

基于非合作博弈的无线网络路由机制研究

汪 洋¹⁾ 林 闯¹⁾ 李泉林²⁾ 王竞奇³⁾ 姜 欣¹⁾

¹⁾(清华大学计算机科学与技术系 北京 100084)

²⁾(清华大学工业工程系 北京 100084)

³⁾(美国西北大学凯洛格商学院 美国 波士顿)

摘 要 无线网络因其分布性、独立性、移动性等特点,网络性能容易受到自私节点的影响.文中综述了无线网络中因自私节点的存在而带来的一些关键问题,特别对含有自私节点的无线环境中基于非合作博弈理论的路由机制进行了分析和研究.为了解决网络中自私节点的问题,目前研究人员主要提出了两种机制:基于信任度的机制和基于非合作博弈的激励机制.文中对上述两类机制进行了总结和分析,特别地,针对无线自组织网络和无线网状网络中各种激励机制进行了详细的研究.网络编码作为一种有效的技术有助于提高无线网络的性能,文中探讨了基于网络编码的优化对含有自私节点的无线网络性能的影响.同时还分析了非合作无线网络中节点共谋的问题,最后提出了当前非合作无线网络研究中存在的理论挑战及潜在的热点方向.

关键词 无线网络;博弈论;路由机制;共谋

中图法分类号 TP393 **DOI号**: 10.3724/SP.J.1016.2009.00054

Non-Cooperative Game Based Research on Routing Schemes for Wireless Networks

WANG Yang¹⁾ LIN Chuang¹⁾ LI Quan-Lin²⁾ WANG Jing-Qi³⁾ JIANG Xin¹⁾

¹⁾(Department of Computer Science and Technology, Tsinghua University, Beijing 100084)

²⁾(Department of Industrial Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084)

³⁾(Kellogg School of Management, Northeast University, Boston, Massachusetts, USA)

Abstract Since wireless networks are usually distributed, independent and mobile, their performance could be affected by selfish nodes. In this paper, the authors focus on the issues of selfish nodes in wireless networks. Game based mechanisms are introduced to study the wireless network involving selfish nodes. In the literature, there are mainly two approaches to deal with the selfish nodes: credit based mechanisms and non-cooperative game and incentive based mechanisms. The authors summarize and analyze the typical routing mechanisms in these areas, and especially discuss the non-cooperative game and incentive based routing mechanisms for wireless ad-hoc networks and wireless mesh networks. Network coding as an efficient technology can help to improve network performance. They also study the optimization schemes based on network coding in wireless networks involving selfish nodes. Moreover, the authors discuss the collusion problem in non-cooperative wireless networks. Finally, they present the existing challenges and possible research directions in non-cooperative wireless networks.

Keywords wireless network; game theory; routing mechanism; collusion

收稿日期:2007-10-25;最终修改稿收到日期:2008-10-23.本课题得到国家“九七三”重点基础研究发展规划项目基金(2006CB805901)和国家自然科学基金(60673187,60803123,10671107,10871114,60736028)资助.汪 洋,女,1982年生,博士研究生,主要研究方向为计算机网络安全、系统性能评价和随机进程代数. E-mail: wy00@mails. tsinghua. edu. cn. 林 闯,男,1948年生,博士,教授,博士生导师,主要研究领域为计算机网络、系统性能评价、网络安全、Petri网理论、可信网络与可信计算. 李泉林,男,1964年生,博士,副教授,主要研究领域为随机模型、随机过程、随机进程代数、制造系统、通信网络、网络安全和计算机视觉. 王竞奇,男,1986年生,博士研究生,主要研究方向为运营管理和博弈论. 姜 欣,男,1975年生,博士研究生,主要研究方向为计算机网络安全、MANET信任管理、系统性能评价.

1 引言

无线网络的分布性、独立性、移动性等特点,决定了网络中的许多功能必须依靠节点间的协作来完成,例如,无线自组织网络不依赖于任何固定的基础设施,数据的传输需要通过移动节点之间的相互协作来完成。目前人们通常假设所有网络节点都具有良好的协作性,即每个节点都愿意为其它节点提供网络服务。但是这种假设在实际的无线网络环境中并不一定成立,特别是当网络节点属于多个不同组织时。无线网络节点由于受到自身处理能力、存储空间、电池容量等各种资源的限制,节点都存在一定的自私性,而自私节点通常不愿意帮助其他节点转发信息,这势必会影响无线网络正常的路由和数据转发功能。

如何激励自私节点进行合作,从而提高网络性能,是当前无线网络研究领域面临的重大挑战之一,自私节点的非合作关系制约了当前无线网络各种传输和路由机制的实施,严重影响了网络性能。自私节点带给无线网络的首要问题是资源的浪费。由于节点转发数据需要消耗自身的能量和计算资源,某些节点为了最大化自己的利益而有意不参与数据转发工作,这样一来,数据转发所选择的路径可能不是预期的最短高效路径,从而导致整条数据传输路径上网络资源特别是能量资源的浪费。因此,如何保证整条数据转发路径上能量消耗最低是大部分针对含有自私节点的无线网络环境下进行路由协议设计研究的基本目标。对于该问题,人们尝试了采用包括概率论、信息论及贝叶斯网络等理论在内的多种方法进行各种路由机制的分析和设计,特别是近年来越来越多地采用了经济学方法中的博弈理论。

针对无线网络中自私节点的问题,目前主要采用两类机制来处理:基于信任度的机制和基于非合作博弈的激励机制。信任是指某个节点对另一节点预期行为的一种主观判断,信任度是对节点之间信任程度的一种量化。基于信任度的机制的基本思想是如果所有节点能够参与合作来获得整个系统的最优性能,则每个节点就能得到相应的最优回报。因此,基于信任度的机制通过观察、审计、系统范围内的优化点分析和特殊的硬件等来记录节点合作行为并对不合作的节点进行惩罚,从而保证所有节点都能积极进行合作,其主要判断依据是节点间的历史交互信息。根据具体实现方式不同,基于信任度的机

制又可以分为基于信誉的机制和基于支付的机制。信誉是一个全局量,即所有与某一节点有过交互行为的节点对该节点的综合评价,它是产生信任度的重要依据。有关信任和信誉的概念及关系,文献[1-2]给出了较为详细的描述。基于支付的机制则模仿了人类社会中货币买卖方式,采用一种虚拟的电子货币用于支付所获得的网络服务,通常来说,这种机制需要有相关硬件或可信的第三方机构提供安全保证。目前,基于信任度的机制的研究工作比较多,具有代表性的主要有文献[3-7,9-11]。基于信任度的机制的实现相对来说较为简单易行,已经被应用在部分实际的无线网络环境中。目前这种机制存在的主要问题是整个系统达到性能最优并不能保证每个节点都获得最优回报。因此,节点存在违背协议约定的动机,这种机制并没有从根本上解决节点的自私性带来的问题。同时,这种机制效率比较低,信任度的计算收敛速度比较慢。

基于非合作博弈的激励机制借鉴了微观经济学和非合作博弈论中的相关理论,引入了报酬的相关概念,即对节点的合作行为给予相应的报酬激励。基于激励的机制需要解决的关键问题是如何确定需要支付给合作转发节点的报酬值,以保证系统的性能优化。目前通常的解决方案是设计相应的机制来激励节点报出其转发的真实成本,从而实现系统成本的最小化和性能的最优化。在非对称信息博弈(即参与者拥有自己私有信息的博弈)中,如果所有参与者都没有动机对其它参与者说谎或是隐藏其私有信息,所有参与者的占优策略都是报出其真实成本,即无论其它节点如何报价,节点都会愿意报出自己的真实价格,则称这个机制实现了路由选择在保证参与者报出真实成本的基础上进行,也可以称为具有防策略性(Strategyproof)。在经济领域最为人所熟知的实现了防策略性的机制是 VCG (Vickrey-Clark-Groves) 机制,它通过额外支付参与者存在的机会成本来实现防策略性。这种机制也被应用在无线自组织网络中,即 Ad-hoc VCG 机制^[12]。在这个工作的基础上,研究者们做了一系列的工作^[13-15]。还有一些算法放宽了 Strategyproof 特性的限制,引入纳什均衡的概念^[16-17]。然而由于无线网络的特性,以非合作博弈论为基础的经济模型与无线网络的结合目前还存在一些需要解决的问题。本文将重点对不同无线网络环境中各种基于激励机制的研究进行总结和分析。

虽然人们对无线网络中自私节点问题已经进行

了部分较为深入的研究,但是目前还没有相关工作对该领域的发展现状进行系统的总结和对未来可行的研究方向进行规划,本文将致力于这一工作. 本文将现有的针对无线网络中自私节点问题的各种机制进行了归纳分类,介绍和比较几种典型机制的算法和性能;在此基础上介绍基于网络编码的机制优化策略,用于改进非合作无线网络的性能;同时,详细地分析无线网络中的经典共谋问题,这也是非合作无线网络中的关键问题;通过以上归纳、分析和比较,对该领域有待于进一步研究的方向和可以采用的分析工具提出了一些建议.

本文第 2 节介绍几种典型的基于信任的机制并进行讨论;第 3 节重点介绍基于非合作博弈的激励机制以及它们在单播和多播环境中的实现;第 4 节介绍基于网络编码的优化机制在非合作无线网络中的应用;第 5 节针对无线网络中经典的共谋问题进行讨论,指出了当前亟待解决的问题;第 6 节详细探讨当前研究中面临的理论挑战和可行的热点方向;第 7 节对全文进行总结.

2 基于信任度的机制

本节将详细介绍各种基于信任度的机制. 为解决网络中自私节点的问题,基于信任度的机制很早就被提出并被广泛使用. 虽然这些机制大部分是在仿真结果的基础上采用启发式算法实现并缺少形式化的分析计算和理论证明,但是它们较早地应用在实际中,并且取得了较好的效果. 根据信任度产生依据的不同,该机制又可以分为两类,一类是基于信誉的机制,另一类是基于支付的机制. 前者通过节点的信誉来评估其信任度,根据信任度值的高低来判断节点可信与否并作为路由选择的决策依据. 在这种机制中,低信任度的节点会逐渐被网络中的其他节点孤立,以致无法获得其他节点的服务. 因此,网络节点为了避免自己被孤立,就会通过为其他节点提供良好的服务来提升自己的信任度. 基于支付的机制则采用虚拟货币作为信任凭证,用于换取其他节点提供的服务. 当一个节点虚拟货币用完时,它将无法获得其他节点的服务,但可以通过为其他节点提供服务来换取虚拟货币. 下面我们介绍几种主要的基于信任度的激励机制.

2.1 基于信誉的机制

斯坦福大学的 Marti 等人^[3]提出了一种看门狗(Watchdog)和选路人(Pathrater)算法来监控和防

止节点的异常行为. 出于自私或恶意的原因,节点拒绝转发流经其的数据包,这种行为被称为异常行为. 看门狗是指数据包的发送者在将包发出去之后还要监视他的下一跳的节点,如果下一跳的节点没有对包进行转发就说明那个节点可能存在问题. 选路人作为一种响应办法,它在收集到其它节点的详细信息的基础上评定每一条路的信任等级,使数据包尽量避免经过那些可能存在自私或者恶意节点的路径. 这种机制的问题是,它没有详细区分节点拒绝转发数据包是出于恶意还是物理原因,例如节点暂时电源耗尽等;并且对于自私节点也没有惩罚措施.

Buchegger 等人提出的 CONFIDANT 机制^[4]对无线自组织网络的 DSR 路由协议进行了扩展. 节点间信任关系的建立和路由选择的确定都是通过对路由建立过程及数据转发行为的观察及汇报方式实现的,从而可以使源节点进行路由选择时避免自私或恶意节点. CONFIDANT 机制需要为每个节点增加 4 个功能模块,分别是监控器、信誉系统、路径管理器和信任管理器. 监控器的作用类似于 Watchdog 的功能,用于监控邻居的行为;信誉系统用于记录观察结果,并对节点进行评估打分;路径管理器用于路由决策,以避免自私或恶意节点存在于选定的路由上;信任管理器用于记录接收到的告警信息并评估该告警信息的可信度,当有足够的证据证明该告警信息可信时,就会将该信息反馈给信誉系统. CONFIDANT 机制可以有效地检测并隔离自私或恶意的节点,但是它无法避免“诽谤”攻击现象,并且也无法阻止谣言的扩散.

Michiardi 等人也基于 Watchdog 提出了 CORE 协议^[5]机制,该机制通过基于信誉的计算来激励节点进行合作. 信誉的计算是通过特定函数整合主观信誉(subjective reputation)、间接信誉(indirect reputation)和功能性信誉(functional reputation). 其中主观信誉就是直接证据,间接信誉就是从其他节点处获得的间接证据,而功能性信誉则用来表示对节点不同功能重要性的判断. 该机制能够防范“诽谤”攻击,因为来自其他节点的间接信誉仅统计正面评价. 但是该机制不能很好地防范节点共谋攻击,同时,也无法区分异常行为的发生原因是主观恶意还是客观故障.

2.2 基于支付的机制

Buttayan 等人^[6]引入一种计数器(Nuglet Counter)来激励节点帮助其它节点转发数据包. 这种计数器是一个安装在节点上的硬件模块,当节点

发送自己的数据包时,计数器数值减少;在节点转发数据包时,数值增加。所有的节点必须维持计数器的值大于零。文章通过分析和实验,证明了此种机制在一定程度上起到了激励自私节点转发数据包的作用。但是,在非对称数据流的情况下,这种机制还有待于进一步的改进。

在文献[7]中,Buttayan 等人除了用一个计数器(nuglet counter)统计 nuglets 外,还引入了一种惩罚措施,即在节点拒绝转发时减少计数器的数值。同时,他们使用 Packet Purse 模型限制节点转发无用的数据包,防止增加网络负载。文献[6]和文献[7]的思想相似。

Salem 等人^[18]以 Nuglet 为基础,给出了一种收费和返还的机制来解决多跳蜂窝网中自私节点的问题。他们对节点预先收取费用,等待得到正确的确认信息后再将费用返还,以此来限制恶意节点和自私节点的行为。

另外一个比较经典的机制是 Zhong 等人^[10]提出的 Sprite 机制。Sprite (ASimple, Cheat-Proof, Credit-Based System)主要解决的问题是在无线网络中确定了一条数据传输最优路径 *Shortest Path* (SP) 后,如何保证中间节点 $v_i \in SP$ 能够忠实地传递数据包。这是因为如果无法了解中间节点 v_i 是否真的传递了数据包或者没有一个合适的机制保证,则有可能 SP 上的节点可以不用真正传递数据包就得到收益。在这种情况下,将无法保证数据传输正常进行。Sprite 的基本思想是收到数据包节点保留一个该数据包的收据(Receipt),中央银行根据 SP 上各节点提交的收据确定各节点的收益。Sprite 基于的基本网络结构如图 1 所示。Sprite 机制保证了路径上的所有节点都有激励传递数据包,并且将如实地报告自己是否收到了数据包。但是 Sprite 机制没有实现预算平衡。

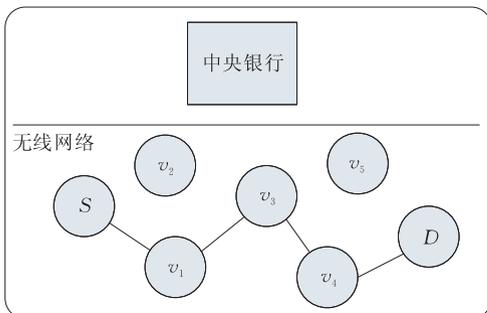


图 1 Sprit 机制的网络结构

经被较好地应用于实际的网络中,但是其自身的某些特点使得其发展存在一定的限制。首先,多数基于信任度的机制,特别是基于采用了虚拟货币的机制都需要额外的设备以保证机制的顺利实施,一般情况下要求每一个相关网络节点都装有特殊设计的硬件设备,或者网络中存在大家公认可信的第三方机构。这种硬件要求在实际的网络环境中很难实现,第三方机构的存在又很难适应无线网络环境,这一特点严重阻碍了基于信任度机制的发展。其次,信任度的计算较为复杂,特别是直接证据和间接证据的收集过程需要消耗大量的资源,收敛速度慢,并且容易引发广播风暴。另一方面,这些证据的来源主要是节点的历史行为信息,在很多情况下,历史信息并不能准确反应该节点将来行为的可信程度。再有,很多基于信任度的机制并没有从根本上解决节点自私性的问题。在基于信任度的机制中,通常每个节点的收益随着整个系统的收益提高而提高,然而,这一假定在实际中却并不一定成立。事实上,整个系统达到性能最优并不能保证每个节点都获得最优回报。因此,节点存在违背协议约定的动机,基于信任度机制的实施受到了制约。另外,对于当前各种基于信任度的机制来说,大部分是根据针对特定网络的实验结果来说明它的效果,缺少形式化的分析和理论证明,因而,难以证实这种机制的扩展性,难以从理论上支持将基于信任度的机制推广到一般的无线网络中。基于非合作博弈的激励机制则从经济学的角度出发,深入地分析了节点的自私性,且避免了基于信任度机制的种种问题,本文将在下面几节里进行重点介绍。

3 基于非合作博弈的激励机制

人们利用基于非合作博弈的经济学理论对含有自私节点的无线网络进行研究,提出了多种激励机制。本节将对无线自组织网络和无线网状网络中的几种典型的激励机制进行分析,通过比较和分析指出当前基于非合作博弈的激励机制中有待进一步解决的问题和可行的发展方向。

3.1 无线自组织网络中的激励机制

无线自组织网络(Wireless Ad-hoc Networks)灵活多变,不依赖任何基础设施,通过相邻节点间的互联转发完成网络通信,这种灵活、简单、多变的特性使得其在军事、救援等领域中得到了广泛的应用。然而,无线自组织网络的无线多跳、动态拓扑的特性

总结一下基于信任度的各种机制,它们虽然已

给它的发展带来了很大的制约. 考虑实际网络中的节点具有自私性, 节点之间是非合作的关系, 这对无线自组织网络是一个重大挑战. 目前, 大部分关于基于激励的机制在非合作无线自组织网络中的应用研究主要是基于 VCG 机制的. 这种基于 VCG 的机制是从经济学上的经典拍卖模型 VCG 改进而来的, 可以有效地解决自私节点为路径选择和数据转发带来的问题.

这一小节将首先介绍含有自私节点的非合作无线自组织网络的系统模型, 基于该模型介绍用于无线自组织网络的激励机制——Ad-hoc VCG 机制. 应用 Ad-hoc VCG 机制, 所有参与者都没有动机对其它参与者说谎或是隐藏其私有信息, 因此, 它能够保证路径选择在各节点都报出真实价格的基础上进行, 从而使该机制具有防策略性. 我们首先简要介绍具有防策略性的机制设计原则, 其后将重点介绍和比较无线自组织网络中的几种典型的基于非合作博弈的激励机制, 并指出当前研究中有待解决的问题.

3.1.1 系统模型

用 $N = (V, E, \omega)$ 来表示一个无线 Ad-hoc 网络, 其中 $V = (v_1, v_2, \dots, v_n)$ 表示网络中的 n 个节点, 即无线网中的无线设备; 有向边 (v_i, v_j) 组成的集合 $E \subseteq V \times V$ 表示所有可以传递信号的边; $\omega: E \rightarrow \mathbb{R}$ 对于 E 中的每一个边给定了一个成本值. 当节点 v_i 向节点 v_j 发送 h 个数据包时, 节点 v_i 的最小成本为 $h \times \omega(v_i, v_j)$.

根据传递数据包的成本的计算方式的不同, 可以分为如下两种模型:

(1) 链成本模型. 节点 v_i 发送数据包的成本取决于接受节点 v_j , 可以认为成本发生在链上, 当节点 v_i 向节点 v_j 发送数据包时, 节点 v_i 的费率为 $\omega(v_i, v_j) = \omega_{i,j}$.

(2) 节点成本模型. 每个节点 v_i 发送数据包的成本是确定的 c_i , 与接受节点 v_j 无关, 即 $\omega(v_i, v_j) = c_i$. 节点成本模型可以看作是链成本模型的特例.

假定网络中的各节点都是具有理性的自私节点, 对这两种特性我们有如下定义. 一是关于自私性, 由于每个节点属于不同的所有者, 所以我们假定各节点都是自私的, 即各节点的目的都在于最大化自己的效用值. 二是关于理性, 假设各节点都是理性的, 即节点总是选择策略使得自己的收益最大化.

在 Ad-hoc 无线网络中, 源点 S (Source) 希望将数据发送到终点 D (Destination), 各中间节点 (Relay Points) 转发数据需要付出一定的成本, 例如

电池的电量消耗等, 在不同的环境中可以有不同的含义, 将各节点的成本定义为 $c = (c_1, c_2, \dots, c_n)$, 根据自己的成本信息等, 各中间节点给出转发数据的报价 $b = (b_1, b_2, \dots, b_n)$, 终点 D 根据各中间节点的报价 $b = (b_1, b_2, \dots, b_n)$ 计算得到最短路径 SP , 在这条路径上所有节点的报价之和最少. 位于最短路径 SP 上的各节点依次传递数据包并得到各自的收益 p_i , 节点 v_i 的效用值为 $u_i = p_i - c_i$. 注意这里 p_i 与 b_i 不一定相等, 依各种激励机制的不同而变化. 我们希望能够设计一个机制, 使得在这个机制下能够找到全局最优解, 即寻求实际总成本最小的最短路径 $SP = (S, v_{\sigma_1}, v_{\sigma_2}, \dots, v_{\sigma_n}, D)$, 记任一路径 P 的总成本为 $|P|$.

在基于报价的机制中, 费用的支付方式是一个关键的问题, 即中间节点得到的收益必须有人来支付. 目前, 主要采用中央银行支付和源点支付两种方式.

(1) 中央银行支付. 假设在 Ad-hoc 无线网络中, 有一个虚拟的中央银行, 它定期从各节点收取费用, 当发生数据传递时, 由中央银行负责向中间节点支付.

(2) 源点 S 支付. 一般来说, 源点 S 是数据传递活动的需求方和受益方, 因此由 S 来支付各中间节点应得的收益.

3.1.2 Ad-hoc VCG 机制

在基于激励的机制中, Ad-hoc VCG^[12] 是一个最基础的机制, 它引入了经济学中的思想, 将经典的 VCG 拍卖模型 (二级报价拍卖) 应用在无线 Ad-hoc 网络中.

Ad-hoc VCG 的设计目标是激励各中间节点给出转发所需的真实成本, 它的基本思路是对位于 SP 上的所有中间节点 $v_i \in SP$, 除支付其所报的价格 b_i 外, 还向其支付额外的报酬, 这个报酬值为不包括该节点的最短路径 SP^{-v_i} 比原最短路径 SP 多出的机会成本值, 即 $|SP^{-v_i}| - |SP|$, 以激励节点报出自己的真实成本, 从而实现防策略性, 达到全局的最优化. 在 Ad-hoc VCG 机制下, 可以表示每个节点的实际报酬值如下:

$$p_i = |SP^{-v_i}| - |SP| + c_i.$$

加入的这部分机会成本可以保证节点没有动机去任意抬高自己的价格, 如果节点被选入最短路径, 它的收益并不会随着它的报价提高而增加, 这就是 Ad-hoc VCG 的关键思想之所在.

举一个具体的例子来解释 Ad-hoc VCG 机制,

考虑如图 2 的网络, 节点上的数字表示节点的真实成本. 很明显, 最优路径为 $SP = (S, v_1, v_2, D)$, 去掉节点 v_1 或 v_2 后的最优路径为 $SP^{-v_1} = SP^{-v_2} = (S, v_3, v_4, D)$. 此时, 最短路径的总报价为 $|SP| = b_1 + b_2 = 6$, 去掉节点 v_1 后的最优路径的报价为 $|SP^{-v_1}| = |SP^{-v_2}| = b_3 + b_4 = 20$.

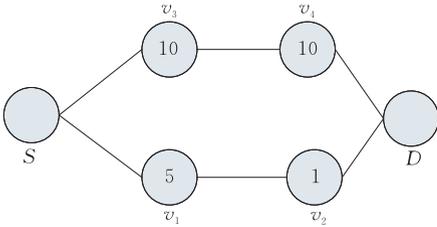


图 2 Ad-hoc VCG 机制

因此, 根据 Ad-hoc VCG 机制, v_1 得到的支付可以计算得到 $|SP^{-v_1}| - |SP| + b_1 = 20 - 6 + 5 = 19$, 同理, v_2 得到的支付可以计算为 $|SP^{-v_2}| - |SP| + b_2 = 20 - 6 + 1 = 15$.

Ad-hoc VCG 机制的提出为含有自私节点的非合作无线网络的研究提供了一个很好的开端, 然而 Ad-hoc VCG 机制本身也不可避免地存在着一些问题. (1) 节点的计算量比较大, 在 Ad-hoc VCG 机制中, 不仅需要计算 SP , 还需要分别计算出对于所有最短路上的节点 $v_i \in SP$, 分别除去它们后相应的最短路径长度 SP^{-v_i} , 计算量很大, 对计算能力和存储能力都比较弱的无线节点是一个挑战. (2) 关于节点收益的支付问题, 当采用中央银行支付时, Ad-hoc VCG 机制并不能保证系统的防策略性, 即不能保证节点都愿意给出自己的真实价格. 这是因为在中央银行支付时, 支付给数据转发路径中节点的报酬最终要由所有节点分摊, 其他节点收益的增加就意味着所有节点都要向中央银行交更多的税, 所以, 不在最短路径 SP 上的节点有动机压低报价来降低在 SP 上的节点的收益. (3) 关于过度支付的问题, 由于在 Ad-hoc VCG 机制中, 需要向路径中的节点支付除了它们自身的报价之外的一部分额外的机会报酬, 因此会造成过度支付的问题. 特别由于这部分报酬会受到网络结构和节点的报价等多因素的影响, 在某些特殊情况下机会报酬的数值可能会非常高, 导致系统进入异常状态. (4) 节点共谋的问题, Ad-hoc VCG 机制能够很好地解决节点只考虑自身利益的单节点自私性问题, 但是它不能处理多个节点通过组成一个小团体而形成共谋的情况, Ad-hoc VCG 机制并不能有效地保证在存在共谋的

无线网中各节点仍能报各自的真实成本, 它并不拥有防策略性. 这一点也是含有自私节点的无线网络亟待解决的问题, 在后面我们还将进行更进一步的讨论. (5) 对于发送数据的源节点 S 与接受数据的目标节点 D 的非自私性假设. Ad-hoc VCG 机制中假设 S 与 D 都会说真话并且是无条件合作的, 然而实际中节点 S 和 D 也同样具有自私性和理性, 因此, Ad-hoc VCG 还有待于进一步的改进.

3.1.3 机制设计

Ad-hoc VCG 机制具有防策略性, 这是我们在实际应用中需要得到的一种特性. 这里我们将对具有防策略性的机制进行简要的介绍, 并给出防策略性机制设计中的多个关键点.

一个具有防策略性机制可以这样定义, 如果每个参与者的类型都是策略空间的一部分, 每个参与者通过报告他们的真实类型来最大化他们的效用函数值, 且不受其他参与者的类型影响, 则该机制实现了防策略性. 定义 \mathbf{a}_{-i} 为除参与者 i 外其他所有参与者的策略向量, 即 $\mathbf{a}_{-i} = (a_1, a_2, \dots, a_{i-1}, a_{i+1}, \dots, a_n)$; \bar{a}_i 表示参与者 i 给出真实价格 c_i 的策略; a'_i 为参与者 i 的策略集中的任意策略, 即参与者 i 可以给出的任意价格.

一个机制具有防策略性要满足如下 3 个必要条件:

(1) 激励兼容性. 对于一个具有防策略性机制, 支付函数要满足激励兼容性, 即对每个参与者 i , 满足

$$u_i(\mathbf{a}_{-i}, \bar{a}_i) \geq u_i(\mathbf{a}_{-i}, a'_i).$$

也就是说, 给出真实价格 c_i 是每个参与者的占优策略. 即如果一个机制是具有防策略性的, 那么每一个参与者都没有动机谎报价格, 因为这样不会给它带来更高的收益.

(2) 即节点理性. 防策略性机制保证各参与者都自愿参加. 每一个参与者都可以得到一个非负的效用函数值, 即

$$u_i(\mathbf{a}_{-i}, \bar{a}_i) \geq 0.$$

每个参与节点在给出真实价格的情况下, 能得到非负的收益值, 并且不受其他节点的影响.

(3) 多项式时间可计算性. 防策略性机制需要保证所有的输出和支付函数的计算满足多项式时间.

具有防策略性是机制设计中比较理想的目标, 当然防策略性机制的设计也存在很大的困难. 在有些实际设计的机制中可以将防策略性有所放松, 在

没有节点不存在占优策略的情况下,选择策略达到纳什均衡,也可以满足选择最优路径的目标.下面我们将详细介绍几种典型的基于激励的机制,它们包括各种单播机制和多播机制.

3.1.4 典型的单播机制

在 Ad-hoc VCG 工作的基础上,人们又提出了多种针对含有自私节点的非合作无线网络的机制.有些是针对 Ad-hoc VCG 机制中存在的问题进行改进,有些则是从根本上去改变 Ad-hoc VCG 的防策略性,提出基于纳什均衡的新的机制.我们首先介绍在单播环境中的各种典型机制.

COMMIT 机制

COMMIT^[14] 机制对 Ad-hoc VCG 机制做出了关键性的改进和扩展,考虑了当源点 S 具有理性并且有预算约束的情况.在经典的 Ad-hoc VCG 机制下,当源点 S 是理性的并且有预算约束,在采用源点 S 支付的时候,不能保证防策略性.首先考虑节点拥有预算约束的情况.如果最短路径 SP 上所有节点需要的总支付超过了 S 的预算约束,则数据传递不能正常进行,这种情况下, SP 上的节点 v_i 得到的报酬 p_i 为零,效用值 u_i 将为非正值.在有预算约束的情况时,在一些特定的网络结构下,节点 v_i 报出比其真实成本高的价格 ($b_i > c_i$) 反而可以使得总支付变小,从而保证数据的正常传递,显然这时 v_i 的效用值 $u_i > 0$. 我们可以看到,在这种有预算约束的情况下, v_i 将有激励虚报成本.考虑如图 3 的网络结构,节点上的数字表示其真实成本,源点 S 中的数字表示其预算约束,如果所有节点均报出其真实成本,则根据 Ad-hoc VCG 机制,最优路径 SP 上节点 v_1, v_2 应得的支付分别为 $p_1 = 19, p_2 = 15$,源点 S 需要支付的总金额为 $p_1 + p_2 = 34$,大于其预算约束,则数据传递不进行,显然, v_1, v_2 的效用值均为零.而如果 v_1, v_2 报高价,如 $b_1 = 7, b_2 = 3$,则可以计算相应的支付为 $p_1 = 17, p_2 = 13$, S 需要支付的总金额在预算约束之内,节点 v_1 的效用值为 $u_1 = p_1 - c_1 = 17 - 5 = 12$,同理,节点 v_2 的效用值为 $u_2 = 12$.从这个简单的例子我们可以看到, v_1, v_2 报高价反

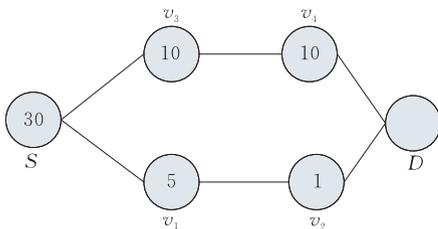


图 3 Ad-hoc VCG 机制举例

而得到更大的效用,因此,这时 Ad-hoc VCG 机制并不能保证防策略性.

COMMIT 机制对传统的 Ad-hoc VCG 机制进行了适当的改进,解决了这个问题,实现了在源点 S 有预算约束情况下,仍然保证具有防策略性. COMMIT 机制的基本思路是使数据传递不取决于最短路径上节点的报价 b ,这时节点就没有激励报低价以提高自身的效用. COMMIT 中定义了一个新的概念——替代路径,即不包括 SP 路径上所有节点的最短路径,可以用 P^{-SP} 表示.它规定了这个替代路径的总成本 $|P^{-SP}|$ 为数据传递的分界点,当源点 S 的预算大于这个值的时候,进行数据传递,并且按照 Ad-hoc VCG 机制计算的价格支付最短路径上的节点,否则不进行数据传递.这个机制保证了在源点 S 是理性情况下,节点仍然以报出真实价格为支配策略. COMMIT 机制仍然是基于 VCG 的,因此也存在着 Ad-hoc VCG 中固有的过度支付和不能平衡预算的问题.

CORSAC 机制

在文献[15]中,Zhong 等人指出在无线自组织网络的博弈中不存在以转发其他节点数据为占优策略的机制,一个重要的原因是无线自组织网络中数据的发送是由一条路径上的所有节点共同协作完成的,任何节点不能独自决定转发收益.因此,他们提出了一种合作优化协议 CORSAC. 协议 CORSAC 将路径选择和数据转发这两个阶段分开考虑,分别提出了路径选择和数据转发两个子协议. 路径选择协议通过将激励机制和安全机制相结合来使得每个节点做出其最优的选择,并且限制节点的作弊行为. 数据转发子协议引入了密码技术来保证节点按照已确定的路径对数据报进行转发.事实上,这两个子协议是交织在一起相互作用的.在路径选择阶段,节点决定数据包的路由,而选择这个路由实际上是选择了该条路径上的其他节点的转发过程,也就是决定了该路径上其他节点的转发行为.因此,每个节点的效用函数需要通过两个子协议来共同决定,这是一个很关键的问题.文章中引入了扩展博弈模型.

在路径选择阶段中,由于纯 Ad-Hoc VCG 协议中节点的报价之间存在相互依赖的关系,因此,不存在一个占优策略保证每个节点都出真实的价格. CORSAC 将 Ad-Hoc VCG 协议和密码技术相结合,防止节点篡改其他节点的报价,从而成功地解决了纯 Ad-Hoc VCG 的问题.在收集每个节点报价的阶段,CORSAC 引入了加密机制.节点 v_i 与目的

节点 D 之间共享密钥 $k_{i,D}$, 节点 v_i 所发出的报价信息只有目标节点 D 可以解密, 因此, 其它节点不能任意篡改节点 v_i 的报价. 由此可见, 加密机制可以保证目标节点得到准确报价, 从而在此基础上选择最优路由. 路由的选择是通过经典的 Ad-Hoc VCG 机制来实现的, 它又保证了节点能够给出真实的报价, 即实现了防策略性.

在数据转发阶段, 目标节点会按照选定的路径对数据进行顺序转发. 首先目标节点将带有其数字签名的路径信息向该选定路径上的所有节点转发, 节点收到路由信息后要检查签名信息的正确性. 之后, 节点对分块的数据包进行转发. 同时, 为了防止确认信息被节点篡改, 确认信息也经过了加密, 只有源节点才能正确解析. 通过将加密算法引入到 Ad-Hoc VCG 中, CORSAC 使当前非合作无线网络的路由机制研究有了很大的发展.

OURS 机制

OURS 机制^[16]给出了一种基于纳什均衡的机制(使用节点成本模型), 它很好地解决了在 VCG 机制下存在的过度支付问题. VCG 模型实现了对于所有节点的防策略性, 而 OURS 放宽了这个限制, 它不再要求对于所有节点来说报出真实成本都是占优策略, 但是保证在该机制下, 如果其他节点报真实成本, 则节点 v_i 的最优策略是报自己的真实成本 c_i . 由此可见, 所有节点都报各自的真实成本是一个纳什均衡, 并且解决了 VCG 中对于中间节点的过度支付问题.

OURS 机制包括两个阶段: 广播阶段和单播阶段. 在广播阶段, 每个节点报价 b_i , 发送一个虚拟数据包并且得到一个很小的收入, 这个数据包的大小和收入的多少决定了对于每一个节点来说, 报出自己的真实成本是占优策略. 在单播阶段, 根据广播阶段的报价 $b = (b_1, b_2, \dots, b_n)$, 首先计算出一个从 S

到 D 的最短路径 $SP(S, D, b)$. 然后处于此最短路径上的节点进行第二次报价 \bar{b} , 利用此报价更新原报价 b 为 h ,

$$h_i = \begin{cases} b_i, & v_i \in V - SP(S, D, b) \\ \bar{b}_i, & v_i \in SP(S, D, b) \end{cases},$$

并计算此时的最短路径 $SP(S, D, h)$, 对于仍在最短路径上的节点, 按照其报价进行支付. 而对于属于 $SP(S, D, b)$ 而在新报价下不在最短路径 $SP(S, D, h)$ 上的节点 v_i , 则对它处以罚款 $\gamma \times |b'_i - b_i|$, 其中 γ 为一个确定的参数.

OURS 机制具有下面两条性质:

(1) 存在纳什均衡并且在所有的纳什均衡中, 广播阶段所有节点的最优策略都是报出自己的真实成本;

(2) 支付最多的纳什均衡所需的支付不大于支付最小的纳什均衡的 2 倍.

另外, OURS 也考虑了 S 有预算约束的情况, 并提出了相应的解决方案. 当 S 有预算约束时, 我们计算 S 需要付出的支付 $\varphi = |LB(S, D, b)|/2$, 其中 $|LB(S, D, b)|$ 是在报价 b 的情况下能够覆盖 SP 上所有节点的最小桥集(Least bridge cover)的总成本. 如果 S 的预算大于 φ , 则进行支付并且传递数据包, 并且由中央银行来平衡预算; 如果 S 的预算小于 φ , 则不传递数据包. 这种机制下, 存在纳什均衡; 在所有的纳什均衡下, 广播阶段所有节点的最优策略都是报出自己的真实成本. 并且中央银行可以收回 $1/2$ 的支出.

在表 1 中, 我们对这几种典型的基于激励的机制进行了简单的总结和比较. 可以看到, 这几种机制分别解决了不同假设下 Ad-hoc VCG 存在的问题. 特别是 OURS 机制, 它从另一个角度提出了新的机制, 突破了对机制的防策略性要求, 通过达到纳什均衡来寻找高效路径, 同样得到了很好的效果.

表 1 典型算法比较

典型算法	源节点特性	中间节点特性	算法特点
Ad-hoc VCG	合作节点	防策略性	基本算法, 对源节点有理想化要求
COMMIT	有预算约束	防策略性	算法复杂度与 Ad-hoc VCG 相当
CORSAC		引入加密机制, 保证信息可靠传递	解决数据传递可靠性问题, 算法较复杂
OURS		达到纳什均衡	两次报价, 算法较复杂, 但更接近实际

3.1.5 典型的多播机制

多播环境是指接受终端多于一个的情况, 不妨假设系统有 m 个终点, 记为 $Q = (D_1, D_2, \dots, D_m)$. 多播环境与单播环境最大的区别是数据传递路线

不再是单一路径, 而是一个树状结构. 目前, 对于含有自私节点的非合作无线网络多播的研究还比较有限, 我们以一个典型的多播机制为例做一个简单的介绍.

我们知道,在多播环境下,找到最优的树状结构是一个 NP 问题,只能通过各种近似算法寻找局部最优的树结构.然而,在含有自私节点的非合作无线网络中应用这些近似算法寻找最优路径时,VCG 机制并不能保证防策略性.文献[17]根据现在比较流行的一些多播环境下的树结构,包括链成本模型和节点成本模型下的不同树结构,提出了有效的机制来保证在非合作无线网络中的路由机制仍具有防策略性.其基本思想在于使节点的收入基于一个可得到最优解的局部 VCG 机制.

下面以节点成本模型下的最小成本拍卖树(Least Cost Path Tree, LCPT)为例说明这篇文献的基本思想.为了得到 LCPT,在各节点报价为 b 的时候,我们首先计算从 S 到各个终点 D_i 的最短路径 $SP(S, D_i, b)$,然后将这 m 个最短路径组合在一起即得到最小成本拍卖树 $LCPT(b)$.如果直接通过 VCG 机制计算位于 LCPT 树上的任一节点 v_i 得到的支付:

$$p_i = |LCPT^{-v_i}(b)| - |LCPT(b)| + b_i,$$

其中 $LCPT^{-v_i}(b)$ 表示在报价 b 下不包括 v_i 的最小成本拍卖树,即所有 $SP^{-v_i}(S, D_i, b)$ 的集合,这种机制不能实现防策略性.

以图 4 为例,节点上的数字表示其真实成本.在经典 VCG 机制下,如果 v_3 报出其真实成本,则 $SP(S, D_1, b) = (S, v_1, D_1)$, $SP(S, D_2, b) = (S, v_2, D_2)$,即 v_3 不在 LCPT 上,其效用为零.而如果 v_3 报低价,比如说 $b_3 = 99$,则 $SP(S, D_1, b) = (S, v_3, D_1)$, $SP(S, D_2, b) = (S, v_3, D_2)$, $|LCPT| = 99$, $|LCPT^{-v_3}| = 200$, v_3 得到的支付为 $p_3 = 200 - 99 + 99 = 200$,其效用 $u_3 = 200 - 101 = 99$ 大于其报真实成本的效用,在这种情况下, v_3 有激励报低价,即经典 VCG 机制不能保证防策略性.

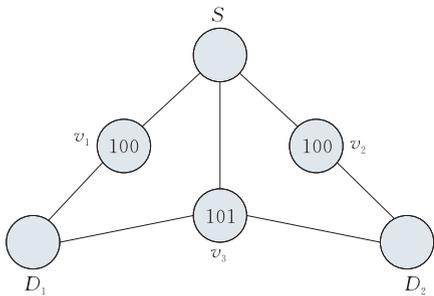


图 4 非合作无线网络中的多播机制

而文中提到的多播机制则解决了这个问题,在这种机制下,节点 v_i 得到的支付为其基于所有 $SP(S, D_k, b)$ 的 VCG 支付 $p_i^k = |SP^{-v_i}(S, D_k, b)| -$

$|SP(S, D_k, b)| + b_i$ 的最大值,即

$$p_i = \max_{D_k \in Q} p_i^k.$$

因此,这个机制保证了防策略性.

仍旧以上面的例子(图 4)加以说明,采用新的多播机制,如果 v_3 报出其真实成本,则 $SP(S, D_1, b) = (S, v_1, D_1)$, $SP(S, D_2, b) = (S, v_2, D_2)$,即 v_3 不在 LCPT 上,其效用为零.如果 v_3 报低价,比如说 $b_3 = 99$,则 $SP(S, D_1, b) = (S, v_3, D_1)$, $SP(S, D_2, b) = (S, v_3, D_2)$, $p_3^1 = |SP^{-v_3}(S, D_1, b)| - |SP(S, D_1, b)| + b_3 = 100 - 99 + 99 = 100$,同理, $p_3^2 = 100$,则 v_3 得到的支付 $p_3 = \max_{D_k \in Q} p_3^k = 100$,其效用值 $u_3 = p_3 - c_3 = 100 - 101 = -1$ 小于其报真实成本时的效用, v_3 没有激励报低价,由此可见,这种新的多播机制保证了防策略性.

文章还提出了基于其它树结构的防策略性机制,其基本思想与 LCPT 类似,这里不再赘述.但是这种机制存在着一个问题,即当节点作弊的时候,得出的树结构可以比节点报真实成本时更优.在不同的树结构下,寻找路径的近似算法都是基于局部最优的,节点作弊的根源在于求出的树结构不是最优而是次优的,也就是说,作弊节点的行为不仅有利于它本身,而且有利于整个树结构的优化.

3.2 无线网状网络中的激励机制

无线网状网络(Wireless Mesh Networks)是一种基于多跳路由、对等网络技术的新型网络结构,具有移动宽带的特性.目前无线网状网络已经应用在包括政府、社区、企业等环境中.无线网状网络同样面临节点的自私性的问题,基于激励的机制是一个有效的解决途径.

3.2.1 系统模型

在无线局域网和无线网状网中,一般只有少数节点直接连接在网络上,我们通常称其为网络桥接器或接入节点,除接入节点外的无线移动节点则通过接入节点连入网络.图 5 中给出了无线网状网的结构示意图,图 6 中给出了无线局域网的结构示意图.

在无线局域网中,常规无线节点可以直接与接入节点通信,接入节点直接为它们提供无线接入服务,任何无线节点最多经过单跳就可以接入网络.无线网状网络则提供了一种层次结构,其中网状路由器节点组成了无线网状网的网络骨干,它们一起为无线网状网和其他常规节点提供网络的无线接入,无线节点可能通过单跳或多跳实现无线网络接入.

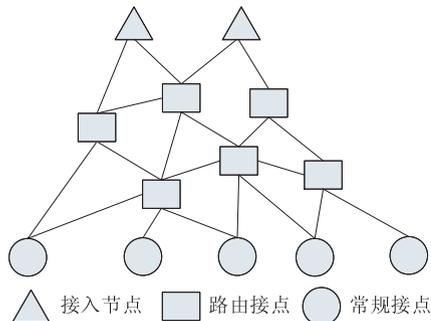


图 5 无线网状网络

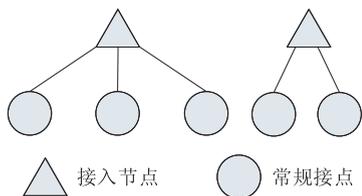


图 6 无线局域网

在非合作无线网状网络和热点网络中,人们通常使用接入报价机制来激励节点参与合作.这种机制的基本过程是,一个移动节点希望接入网络,它可能需要几个中间节点来帮助转发数据包,最终达到接入节点.接入节点会向与其最邻近的下一跳的节点报价,这个节点会根据接入节点的报价和自己的成本向其下游的下一节点再次报价,依此类推,最后一个中间节点向请求接入的节点报价,请求节点根据自己的收益和报价决定是否接入.下面我们通过几种典型的报价机制对其加以详细的说明.

3.2.2 典型接入报价机制

文献[19]基于博弈论的思想研究了无线网状网络中一跳和两跳接入时的有效报价机制.文中将无线网络中接入节点和常规无线节点的相互作用视为一个动态博弈的过程.作为客户的普通无线节点比接入节点了解更多的信息,比如它自身的类型和效用函数等.作者将想接入网络的普通无线节点分为浏览网页和下载文件两类,两者的区别在于其效用函数不同,浏览网页的客户的效用函数是接入网络时间的线性函数,而下载文件的客户只有完整下载了文件才能得到收益,如果在下载中途网络连接中断,则客户的效用为零.可以证明在网页浏览的情况下,一个精炼贝叶斯均衡是接入节点采用一个固定的单位时间费率,而客户只有在当单位时间费用低于其单位时间收益时才选择接入网络,并且在当客户希望的接入网络最长时间是有限的情况下,这也是唯一的精炼贝叶斯均衡.文章又讨论了浏览网页型客户需两跳接入时的情况,证明接入节点和中转

节点都采用固定的单位时间费率是精炼贝叶斯均衡.对于下载文件的情况,其精炼贝叶斯均衡是接入节点在其估计的传输最终时段收取费用,并且客户只会在这个最终时段支付费用.由于接入节点不确切地知道何时传输将结束,因此这个均衡是无效率的.文中进一步分析了接入节点不知道客户是浏览网页型还是下载文件型的情况,并且证明了在一般的情况下,不存在一个固定单位时间费率的纳什均衡,而且接入节点有可能在一些时间段收取高于客户单位时间收益的“不合理”的费率.

文献[20]将文献[19]的结果扩展到有容量限制的多跳接入机制中.作者首先证明了在没有容量限制的多跳接入机制中,接入节点和中转节点在精炼贝叶斯均衡中的最优策略仍然是采用简单的固定费率.但是当接入节点有容量限制时,接入节点的最优策略是采用浮动费率并且可能随时切断客户的网络连接.针对这个情况,作者提出了一种基于合同保证而不是自实现的“固定费率,不间断服务”机制,允许接入节点对不同客户采用不同的费率,但是对某个确定的客户不能改变费率,并且不能随意切断客户的网络连接.最后,作者利用马尔可夫决策理论分析并指出了接入节点在这种机制下的最优策略.

文献[21]研究了热点网络中的报价问题.作者利用市场模型来研究热点网络中的报价问题,让供求关系来决定价格.具体来说,就是多个中间节点报价,需要传输数据的节点比较它们的出价后,选择价格合理的节点进行传输,这就是经典的多买家和多卖家的模型.当然,在无线网状网络中,由于数据和价格等信息传输的复杂性,实际的报价机制和传输机制会不同于经典的经济模型.作者将热点网络系统分为4种不同类型,并分别提出相应的定价方案.针对每个终端节点可以连接的中间节点的不同,设计了价格爬升算法和以VCG为基础的报价机制,使得节点之间可以达到均衡.并且这几种机制可以使系统很快地达到一个均衡状态.

目前无线网状网络被广泛应用,人们已经开始使用博弈论等经济学上的方法来解决其中的自私节点的问题,但仍然存在一些问题.首先,经典的报价机制并不能直接应用到无线网络中,由于无线网络数据传输的特性,价格信息的传递和其真实性的保证等是需要解决的关键问题,需要针对实际网络的情况进行设计.同时,对传输数据类型分类处理可以帮助我们设计更有效的报价机制,然而随着网络技术的不断发展,各种新的应用不断涌现,如何更有效

地对数据类型进行分类也是当前的一个问题。

4 基于网络编码的优化

网络编码作为一种新兴的技术在提高网络性能方面显示出了重要的效果。网络编码最基本的概念是赋予路由器编码计算的能力,可以在网络层将数据包进行编码后再进行转发,目标节点可以通过解码得到相应的数据包。网络编码最早是由 Ahlswede 等人^[22]在 2000 年提出的,他们指出传统的路由转发机制不能达到多播网络的最大容量,而通过网络编码机制则可以实现多播网络的最大容量。之后,人们又在网络编码方面开展了大量的研究工作^[23-25],其结果已经被用在包括有线和无线、多播和单播等各种网络环境下。特别在无线网络环境中,由于无线传输介质共享的特点,无线网络具有先天的优势采用网络编码技术。

含有自私节的非合作无线网络可以引入网络编码机制对系统进行优化,人们提出了一些基于网络编码的无线网络单播和多播优化算法。下面通过两个典型的例子加以说明。

Bhadra 等人^[26]提出了一个最小花费的流分配算法,在节点具有自私性的环境下使得各中间转发节点所需处理的计算量最少。由于节点的不合作性,每一个节点都希望用最小的花费来完成最多的数据传输,节点之间实际上在进行着一场非合作博弈。我们知道,博弈论所达到的纳什均衡状态并不一定是全局最优的,因此会有一些的差值,经济学上称之为“Price of Anarchy”。同时,在引入网络编码的情况下,中间节点有可能利用编码的特性同时转发来自多个不同流的数据,因此,这与传统的多播优化问题有所不同。在网络编码机制的帮助下,在无线自组织中可以采用多路径路由,数据流在多路径之间的速率分配可描述为一个凸优化问题,并且由单数据源的多播扩展到多数据源的情况。文章提出了一种路径上多个用户分配传输花费的机制,这种机制下存在纳什均衡,并且该均衡状态与最优情况相同,即 Price of Anarchy 为零。同时,文中还给出了两种高效的分布式路由算法。一个是“UESSM”,单数据源多播下的用户均衡,每个节点为了降低自己的花费自私地选择路径,在特定的边传输花费方程下,这种算法可以非常接近最优的路由结果。另一个是“LDSRA”,分布式自私路由算法,每个节点根据它自己及其邻居节点的局部信息来动态调整数据流的

分配,将端到端的延时作为花费值,该算法可以有效地缩短传输延时。

Li 等人^[27]研究了在可以利用网络编码技术的情况下非合作环境中的多播问题。这类问题面临的一个重要挑战是如何通过有效的花费分配机制来使得这些具有自私性的多播流能够得到最优的路由。首先,作者将最小花费多播问题用互为对偶的两个线形优化模型来描述,其中考虑了网络编码技术所带来的网络的灵活性,并在此基础上提出了一种基于影子价格的同一路径上多个数据流的分配传输花费的机制。在这种机制下,可以达到纳什均衡。文章进一步给出了一种在路径存在容量限制情况下的有效的花费分配机制,首先向节点征收一定的费用,即所谓的“边缘税”,之后再通过特定的机制返还这些费用保证每个节点仍旧支付真实的费用。这种税收机制的思想与 VCG 机制有一定的相似之处,但它具有更小的计算复杂度。

网络编码技术和现有报价机制的结合为现有的非合作无线网络带来了一些可行的优化。但是其中还有一些方向有待扩展。由于数据是编码后传输的,因此网络编码技术本身就具有安全性的特质,可以自然地保证数据和报价信息的保密性,因此可以应用在报价和支付机制中,在这个方向上还有待于进一步的研究。另外,网络编码技术如何更好地利用无线网络和节点的动态性也是一个重要的研究方向。

5 节点共谋

节点共谋问题是当前非合作无线网络中最具有挑战性的问题。所谓共谋问题即两个或多个节点组成小团体共同牟利。节点共谋会不同程度地影响系统的效率。可以考虑一个最直接的例子,在无线自组织中,如果除去发送数据的源节点和接收数据的目标节点外,其余的所有节点共谋,则显然这些节点可以控制数据的传输,影响数据的正常传输。当然这只是一个极端的例子,实际的网络中节点间可以采用多种形式共谋。当前关于无线路由中的共谋问题的研究,主要分两种情况进行讨论,(1)节点之间不可以传递收益;(2)节点之间可以传递收益。后面我们会详细讨论这两种情况。目前关于无线网络中的共谋讨论还比较有限,这一领域的研究仍然处于起步阶段。

存在共谋的无线网络中,机制设计要求满足以下两个基本的性质^[28]。

(1) 组占优均衡(Group Strategyproof Equilibrium)

如果一个策略集 $a^* = (a_1^*, a_2^*, \dots, a_n^*)$ 满足对于任意一个由一个或多个博弈参与者组成的子集 C , 在任何成本组合下, 满足如下两个条件之一:

① 改变该子集 G 的策略对该子集中任意一个参与者的收益都没有影响;

② 改变该子集 G 的策略则该子集中至少存在一个参与者, 其收益减少;

则称该策略集 a^* 是组支配均衡。

(2) 强纳什均衡(Strong Nash Equilibrium)

如果一个策略集 $a^* = (a_1^*, a_2^*, \dots, a_n^*)$ 满足对于任意一个由一个或多个博弈参与者组成的子集 G , 在任何成本组合下, 在该子集外的节点策略不变的情况下, 满足如下条件:

子集 G 中存在这样一个参与者, 改变子集 G 的策略不会增加该参与者的收益, 则称该策略集 a^* 是强纳什均衡。

这两种性质从一定程度上刻画了共谋的特性。可以证明, 不存在满足组占优均衡的报价机制; 而强纳什均衡在节点之间不可以传递收益的情况下则是可以实现的。文献[28]设计了这样一种可以实现强纳什均衡的机制。

(1) 收益不可传递

有些环境下, 节点是相互独立的, 它们之间并没有协议保证收益的传递, 因此, 只有通过共谋可以提高自己收益的节点才会有动机参与共谋。同时, 我们也可以通过加密等手段限制节点之间收益的传递。这种情况下可以沿用经典博弈中的组占优均衡策略和强纳什均衡策略来进行分析。可以证明在这种情况下, 并不存在满足组占优均衡的报价机制。然而, 可以设计机制满足强纳什均衡, 文献[28]设计了这样一种机制, 实现了在该机制下每一个纳什均衡都是强纳什均衡, 并且每一个均衡都得到真实的最短路径 SP 。该机制的基本思想是使在最短路径上的节点得到的支付随其报价 b_i 的增加递增, 而不在最短路径上的节点得到的支付随其报价的增加递减。

(2) 收益可传递

在实际中很多的情况是节点间属于一个组织, 节点之间可以传递收益, 这种情况对系统的性能会有更恶劣的影响。这时参与共谋组的目标是整个共谋组利益的提高, 因此节点可以以牺牲个人的收益来带来共谋组总体收益的提高。显然这种情况下并不存在满足组占优均衡的策略。可以证明在节点间

可以传递收益时^[29], 不存在能够预防任意两个节点共谋的防策略性机制。随着参与共谋节点的增加, 共谋现象更加难以制止。Wang 等人^[29]对一种简单的相邻两节点共谋的问题进行了讨论, 提出了一种防止相邻两节点共谋的机制。它的思想基于经典的 VCG, 即对任意一个位于最短路径 SP 上的节点 v_i 除其所报的价格 b_i 外向其支付额外的奖励, 这个奖励值为不包括该节点及其相邻节点 $N(v_i)$ 的最短路径 $SP^{-N(v_i)}$ 比原最短路径 SP 多出的成本值, 即 $|SP^{-N(v_i)}| - |SP|$ 。通过支付这个奖励, 防止了相邻节点的共谋。

可以看到, 在目前针对非合作无线网络中共谋机制的研究寥寥无几。我们简要列举未来可行的一些研究方向。(1) 共谋对系统的影响程度, 目前还没有系统的分析, 这是当前需要研究的基本问题。(2) 对于节点之间不可以传递收益的情况, 需要进一步建立有效的监控机制, 杜绝节点之间收益的传递, 以防止节点之间的共谋。(3) 对节点间可以传递收益的情况, 因为每个共谋小团体可以通过调整他们的报价来增加整个小团体的收入, 所以基于 VCG 的机制不能解决这种共谋小团体的问题。对于这种情况, 一方面我们需要考虑如何设计有效的机制防止小团体共谋, 另一方面可以考虑利用小团体共谋的特点, 建立合作博弈模型, 提高网络性能。

6 研究挑战与未来展望

虽然目前博弈论已经被逐渐应用在各种含有自私节点的非合作无线网络机制中, 但是仍然存在很多关键性的问题。

6.1 博弈论与无线网络的结合

虽然博弈论本身的发展已经非常成熟, 但是博弈论在无线网络中应用的分析和设计才刚刚起步。将博弈论引入到具体的无线网络中要涉及到现实中很多问题, 例如, 无线网络的不稳定性、无线自组织网络的分布性等。很多时候现有的博弈论结果并不能直接应用。因此, 一方面, 这是非合作无线网络中需要解决的关键问题; 另一方面, 这也为博弈理论本身的发展提出了挑战, 特别是对针对无线网络这种具有很强动态性和分布性的系统的非合作博弈理论提出了要求。(1) 在无线网络中, 特别是无线自组织网络中, 一般不存在中央节点, 因此, 很难实现集中控制和监管。这对基于博弈论的机制提出了挑战, 很多基于博弈论的报价和付费机制很难直接在分布式

的系统中实现. 因此, 如何在非合作网络中实现分布式的机制设计, 这既是机制设计中的一个重要问题, 也是博弈理论的发展中面临的一个基础性问题.

(2) 由于无线介质的动态性和节点的移动性等特点, 无线网络通信一般是不可靠的. 在很多机制设计中, 通常假设参与者节点之间的信息可以正确传递, 这并不符合无线网络的基本特性. 因此, 博弈理论应用于无线网络时, 还要考虑到信息的不可靠性.

(3) 将博弈论应用于无线网络研究时, 博弈模型的收敛性也是一个关键的问题. 对于存在占优策略的机制, 即无论其它节点如何选择, 任意节点都会愿意按照协议采取一个能达到均衡的占优策略的机制, 收敛性不是一个严重的问题. 然而更多的机制不存在占优策略, 节点根据其它节点的策略在不断调整自己的策略, 最终达到纳什均衡. 通常, 很多情况下并不存在纯策略的纳什均衡. 达到均衡的动态过程有可能需要很长一段时间, 这种长时间的收敛过程会严重影响无线网络的性能. 因此, 如何设计机制来控制博弈模型的收敛时间是当前有待研究的重要问题. (4) 非合作无线网络的各层都存在着博弈. 在介质接入层, 节点可以采取策略增加接入机会, 提高占有无线信道的时间; 在网络层, 节点可以采取自私路由策略等, 拒绝为其它节点转发数据包; 同样, 在应用层仍然存在非合作节点的问题. 针对每一层上的问题, 人们分别提出了各种有效的激励机制来应对. 本文就重点讨论了网络层中各种可行的激励机制. 目前, 这多种机制独立地运行在网络的各层, 它们都具有比较大的开销, 这对无线网络本身带了很重的负载. 如何将它们更有效地结合在一起, 既对机制设计提出了挑战, 也是未来无线网络结构设计中需要考虑的问题.

6.2 无线网络中的激励机制

本文主要探讨了非合作无线网络中数据转发相关的各种激励机制, 虽然这些机制已经部分解决了节点自私性的问题, 但还存在很多关键性的问题. 首先, 需要缩小均衡状态和最优状态之间的差距. 通过对博弈模型的求解可以得到系统的均衡状态, 然而均衡状态并不一定等同于最优状态. 在实际的无线网络系统中, 人们更希望得到的是最优状态, 通过减少混乱代价来使系统接近最优化状态. 对于混乱代价的计算分析及相关的避免机制还有待于进一步研究. 其次, 如何达到激励机制的有效分布式实现. 当前的各种激励机制的分析设计中忽略了分布式实现的一些因素, 因此, 如何使得现有的机制更好地在分

布式的环境中实现, 也是一个重要的问题, 需要综合考虑传输的可靠性、安全性等各种因素. 还有, 复杂动态博弈模型的求解. 无线网络中的通信一般需要多个节点参与, 因此模型一般会比较复杂. 而且节点的动态性等问题也使得模型更加复杂, 这时复杂模型的化简和求解也是一个重要的问题. 另外, 还要减少激励机制带来的额外成本. 引入激励机制必然会给系统带来额外的开销, 包括通信和管理等开销. 一方面, 我们需要优化机制来降低这部分开销, 另一方面, 我们可以合理配置激励机制, 根据需要不断调整机制的设置. 最后, 要应对节点的共谋. 部分节点可以联合起来, 扩大共同的利益, 这是无线网络中一个非常现实的问题. 然而, 当前的机制还不能有效地应对节点共谋的危害.

7 总 结

文章重点讨论了含有自私节点的非合作无线网络中各种基于博弈论的路由机制, 分别总结了基于信任度的机制和基于非合作博弈的激励机制这两种类型的机制. 特别对不同网络环境的各种典型的基于非合作博弈的激励机制进行了归纳和比较, 其中包括两种典型的无线网络结构: 无线自组织网络和无线网状网络. 同时, 文章还讨论了基于网络编码的优化对于含有自私节点的无线网络性能的影响. 文章中还特别关注了共谋问题, 由于目前这个领域的研究还处于起步阶段, 我们重点分析了有待于以后进一步研究的方向. 通过上面的归纳、分析和比较, 我们在文章最后详细总结了当前非合作无线网络研究中的理论挑战及未来可行的发展方向.

参 考 文 献

- [1] Mui L. Computational models of trust and reputation: Agents, evolutionary games, and social networks [Ph. D. dissertation]. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, USA, 2003
- [2] Josang A, Ismail R, Boyd C. A survey of trust and reputation systems for online service provision. *Decision Support Systems*, 2007, 43(2): 618-644
- [3] Marti S, Giulì T J, Lai K, Baker M. Mitigating routing misbehavior in mobile ad hoc networks//Proceedings of the 6th International Conference on Mobile Computing and Networking (Mobicom). Boston, MA, USA, 2000: 255-265
- [4] Buchegger S, Boudec J L. Performance analysis of the confidant protocol: Cooperation of nodes—Fairness in dynamic

- ad-hoc networks//Proceedings of the IEEE/ACM Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MobiHOC). Lausanne, Switzerland, 2002: 226-236
- [5] Michiardi P, Molva R. Core: A collaborative reputation mechanism to enforce node cooperation in mobile ad hoc networks//Proceedings of the IFIP TC6/TC11 6th Joint Working Conference on Communications and Multimedia Security. Deventer, The Netherlands, 2002: 107-121
- [6] Buttyan L, Hubaux J. Stimulating cooperation in self-organizing mobile ad hoc networks. *Mobile Networks and Applications*, 2003, 8(5): 579-582
- [7] Buttyan L, Hubaux J. Enforcing service availability in mobile ad-hoc wans//Proceedings of the 4th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MobiHOC). Boston, MA, USA, 2000: 87-96
- [8] Srinivasan V, Nuggehalli P, Chiasserini C F, Rao R R. Cooperation in wireless ad hoc networks//Proceedings of the 22th IEEE International Conference on Computer Communications (Infocom). San Francisco California, USA, 2003: 808-817
- [9] Srinivasan V, Nuggehalli P, Chiasserini C F, Rao R R. Energy eciency of ad hoc wireless networks with selfish users//Proceedings of the European Wireless Conference(EW2002). Florence, Italy, 2002
- [10] Zhong S, Chen J, Yang Y R. Sprite: A simple, cheat-proof, credit-based system for mobile ad-hoc networks//Proceedings of the 22th IEEE International Conference on Computer Communications (Infocom). San Francisco California, USA, 2003: 1987-1997
- [11] Li X, Wang W. Resource Management in Wireless Networking, volume 16, chapter Truthful Computing in Wireless Networks. Boston, MA: Kluwer Academic Publishers, 2005: 165-197
- [12] Anderegg L, Eidenbenz S. Ad hoc-VCG: A truthful and cost-ecient routing protocol for mobile ad hoc networks with selfish agents//Proceedings of the 9th International Conference on Mobile Computing and Networking (Mobicom). San Francisco California, USA, 2003: 245-259
- [13] Friedman E, Parkes D. Pricing wifi at starbucks-issues in on-line mechanism design//Proceedings of the 4th ACM Conference on Electronic Commerce (EC). San Diego, California, USA, 2003: 240-241
- [14] Eidenbenz S, Resta G, Santi P. Commit: A sender-centric truthful and energy-ecient routing protocol for ad hoc networks with selfish nodes//Proceedings of the 5th IEEE International Workshop on Algorithms for Wireless, Mobile, Ad Hoc and Sensor Networks (IPDPS). Washington, DC, USA, 2005: 239.2
- [15] Zhong S, Li L E, Liu Y, Yang Y. On designing incentive-compatible routing and forwarding protocols in wireless ad-hoc networks: An integrated approach using game theoretical and cryptographic techniques//Proceedings of the 11th International Conference on Mobile Computing and Networking (Mobicom). Cologne, Germany, 2005: 799-816
- [16] Wang W, Li X, Eidenbenz S, Wang Y. Ours: Optimal unicast routing systems in non-cooperative wireless networks//Proceedings of the 12th International Conference on Mobile Computing and Networking (Mobicom). Los Angeles, CA, USA, 2006: 278-289
- [17] Wang W, Li X, Wang Y. Truthful multicast in selfish wireless networks//Proceedings of the 10th International Conference on Mobile Computing and Networking (Mobicom). Philadelphia, PA, USA, 2004: 245-259
- [18] Salem N B, Buttyan L, Hubaux J, Kakobsson M. A charging and rewarding scheme for packet forwarding in multihop cellular networks//Proceedings of the 4th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MobiHOC). San Diego, CA, USA, 2003: 13-24
- [19] Musacchio J, Walrand J. Wifi access point pricing as a dynamic game. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2006, 14(2): 289-301
- [20] Lam R K, Chiu D-M, Lui J C S. On the access pricing issues of wireless mesh networks//Proceedings of the IEEE International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS). Lisboa, Portugal, 2006: 61-70
- [21] Chen K, Yang Z, Wagener C, Nahrstedt K. Market models and pricing mechanisms in a multihop wireless hotspot network//Proceedings of the 2nd Annual International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems (MobiQuitous). Washington, DC, USA, 2005: 73-84
- [22] Ahlswede R, Cai N, Li S Y R, Yeung R W. Network information flow. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2000, 46(4): 1204-1216
- [23] Katti S, Katabi D, Hu W, Rahul H, Medard M. The importance of being opportunistic: Practical network coding for wireless environments//Proceedings of 43rd Allerton Conference on Communication, Control, and Computing. Monticello, IL, 2005
- [24] Katti S, Rahul H, Hu W, Katabi D, Medard M, Crowcroft J. Xors in the air: Practical wireless network coding. *SIGCOMM Computer Communication Review*, 2006, 36(4): 243-254
- [25] Liu J, Goeckel D, Towsley D. The throughput order of ad hoc networks employing network coding and broadcasting//Proceedings of the IEEE Military Communications Conference (Milcom'06). Washington, DC, 2006: 1-7
- [26] Bhadra S, Shakkottai S, Gupta P. Min-cost selfish multicast with network coding. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2000, 52(11): 5077-5087
- [27] Li Z. Min-cost multicast of selfish information flows//Proceedings of the 26th IEEE International Conference on Computer Communications (Infocom). Anchorage, Alaska, USA, 2007: 231-239

- [28] Zhong S, Wu F. On designing collusion-resistant routing schemes for non-cooperative wireless ad hoc networks//Proceedings of the 13th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (Mobicom). Montréal,

Québec, Canada, 2007: 278-289

- [29] Wang W, Li X. Low-cost routing in selfish and rational wireless ad hoc networks. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2006, 5(5): 596-607



WANG Yang, born in 1982, Ph. D. candidate. Her current research interests include network security, performance evaluation and stochastic process algebra.

LI Quan-Lin, born in 1964, Ph. D. , associate professor. His current research interests include stochastic models, stochastic processes, stochastic process algebra, manufacturing systems, communication networks, network security and computer vision.

WANG Jing-Qi, born in 1986, Ph. D. candidate. His current research interests include operations management and game theory.

LIN Chuang, born in 1948, Ph. D. , professor and Ph. D. supervisor. His current research interests include computer networks, performance evaluation, network security, Petri net theory, trustworthy networks and trustworthy computing.

JIANG Xin, born in 1975, Ph. D. candidate. His current research interests include network security, MANET trust management and performance evaluation.

Background

This research is partly supported by the National Basic Research Program of China (973 Program) under grant No. 2006CB805901, the National Natural Science Foundation of China under grant Nos. 60673187, 60803123, 10671107, 10871114 and 60736028.

Since wireless networks are usually distributed, independent and mobile, wireless nodes are required to cooperate to complete most transmission functions. Traditionally, people assume that all the wireless nodes are willing to cooperate, and willing to provide service to other nodes. However, it is not in accordance with the reality. In fact, nodes in wireless networks are usually selfish, especially when they belong to different organizations. The selfish nodes would have severe impact on the system performance in wireless networks. Therefore, it is an important and challenging work to deal with the selfish nodes in wireless networks.

Game based mechanisms have been introduced to study the wireless network involving selfish nodes. In the literature, there are mainly two approaches to deal with the selfish nodes: credit based mechanisms and non-cooperative game and incentive based mechanisms. The authors summarize and analyze the typical routing mechanisms in this area, and especially discuss the non-cooperative game and incentive based routing mechanisms for wireless ad-hoc networks and wireless mesh networks. Network coding as an efficient technology can help to improve network performance. The authors also study the optimization schemes based on network coding in wireless networks involving selfish nodes. Moreover, they discuss the collusion problem in non-cooperative wireless networks and present the existing challenges and possible research directions in non-cooperative wireless networks.