。

运用网络编码可以在很大程度上提高网络吞吐量,但是不可避免地会增加网络的复杂性。因此,不少研究者致力于提高 Ad Hoc 网络的组播吞吐量,同时降低因采用网络编码带来的复杂性<sup>[10,11]</sup>。Kung 等从网络编码的角度把网络链路划分为两类:进入中继节点的链路和进入目的节点的链路<sup>[10]</sup>。他们证明,在达到同样组播容量的前提下,只需要在进入中继节点的链路进行网络编码即可。而对进入目的节点的链路,只采用路由策略,降低了网络的复杂性。Tracey 等人主要考虑的是时变的、链路容量受噪声干扰影响的无线网络模型<sup>[11]</sup>。Tracey 在时变无线网络模型<sup>[12]</sup>的基础上,使用了动态的压力反馈算法来分别优化网络编码和路由。结果表明,在网络状况恶劣的条件下,网络编码和路由之间组播吞吐量的差别并不大,网络编码的优势体现在降低网络复杂性上;

在网络状况较好的条件下,网络编码相对于路由方法,能在很大程度上提高组播吞吐量。这就为根据网络状况动态调整网络编码算法提供了可能。

### 2.2 节能

Wu Yunnan 和 Chou 在组播方面提出了应用网络编码的最小化能量解决方法<sup>[16]</sup>。最小化能量组播就是源节点传输信息到目的节点集,使得传输每比特信息消耗的能量最小。两位研究者比较了路由和网络编码的信息传输耗能情况,指出:如果路由方式是把无线 Ad Hoc 网络抽象成组播树,树型结构的每条边代表着广播链路的每比特能耗,那么最小化能耗的组播问题就划归为在组播速率一定的条件下最小化沿着组播树路径的代价总和的问题,属于 NP 难问题。而在采用网络编码的情况下,该问题可以转化为线性规划的问题,在多项式时间内可解,并且在能耗和计算量上都要优于传统路由。经过独立的研究工作,Lun 等人也得出了相似的结论<sup>[17]</sup>。并且,为了在动态变化和不可靠的网络环境下实现最小化能量的信息组播,Lun 和 Médard 还提出了非中心化和随机化的网络编码解决方法<sup>[20,21]</sup>。

广播通信是 Ad Hoc 网络中一种很普遍的通信方式。在很多路由协议中,网络大部分节点都需要对全网广播自身的某些信息。用路由的方法实现最小化能量广播是非常困难的。已经证明,解决最小化能量广播问题的最小权生成树算法是 NP 完全问题<sup>[18,19]</sup>。另外,也有人提出采用启发式算法<sup>[22]</sup>来解决这个问题,但是计算开销和时间消耗都比较大。研究者开始转而利用网络编码来解决广播通信中的能量有效性问题<sup>[23,39,40]</sup>。Fragouli 等首先提出了一种针对简单圆形拓扑和矩形拓扑的网络编码算法<sup>[23]</sup>,该算法相对于路由方法的精妙之处在于充分利用了无线通信的广播特性,一次通信就让邻居节点都获得消息,邻居节点同时也获得自身邻居的数据包并进行编码。这样,经过少数几次广播之后,每个节点都会获得全网节点的信息。这种在简单网络拓扑结构下的广播算法推广到节点随机分布的一般网络中,仍然取得了很好的效果。然而,不足之处是在网络丢包率较高的情况下(丢包率大于 0.5),节点重新广播的概率较大。随后,Fraguoli 等又进行了相关的改进工作<sup>[39,40]</sup>。

为了提高无线网络中的单播通信效率,传统的解决办法有重传、端到端编码(前向纠错码 FEC)、链路编码、路径编码等。现在有研究者提出了网络编码和分布式流优化结合的方法<sup>[24]</sup>,这种方法能够在很大程度上提高传输效率,有效地减少重传次数,增大传送成功概率,从而降低能量消耗。不足之处在于该研究针对的网络节点数目较少(12 个节点)。另外,随着网络规模的扩大,该方法不能避免网络数据包重传次数的增加。

### 2.3 鲁棒性

在无线网络中,空间差异性的利用已经被广泛认为是克服无线信道衰减的最有效方法之一。Chen 等人研究了在分布式天线系统和多人多出系统(DAS-MIMO)中线性网络编码如何提高网络鲁棒性方面的问题<sup>[25]</sup>。在 DAS 模型中,Chen 引入网络编码的概念,经过理论推导和实验仿真,证明了在分布式天线系统中,不论有无辅助天线,网络编码都能提高网络的性能,尤其是减小系统丢包损耗。Chen 研究的不足之处在于主要关注的是小型网络中线性网络编码的应用,没有考虑分布式随机网络编码和网络规模较大的情况。在大规模的无线网络中,可以在网络编码的基础上结合应用分布式

信道编码,进一步提高网络性能。

## 2.4 安全

对于组播中数据包恶意修改(也叫拜占庭修改, Byzantine Modification)的检测,传统上是使用消息认证码<sup>[27]</sup>或者数字签名<sup>[28]</sup>的方法。网络编码在信息安全领域的应用产生了一种基于数据包的随机网络编码检测策略<sup>[26]</sup>,该策略首先对原始数据进行简单多项式函数哈希变换,然后把得到的结果添加到每一个原始数据包内。接收节点经过比较解码后的数据和哈希值就可以判断数据包是否被修改过,这样可以防止中间人(Middleman)攻击。由于没有引入复杂加密函数,这种方法计算量小,而且检测概率可以结合通信控制开销、网络编码复杂程度和检测时间这些因素进行调控。这种方法唯一需要的是接收节点需要预先获得至少一个没有被恶意修改过的数据包,并且数据包的内容不能被攻击者知晓,抗已知明文攻击效果不好。

## 3 无线传感器网络

相对于 Ad Hoc 网络,无线传感器网络密度较大、移动性不强,通常运行在无人值守的恶劣甚至危险的远程环境中,能源无法替代。设计有效的策略,延长网络的生命周期,成为无线传感器网络的核心问题。传感器网络是以数据为中心的,非常适合采用网络编码技术。

### 3.1 吞吐量

网络编码作为路由的超集,已经被证明对于提高某些网络<sup>[1,30]</sup>的吞吐量有着很大的作用。然而,在拥有大量节点且拓扑结构动态改变的网络条件下,利用网络编码达到网络容量的研究工作还不丰富。Leong 等提出了一种随机网络编码算法<sup>[29]</sup>:所有节点,除了接收节点,独立选择在有限域上的随机线性映射,将映射作用于输入数据流上,即得到了输出数据,如图2所示。源节点  $S_1$  组播  $X_1$  和  $X_2$  到接收节点  $R_1$  和  $R_2$ ,中继节点 A、B 和 C 在有限域上各自独立地随机选择编码系数  $\xi_i$ ,对输入流进行线性运算,并将结果以广播的方式发送出去。接收节点只需知道各个编码节点进行线性运算的系数,即可解码出原始数据。显然,系数  $\xi_i$  可以随同网络数据包一起传送。

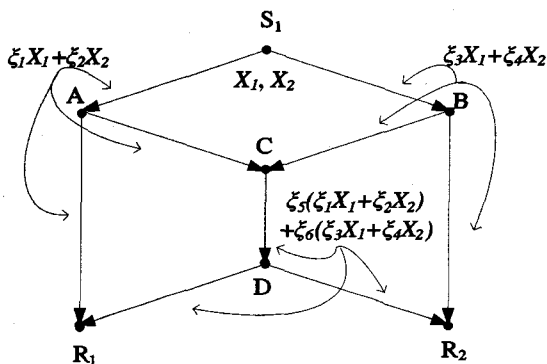


图2 随机线性网络编码

Leong 将该算法与基于在线 Steiner 树生成算法、Dijkstra 最短路径算法和最近节点优先算法<sup>[32]</sup>的路由算法进行比较。结果表明,分布式随机网络编码方法在组播吞吐量和鲁棒性方面要明显优于基于路由的算法。

### 3.2 节能

如何在由大量微小的、“哑”的装置组成的不可靠的无线传感器网络中降低能耗,实现可靠传输和分布式网络存储,是

无线传感器网络研究的热点问题。MIT 的 Petrovic 等人提出了一种结合网络编码的、对无线信号不进行调制的策略<sup>[33]</sup>。他们证明,运用随机分布式网络编码,未经调制的无线信号能够达到经过调制的无线信号一样的吞吐量。这样就能节省大量因为模拟器件进行调制而消耗的能量和降低节点的成本。不足之处在于:为了防止未经调制的无线窄带信号可能使节点之间出现不能互相通信的情况,不得不要求传感器网络保证一定的节点密度。

### 3.3 鲁棒性

传感器网络需要把节点资源整合起来,实现一个可靠和健壮的网络。基于此种想法,一种结合分布式源编码和网络编码的优化算法被提了出来<sup>[34]</sup>,目的是用来提高传感器网络的容错性和可靠性,同时对分布式源编码的压缩效率和网络鲁棒性进行了折衷考虑。该算法首先提出了节能和鲁棒性的量化模型,然后提出了可动态调整的链式编码结构。编码链越长,越节省能量,但是可靠性越低;编码链越短,能耗越大,但是可靠性越高。然而,随着网络规模的扩大,该算法的复杂性将呈指数增长,同时该算法主要适用的是静态的传感器网络,未考虑网络动态变化的情况。

### 3.4 数据聚合

传感器网络是以数据为中心的,节点感知的数据最终将汇集到汇聚节点(sink)。Dimakis 等提出了一种数据聚合算法<sup>[38]</sup>:每个单独的节点只保存一个数据包,当监听到邻居节点的数据包时,就在有限域上乘一个随机系数并和自身数据相加。这样,单个普通传感器节点可能不能解码数据,但是对 sink 节点来说,就能以很高的概率通过查询仅仅  $n$  个节点而重建  $n$  个数据包,使得传感器网络数据聚合的效率得到极大的提高。

## 4 无线网状网

尽管网络编码已经确立了它在理论上提高网络吞吐量的地位,但是很少有研究者把目光投向网络编码,具体实现这个领域<sup>[36,37]</sup>。Katti 等提出的基于机会的网络编码方法(COPE)<sup>[35]</sup>则是首次研究网络编码在无线环境中的协议层面上具体实现的问题。在 COPE 协议中,每个节点对传输媒体进行侦听,获得它的邻居节点的状态信息,决定进行编码的机会,并在本地的 FIFO 缓存结构内进行编码,然后进行基于机会的路由。COPE 协议要求每个节点利用本地信息各自决定哪些数据包需要进行编码以及如何进行编码。灵活的设计使得即使在网络交通需求未知或者网络流量剧增、或者发送/接收方动态变化的情况下,COPE 协议仍能有效的支持多路单播流。然而该协议需要节点存储数据包并进行编码,如果网络出现拥塞,可能会耗费较多的节点存储空间。

文件共享是无线网状网的一种典型应用。为了评估网络编码对该应用的影响,Hamra 在理想化 MAC 协议基础上开发了特定的仿真平台<sup>[45]</sup>,分别比较了服务时间等性能在节点个数、盲转发(Blind Forwarding)和选择性转发(Selective Forwarding)情况下的表现。实验结果表明,应用网络编码得到的改进,虽然不如在有线网络中显著,但仍然能在很大程度上提高吞吐量、缩短服务时间。

## 5 无线网络编码的研究方向

在网络编码概念提出的初期,研究者集中关注利用网络编码提高有线网络组播吞吐量的问题和对网络编码与路由方

法进行对比的问题<sup>[31,46]</sup>。经过一段时间的研究,网络编码的优点已经得到了承认,随后网络编码在无线方面的研究兴趣主要集中于无线组播容量和线性网络编码方面,这期间提出的算法多属于理论分析的、集中式的,而且相当部分的研究工作是利用跨层设计分配物理层、MAC层和网络层资源来应用线性网络编码<sup>[8,9,13]</sup>。近期的研究热点在于分布式的随机网络编码研究以及网络编码在实际环境中的实现<sup>[26,35,38,42]</sup>。无线网络编码的研究方兴未艾,但也存在着如下尚未解决的问题,也是我们预测的未来的研究方向:

经过这几年的迅猛发展,网络编码从最初用来达到有线网络中的组播容量,发展到在有线和无线网络中提高吞吐量、节省能量、增强鲁棒性和安全性,甚至改变网络结构、改变网络协议设计方法,可以说网络编码正在给现有的网络带来革命性的变化。

(1)网络编码将继续与网络其他领域的理论和技术相结合。比如和分布式压缩编码的结合,编码和分布式压缩之间存在着紧密的联系,经典的分布式压缩编码 Slepian-Wolf 和非中心化的、随机网络编码之间可以很好地结合<sup>[41,42]</sup>;网络编码同分布式天线系统(DAS)和多人多出系统(MIMO)的结合<sup>[25]</sup>;网络编码和网络信息交换的结合<sup>[44]</sup>等。

(2)网络编码的具体实现。现在已经提出了很多网络编码方法,有集中式线性网络编码、分布式随机网络编码,但是要在实际网络环境中实现网络编码,需要考虑诸如同步、线性独立的编码系数选择、控制开销等等问题。网络编码在实际网络环境(包括有线和无线)中如何实现是一个很迫切的问题,也是很有意义的研究方向。

(3)降低网络编码的复杂性。采用网络编码可以在很大程度上提高网络性能,但设计和实现上的复杂性也随之增加。如何在显著增加网络开销的情况下,综合考虑效率和性能,如何实现最小化网络编码<sup>[43]</sup>等问题是将来需要进行深入研究的方向。

(4)无线网络编码在安全方面的研究。无线网络的安全问题是近来的研究热点,而无线网络编码在安全方面的应用也吸引了一些敏锐研究者的目光<sup>[26,47,48]</sup>。可以预见,对无线网络编码在安全方面的研究会是一个研究热点。

## 参 考 文 献

- Ahlsweide R, Cai N, Li S Y R, et al. Network information flow. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2000, 46: 1204~1216
- Li S Y R, Yeung R W, Cai N. Linear network coding. *IEEE Trans Info Theory*, 2003, 49(2): 371~381
- Koetter R, Médard M. An algebraic approach to network coding. *IEEE/ACM Trans. Networking*, 2003, 11: 782~795
- Cai Ning, Yeung R W. *Network Coding and Error Correction*. ITW, Bangalore, 2002
- Cai Ning, Yeung R W. *Secure Network Coding*. ISIT, 2002
- Ho T, Médard M, Shi J, et al. On Randomized Network Coding. In: 41st Annual Allerton Conference on Communication Control and Computing, Oct. 2003
- Widmer J, Fragouli C, Le Boudec J-Y. Low-complexity energy-efficient broadcasting in wireless ad-hoc networks using network coding. In: Proc. WINMEE, RAWNET and NETCOD 2005 Workshops, Apr. 2005
- Wu Y, Chou P A, Zhang Q, et al. Network planning in wireless ad hoc networks: A cross-layer approach. *IEEE J Sel Areas Commun*, 2005, 23(1): 136~150
- Yuan Jun, Li Zongpeng, Yu Wei, et al. A Cross-Layer Optimization Framework for Multicast in Multi-hop Wireless Networks. In: Proc. of First International Conference of Wireless Internet (WICON), Budapest, Hungary, 2005 (Invited). 47~54
- Wu Yunnan, Kung Sun-Yuan. Reduced-complexity network coding for multicasting over ad hoc networks. In: IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, Proceedings. (ICASSP '05), Vol 3, 2005
- Ho Tracey, Jin Jia-Qi, Viswanathan H. On network coding and routing in dynamic wireless multicast networks. In: *Information Theory and its Applications*, February 2006
- Neely M, Modiano E, Rohrs C E. Dynamic power allocation and routing for time-varying wireless networks. In: *Proceedings of IEEE Infocom*, 2003
- Sagduyu Y E, Ephremides A. Crosslayer Design for Distributed MAC and Network Coding in Wireless Ad Hoc Networks. In: *Proc. 2005 IEEE International Symposium on Information Theory*, Adelaide, Australia, Sept. 2005
- Fragouli C, Soljanin E. Subtree Decomposition for Network Coding. In: *Proc ISIT*, June 2004
- Fragouli C, Soljanin E, Shokrollahi A. Network Coding as a Coloring Problem. In: *Proc. Conf Info Sci and Sys*, Mar. 2004
- Wu Y, Chou P A, Kung S-Y. Minimum-energy multicast in mobile ad hoc networks using network coding. In: *IEEE Information Theory Workshop*, Oct. 2004
- Lun D S, Médard M, Koetter R. Efficient operation of wireless packet networks using network coding. In: *Proc. International Workshop on Convergent Technologies (IWCT) 2005*, June 2005
- Ahluwalia A, Modiano E, Shu L. On the complexity and distributed construction of energy-efficient broadcast trees in static ad hoc wireless networks. In: *Proc. 2002 Conference on Information Sciences and Systems (CISS 2002)*, Mar 2002
- Liang W. Constructing minimum-energy broadcast trees in wireless ad hoc networks. In: *Proc. 3rd ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking & Computing (MOBIHOC '02)*, 2002. 112~122
- Lun D S, Ratnakar N, Médard M, et al. Minimum-cost multicast over coded packet networks. Submitted to *IEEE Trans Inform Theory*
- Lun D S, Ratnakar N, Koetter R, et al. Achieving minimum-cost multicast: A decentralized approach based on network coding. In: *Proc. IEEE Infocom 2005*, Miami, FL, Mar. 2005
- Wieselthier J E, Nguyen G D, Ephremides A. Energy-efficient broadcast and multicast trees in wireless networks. *Mobile Networks and Applications*, 2002, 7: 481~492
- Widmer J, Fragouli C, Le Boudec J-Y. Low-complexity energy-efficient broadcasting in wireless ad-hoc networks using network coding. In: *Proc. WINMEE, RAWNET and NETCOD 2005 Workshops*, Apr. 2005
- Lun D S, Médard M, Koetter R. Network Coding for Efficient Wireless Unicasting. In: *IEEE International Zurich Seminar on Communications*, February 2006
- Chen Y, Kishore S, Li J. Wireless Diversity through Network Coding. In: *Proceeding of IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, Las Vegas, NV, March, 2006
- Ho T, Leong B, Koetter R, et al. Byzantine modification detection in multicast networks using randomized network coding. In: *IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT 2004)*, June 2004
- Castro M, Liskov B. Practical Byzantine Fault Tolerance. *OSDI*, 1999
- Kihlstrom K P, Moser L E, Melliar-Smith P M. The SecureRing Protocols for Securing Group Communication. *HICSS*, 98
- Ho T, Leong B, Médard M, et al. On the utility of network coding in dynamic environments. In: *Proc. Int'l Workshop on Wireless Ad-hoc Networks (IWVAN)*, June 2004
- Sanders P, Egner S, Tolhuizen L. Polynomial time algorithms for network information flow. In: *Proc. 15th ACM Symp on Parallel Algorithms and Architectures*, 2003. 286~294
- Ho T, Koetter R, Médard M, et al. The benefits of coding over routing in a randomized setting. In: *Proc. Int Symp Inf Theory*, 2003. 442
- Kodialam M S, Lakshman T V, Sengupta S. Online multicast routing with bandwidth guarantees: a new approach using multicast network flow. In: *Measurement and Modeling of Computer Systems*, 2000. 296~306

- delberg:Springer-Verlag Press,2005. 1177~1186
- 34 Lindstrom P. Model Simplification Using Image and Geometry-based Metrics:[Ph D Dissertation]. Georgia Institute of Technology,2000
  - 35 Hoppe H. View-dependent refinement of progressive meshes. In: Proceedings of SIGGRAPH97. Los Angeles: ACM Press, 1997. 189~198
  - 36 Hoppe H. Smooth view-dependent level-of-detail control and its applications to terrain rendering. In: Proceedings of IEEE Visualization98. North Carolina: IEEE Press, 1998. 35~42
  - 37 El-Sana J, Varshney A. Generalized view-dependent simplification. Computer Graphics Forum, 1999, 18(3): 83~94
  - 38 Duchaineau M, Wolinsky M. ROAMing terrain: Real-Time optimally adapting meshes. In: Yagel R, Hagen H, eds. IEEE Visualization97. Los Alamitos: IEEE Press, 1997. 81~88
  - 39 Röttger S, Heidrich W, Slusallek P. Real-Time generation of continuous levels of detail for height fields. In: Skala V, ed. Winter School in Computer Graphics(WSCG'98). Plzen: Science Press, 1998. 315~322
  - 40 Smullen S, Smullen C W, et al. Interactive 3D Terrain Exploration and Visualization. In: Proceedings of the 43rd ACM Southeast Conference. Kennesaw, GA, USA: ACM Press, 2005. 148~152
  - 41 Li B-Y, Liao H-Sh, Charlie H, et al. Visualization for HPC data-large terrain model. In: Proceedings of the Seventh International Conference on High Performance Computing and Grid in Asia Pacific Region. Hsinchu, Taiwan: IEEE Computer Society Press, 2004
  - 42 Balmelli L, Kovacevic J, Vetterli M. Quadrees for Embedded Surface Visualization: Constraints and Efficient Data Structures. In: Proceedings of ICIP99. Kobe, Japan: IEEE Press, 1999. 487~491
  - 43 Pajarola R. Overview of Quadtree-based Terrain Triangulation and Visualization:[Technical Report]. UCI-ICS, 2002
  - 44 Lindstrom P, Koller D, Ribarsky W. Real-Time, Continuous Level of Detail Rendering of Height Fields. In: Rushmeier H, ed. Proceedings of SIGGRAPH96. New Orleans: ACM Press, 1996. 109~118
  - 45 Pajarola R. Large scale terrain visualization using the restricted quadtree triangulation. In: Rushmeier H, Elbert D, Hagen H, eds. Proceedings of Visualization98. North Carolina: IEEE Press, 1998. 19~26
  - 46 Cignoni P, Ganovelli F, Gobbetti E. BDAM - batched dynamic adaptive meshes for high performance terrain visualization. Computer Graphics Forum, 2003, 22(3): 505~514
  - 47 Larsen B D, Christensen N J. Real-time Terrain Rendering using Smooth Hardware Optimized Level of Detail. Journal of WSCG, 2003, 11(1). <http://wscg.zcu.cz/wscg2003/Papers-2003/C05.pdf>
  - 48 Losasso F, Hoppe H. Geometry Clipmaps: Terrain Rendering Using Nested Regular Grids. ACM Transactions on Graphics (Proceedings of SIGGRAPH 2004). 2004, 23(3): 769~776
  - 49 李胜, 冀俊峰, 刘学慧, 等. 超大规模地形场景的高性能漫游. 软件学报(Journal of Software), 2006, 17(3): 535~545
  - 50 王璐锦, 唐泽圣. 基于分形维数的地表模型多分辨率动态绘制. 软件学报(Journal of Software), 2000, 11(9): 1181~1188
  - 51 Saux E, Thibaud R, et al. A New Approach for a Topographic Feature-Based Characterization of Digital Elevation Data. In: Proceedings of ACMGIS04. Washington, DC, USA: ACM Press, 2004. 73~81
  - 52 Vivoni E R, Teles V, et al. Embedding landscape processes into triangulated terrain models. International Journal of Geographical Information Science, 2005, 19(4): 429~457
  - 53 赵友兵, 石教英, 周骥, 等. 一种大规模地形的快速漫游算法. 计算机辅助设计与图形学学报, 2002, 14(7): 624~628
  - 54 谭兵, 徐青, 周杨. 大区域地形可视化技术的研究. 中国图象图形学报, 2003, 8(5): 579~585
  - 55 陈少强, 朱铁稳, 李琦, 等. 大规模多分辨率地形模型简化生成方法. 计算机辅助设计与图形学学报, 2005, 17(2): 273~278
  - 56 Kim J K, Ra J B. A real-time terrain visualization algorithm using wavelet-based compression. The Visual Computer, 2004, 20(2-3): 67~85
  - 57 Wei H, Huai S, Zhang Y Q, et al. Huge Texture Mapping for Real-Time Visualization of Large-Scale Terrain. In: Proceedings of VRST04. Hong Kong: ACM Press, 2004. 154~157
  - 58 Zhang L-q, Yang Ch-j, et al. Effective Techniques for Interactive Rendering of Global Terrain Surfaces. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2005, 2(2): 215~219
  - 59 Lindstrom P, Pascucci V. Visualization of large terrains made easy. In: Proceedings of IEEE Visualization 2001. San Diego, California: IEEE Press, 2001. 363~370
  - 60 戴晨光, 邓雪清, 张永生. 海量地形数据实时可视化算法. 计算机辅助设计与图形学学报, 2004, 16(11): 1603~1607
  - 61 Evans W, Kirkpatrick D, Townsend G. Right-triangulated irregular networks:[Technical Report 97-09]. Department of Computer Science, University of Arizona, 1997

# (上接第9页)

- 33 Petrovic D, Ramchandran K, Rabaey J. Coding for sensor networks using untuned radios. In: IEEE 6th Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications, June 2005. 1093~1097
- 34 Zhang X, Wicker S B. Robustness vs efficiency in sensor networks. In: Fourth International Symposium on Information Processing in Sensor Networks(IPSIN), April 2005. 225~230
- 35 Katti S, Katabi D, Hu W, et al. The importance of being opportunistic: Practical network coding for wireless environments. In: Proc. 43rd Annual Allerton Conference on Communication, Control, and Computing, Sept 2005
- 36 Chou P, Wu Y, Jain K. Practical Network Coding. In: 51st Allerton Conf. Communication, Control and Computing, Oct 2003
- 37 Gkantsidis C, Rodriguez P. Network Coding for Large Scale Content Distribution. In: IEEE INFOCOM, 2005
- 38 Dimakis A G, Prabhakaran V, Ramchandran K. Ubiquitous access to distributed data in large-scale sensor networks through decentralized erasure codes. In: Symposium on Information Processing in Sensor Networks(IPSIN), Apr. 2005
- 39 Widmer J, Fragouli C, LeBoudec J Y. Energy efficient broadcasting in wireless ad hoc networks. In: First Workshop on Network Coding, March 2005
- 40 Fragouli C, Widmer J, L Boudec J-Y. A network coding approach to energy efficient broadcasting: from theory to practice:[Technical Report]. LCA-REPORT-2005-009. accepted at Infocom 2006, EPFL, July 2005
- 41 Ho T C, Médard M, et al. Network coding for correlated sources. In: Proc. 2004 Conference on Information Sciences and Systems (CISS 2004), Mar 2004(invited paper)
- 42 Ho T, Médard M, Koetter R, et al. Toward a random operation of networks. IEEE Transactions on Information Theory, May 2004
- 43 Bhattad K, Ratnakar N, Koetter R, et al. Minimal Network Coding for Multicast. ISIT, 2005
- 44 Wu Y, Chou P A, Kung S-Y. Information exchange in wireless networks with network coding and physical-layer broadcast:[Technical Report]. MSR-TR-2004-78. Microsoft Research, Aug. 2004
- 45 Al Hamra A, Barakat C, Turletti T. Network Coding for Wireless Mesh Networks: A Case Study. In: IEEE International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM), Niagara-Falls, Buffalo-NY, USA, June 2006
- 46 Koetter R, Médard M. Beyond Routing: An algebraic approach to network coding. INFOCOM, 2002
- 47 Gkantsidis C, Rodriguez P. Cooperative Security for Network Coding File Distribution. In: IEEE Infocom, 2006
- 48 Jain K. Security based on network topology against the wiretapping attack. IEEE Wireless Communications, Feb. 2004. 68~71