

无线多跳网络基于位势博弈的 传输调度方法 *

樊 帅¹, 张 林¹, 王耀希², 任 勇¹

(1. 清华大学 电子工程系, 北京 100084; 2. 云南大学, 昆明 650223)

摘 要: 为了进一步提高无线多跳网络的吞吐量,采用物理干扰模型,考虑链路速率可以随信干噪比(signal to interference plus noise ratio, SINR)动态可调,提出了基于位势博弈的传输调度算法。通过设计合适的位势函数,使得纳什均衡点的存在性和收敛性都得到保证。同时,每个参与者在最小化自己支付的同时,使全局函数达到最优。仿真结果表明,该算法具有较好的吞吐量性能,而且有较快的收敛速度。

关键词: 无线多跳网络; 传输调度; 物理干扰模型; 位势博弈

中图分类号: TN925; TP393

文献标志码: A

文章编号: 1001-3695(2012)03-1014-05

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2012.03.059

Potential game based transmission method for wireless multi-hop networks

FAN Shuai¹, ZHANG Lin¹, WANG Yao-xi², REN Yong¹

(1. Dept. of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Yunnan University, Kunming 650223)

Abstract: To further increase the throughput of wireless multi-hop networks, this paper proposed a scheduling method based on potential game with physical interference model. It considered that the link rate could change in terms of SINR dynamically. By designing the potential function properly, the existence and convergence of the Nash equilibrium could be guaranteed. Meanwhile, the global function could be optimized while each player tried to minimize its payoff. Simulation results show that the method has good performance.

Key words: wireless multi-hop networks; transmission scheduling; physical interference model; potential game

0 引言

无线多跳网络^[1]作为与蜂窝移动通信系统并行的网络系统,在军事、应急通信、地震救灾等特殊领域,以及环境、医疗、交通、智能家庭等其他商用领域有着广阔的应用前景。传输调度机制的功能是将网络中的无线链路按照一定的服务质量(QoS)要求进行调度,协调它们在合适的时机、以合适的方式接入信道,然后由物理层利用相关技术来实现数据比特流的成功传输。因此,传输调度机制对信道的利用率起着重要的作用,直接影响到整个网络的 QoS,一直是无线多跳网络领域的研究热点之一^[2~5]。

无线多跳网络中传输调度方法主要分为两类,即基于竞争和调度的方法。基于竞争的传输调度方法,如 IEEE 802.11 协议中的 CSMA 机制,遵循竞争的原则来占用信道,而没有提前预约任何信道资源。因此这类协议不能提供服务质量 QoS 的保证^[6]。基于调度的方法,如时分多址接入(TDMA),通过给各个链路分配确定的信道资源来保证网络的 QoS 需求^[7,8]。因此,本文的研究内容是基于 TDMA 的传输调度机制。

判断无线链路间是否产生冲突的准则可以用干扰模型来描述,干扰模型的选择对传输调度算法的性能产生重要的影响^[9]。常用的干扰模型有两种^[10],即协议干扰模型和物理干扰模型。由于协议干扰模型非常简单,而且可以模拟 802.11 协议中的 CSMA 机制,目前很多传输调度算法的设计基于此模型(如文献[11,12])。然而,协议干扰模型仅仅考虑两两链路间的冲突关系,而忽略了其他干扰链路产生的干扰累积作用。因此,很多文献指出,基于协议干扰模型设计的传输调度算法其性能要差于基于物理干扰模型的算法^[10]。

物理干扰模型中,以链路接收节点处的信干噪比(SINR)为标准来判断链路间是否冲突。物理干扰模型将网络中的所有干扰考虑在内,因此基于此模型的调度算法具有较好的性能。然而,解决此模型下的传输调度问题将变得十分困难。

另一方面,以往大部分的研究都是假设链路速率恒定。根据香农定理,链路速率是 SINR 的函数,如果根据不同的 SINR 自适应调整速率会进一步提高网络的性能。此时传输调度问题变为非线性问题,进一步加大了传输调度算法的设计难度。

本文考虑在链路速率可以随着 SINR 动态调整的条件下,

收稿日期: 2011-07-17; **修回日期:** 2011-08-20 **基金项目:** 国家“973”计划资助项目(2007CB307105);国家自然科学基金资助项目(60932005)

作者简介: 樊帅(1983-),男,山东淄博人,博士研究生,主要研究方向为无线多跳网络传输调度、跨层优化(fans05@mails.tsinghua.edu.cn);张林(1975-),男,辽宁大连人,副教授,博士,主要研究方向为无线网络以及无线传感网的各个层面;王耀希(1954-),男,云南个旧人,研究员,硕士,主要研究方向为信息网络、自动控制和项目管理;任勇(1963-),男,教授,博士,主要研究方向为无线网络以及信息共享网络等。

利用位势博弈理论对传输调度问题进行建模,提出基于物理干扰模型的传输调度算法。通过设计合适的位势函数,使得纳什均衡点(NE)的存在性和收敛性都得到保证。同时,每个参与者(即每条链路)在最小化自己支付的同时,使全局函数达到最优。

1 博弈和位势博弈

1.1 博弈论简介

博弈论(game theory)是研究多个个体或团队之间在特定条件的对局中,利用相关方的策略实施对应的策略的学科,有时也称为对策论,或者赛局理论。

一个标准的博弈由多个要素构成,包括参与者(players)、策略(strategies)、收益(payoffs,或称为支付),可以用一个三元组 $\Gamma = \langle N, S, u \rangle$ 来表示。参与者是指作决策的个体,每个参与者的目标是通过选择自己的行动来最大化(最小化)自身的收益(支付)。假设博弈中有 n 个参与者,则 $N = \{1, 2, \dots, n\}$ 。参与者 i 的策略空间为 S_i ,它表示参与者 i 的可行策略的集合 $S_i = \{s_i\}$ 。用 S_{-i} 表示除了 i 之外所有其他参与者的策略空间,则 $S = (S_i, S_{-i})$ 。参与者 i 的策略 s_i 是一条规则,它规定了该参与者在博弈的每一个时刻采取的行动。策略组合(strategy profile) s 是策略空间 S 中的元素,记为 $s = (s_1, s_2, \dots, s_n)$,表示参与者每人选择一个策略所组成的一个有序集合。给定策略组合 s ,每个参与者按照自己的策略行动之后,会得到或者失去自己的利益,如公司的利润、通信链路的速率等。在博弈过程中,用收益(支付)函数来对每个参与者的得失进行度量。对于参与者 i 来说,其收益(支付)是策略组合 s 的函数,记为 $u_i(s)$,则可以得到 $u(s) = (u_1(s), u_2(s), \dots, u_n(s))$ 。

纳什均衡是博弈理论中很重要的概念,是博弈过程的稳定状态。策略组合 s^* 是一种纳什均衡,如果对于所有的参与者 $\forall i \in N$,有

$$u_i(s_i^*, s_{-i}^*) \geq u_i(s_i, s_{-i}^*), s_i \in S_i \quad (1)$$

所以,纳什均衡是关于博弈的将会如何进行的一致预测,如果所有参与者预测特定的纳什均衡会出现,那么没有参与者会改变策略,从而使博弈趋于稳定。

1.2 位势博弈

位势博弈(potential game)^[13]是一类策略形式特殊博弈,每一个位势博弈有一个位势函数(potential function)。如果参与者 i 通过单方面的从一个策略改变为另一策略从而获得更大(更小)的收益时,位势函数的值也将有相应的改变。特别的,如果二者相等,则此时的位势博弈称为严格位势博弈。

用 $\Gamma = \langle N, S, u \rangle$ 表示一个具有 n 个参与者的策略博弈。其中参与者 i 的策略空间为 $S_i (S_i \subset S)$,收益函数为 $u_i (u_i \in u)$ 。对于一个普通博弈 $\Gamma = \langle N, S, u \rangle$,如果存在一个函数 $\varphi: S \rightarrow \mathbb{R}$,使得对于 $\forall i \in N, \forall s_{-i} \in S_{-i}$,下式成立:

$$u_i(b, s_{-i}) - u_i(a, s_{-i}) = \varphi(b, s_{-i}) - \varphi(a, s_{-i}), \forall a, b \in S_i \quad (2)$$

则 $\Gamma = \langle N, S, u \rangle$ 称为严格位势博弈,函数 φ 称为严格位势函数。

2 网络和干扰模型

无线多跳网络可以用有向图 $D(V, E)$ 来表示。其中, V 表

示网络中节点的集合, E 表示网络中有向链路的集合。网络中两个节点 v_i 和 v_j 间的距离用 $d(v_i, v_j)$ 表示,它们之间的链路用 $e_{ij} \in E$ 表示。本章使用物理干扰模型来刻画链路之间发生冲突的准则,对无线信道的衰减形式不作任何假设,通过对网络所在物理信道的实际测量或者依据经验得到的任何信道模型都适用于本文论述的调度方法。假设节点 s_i 向节点 r_i 发送数据, r_i 能够接收到的信号功率可以表示为

$$P_r(s_i) = P(s_i) G(s_i, r_i) \quad (3)$$

其中: $G(s_i, r_i)$ 为链路的衰减因子。假设节点 s_j 与节点 s_i 同时进行传输,用 $I_r(s_j)$ 表示节点 r_i 受到 s_j 节点的干扰,则节点 r_i 受到的总干扰 I_r 为网络中所有其他同时传输的节点产生的干扰功率之和,即 $I_r = \sum_{s_j \in V \setminus \{s_i\}} I_r(s_j) G(s_j, r_i)$ 。那么 r_i 能够接收到 s_i 传输的数据,当且仅当

$$\text{SINR}(r_i) = \frac{P_r(s_i)}{N + \sum_{s_j \in V \setminus \{s_i\}} I_r(s_j)} = \frac{P(s_i) G(s_i, r_i)}{N + \sum_{s_j \in V \setminus \{s_i\}} P(s_j) G(s_j, r_i)} \geq \beta \quad (4)$$

其中: β 是正确接收数据的 SINR 门限值。

若考虑链路速率随着 SINR 动态变化,根据香农公式可以得到链路速率为

$$b_{ij} = W \log(1 + \text{SINR}_{ij}) \quad (5)$$

其中: W 为系统带宽, SINR_{ij} 为链路 e_{ij} 接收节点处的信干噪比。传输调度问题的目标是使网络的吞吐量最大,即

$$\max \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \sum_{e_{ij} \in E} x_{ij}^t \times W \log(1 + \text{SINR}_{ij}) \quad (6)$$

由于目标函数的非凸特性,使得问题难以求解。下面就利用位势博弈对调度问题进行建模。

3 传输调度问题的位势博弈建模

如果要利用位势博弈好的性质来解决传输调度问题,需要设计合适的位势函数。由于拥塞博弈可以很好地对资源竞争问题建模,本文借助拥塞博弈的思想,对其进行扩展,从而构造出合适的位势函数。

拥塞博弈是一类策略博弈 $\Gamma = \langle N, S, u \rangle$,其中 $N = \{1, 2, \dots, n\}$ 表示参与者的集合, $R = 1, 2, \dots, m$ 表示资源的集合, $S_i \subset S$ 是参与者 i 的策略空间。由于每个参与者都要竞争 R 中的资源,那么对于每个资源来说,参与者 i 有两种策略,即使用和不使用。 u_i 是参与者 i 的收益函数,与参与者使用的资源相关。定义参与者 i 与资源 $r (r \in R)$ 相关的收益函数为 u_i^r 。 u_i^r 是使用资源 r 的所有参与者的数目的函数。博弈中的每个参与者的目标就是最大化(最小化)它的总的收益函数,即关于它的策略中使用的所有资源的收益的总和。用 $s = (s_1, s_2, \dots, s_n)$ 表示博弈中所有参与者的一个策略组合,其中 $s_i \in S_i$ 。则每个参与者 i 的收益函数可以表示为

$$u_i(s) = \sum_{r \in s_i} u_i^r(s) \quad (7)$$

根据 Rosenthal 位势函数,可以得到此博弈的位势函数为

$$\varphi(s) = \sum_{r \in R} \sum_{i=1}^{n_r(s)} u^r(i) = \sum_{i=1}^n \sum_{r \in s_i} u^r(\sigma_i^r(s)) \quad (8)$$

其中: $n_r^r(s)$ 表示使用资源 r 的参与者的数目。

在 TDMA 传输调度问题中,每个数据帧的时隙可以看成博弈参与者使用的资源,所有的参与者被调度在相应的时隙进

行传输。如果将该调度问题建模为拥塞博弈,则在任意的时隙,每个参与者的收益与此时隙内同时传输的参与者的个数有关。然而实际场景中,每个参与者的收益为其链路速率,与它的接收节点处的信干噪比有关,也就是与它所在时隙内的总干扰量有关,传统的拥塞博弈的模型不再适用。为了克服传统拥塞博弈的弊端,将资源的概念进行扩展。

在无线通信系统中,时间、频率和空间都可以看做是用户可以使用的资源。由于假设所有的用户使用相同的频带,所以在这里不考虑频率资源的使用。由于空间中干扰与物理信道的状况有关,同时也与其他干扰节点的空间位置有关,因此可以将不同的干扰链路看做是不同的空间资源。所以在本文的博弈模型中,可以将资源看做是时间和空间的组合。基于将资源扩展为时间和空间组合的思想,首先分析在这种扩展资源下的拥塞博弈方法,然后根据该博弈方法给出位势博弈的模型。

将网络中所有需要调度的链路视为博弈的参与者。假设网络中有 n 条链路,则参与者的集合为 $N = \{1, 2, \dots, n\}$ 。假设一个数据帧有 t 个时隙,即时隙的集合为 $T = \{1, 2, \dots, t\}$ 。在物理干扰模型下,由于任何链路的数据发送都会对其他链路产生一定的干扰,所以将链路对与时隙的组合定义为一个资源。即 $\forall e_i, e_j \in E, t \in T, (i, j, t)$ 为一个资源。那么所有资源的集合为 $R = \{(i, j, t) : i, j \in E, i \neq j, t \in T\}$, 其中 (i, j) 为相互干扰的链路对。假设每个参与者可以从每个数据帧的 t 个时隙中选择一个进行传输,那么它的策略空间可以表示为

$$S_i = \{(i, j, t) : \forall j \in N, j \neq i, t \in T\} \quad (9)$$

为了表述方便,用 $t(s_i)$ 表示参与者 i 使用策略 s_i 时选择的时隙,即资源 (i, j, t) 中的元素 t 。在这个博弈中,当参与者使用资源 (i, j, t) 时,会得到关于此资源的一个收益 $u^{(i, j, t)}$ ($\sigma^{(i, j, t)}$)。其中, $\sigma^{(i, j, t)}$ 表示使用资源 (i, j, t) 的参与者数目(由于对每个资源 (i, j, t) 的使用都是成对的,所以 $\sigma^{(i, j, t)} = 0$ 对应两者不干扰, $\sigma^{(i, j, t)} = 2$ 对应两者干扰)。对于策略组合 $s = (s_1, s_2, \dots, s_n)$, 参与者 i 的总收益为

$$u_i(s) = \sum_{(i, j, t) \in s_i} u^{(i, j, t)}(s) = \sum_{j \in N, j \neq i} u^{(i, j, t(s_i))}(\sigma^{(i, j, t(s_i))}(s)) \quad (10)$$

其中: $\sigma^{(i, j, t(s_i))}(s)$ 表示在策略组合 s 的条件下,使用资源 $(i, j, t(s_i))$ 的参与者的个数。在这个收益函数下,博弈中的每个参与者将会选择自己的策略,使得自己的收益最大。

下面分析在传输调度问题中收益函数 $u_i(s)$ 的具体实现形式。当两个参与者同时使用资源 (i, j, t) 时,它们之间会产生干扰。定义它们之间的干扰量为使用该资源时的收益。由于干扰越大,链路速率越低,网络吞吐量越小,因此这个干扰量应该是参与者使用资源 (i, j, t) 的一种支付。下面的论述中,将收益函数称为支付函数。参与者选择使自己的支付变小的策略。假设参与者 i 的发送节点和接收节点分别为 s_j 与 r_i , 发送功率为 $P(s_i)$; 参与者 j 的发送节点和接收节点分别为 s_j 与 r_j , 发送功率为 $P(s_j)$, 根据式(3), 可以得到使用资源 (i, j, t) 时的支付为

$$u^{(i, j, t)}(k) = \begin{cases} P(s_j)G(s_j, r_i) & k=2 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (11)$$

将式(11)代入式(10),可以得到参与者 i 在策略组合 s 下的总支付为

$$u_i(s) = \sum_{j \in N, j \neq i} u^{(i, j, t(s_i))}(\sigma^{(i, j, t(s_i))}(s)) =$$

$$\sum_{j \neq i, t(s_j) = t(s_i)} u^{(i, j, t(s_i))}(2) = \sum_{j \neq i, t(s_j) = t(s_i)} P(s_j)G(s_j, r_i) \quad (12)$$

将式(12)代入式(8),可以得到

$$\begin{aligned} \varphi(s) &= \sum_{(i, j, t) \in R} \sum_{k=1}^{\sigma^{(i, j, t)}(s)} u^{(i, j, t)}(k) = \\ &= \sum_{i=1}^n \sum_{j \neq i} \sum_{t(s_j) = t(s_i)} u^{(i, j, t)}(2) = \\ &= \sum_{i=1}^n \sum_{j \neq i} P(s_j)G(s_j, r_i) \end{aligned} \quad (13)$$

根据式(6),本文的目标是设计合适的调度策略,使得网络的吞吐量最大,即单位时间内所有链路的速率之和最大。由于链路速率与该链路的 SINR 有关,因此可以通过减少网络中的干扰来提高链路的速率,从而提高网络的吞吐量。式(13)给出的位势函数恰好是网络中所有干扰的总和。

通过上面的分析,给出物理干扰模型下传输调度问题的严格位势博弈模型 $\Gamma = \langle N, S, u \rangle$ 如下:

a) N : 参与者集合,若网络中参与调度的链路数为 n , 则 $N = \{1, 2, \dots, n\}$ 。

b) R : 资源集合。将每一对参与者与时隙的组合定义为一个资源: $\forall i, j \in E, t \in T, (i, j, t)$ 为一个资源。资源集合可以记为

$$R = \{(i, j, t) : i, j \in E, i \neq j, t \in T\}$$

c) S : 策略空间。对于某一个策略组合 $s \in S$, 可以表示为 $s = (s_1, s_2, \dots, s_n)$ 。其中, $s_i \in S_i$, S_i 是用户 i 的策略空间。

$$S_i = \{(i, j, t) : \forall j \in N, j \neq i, t \in T\}$$

d) u : 参与者的支付函数,若用户 i 的支付函数为 u_i , 则 $u = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ 。在某一策略组合中 $s \in S$ 条件下, u_i 为

$$u_i(s) = \sum_{j \neq i, t(s_j) = t(s_i)} P(s_j)G(s_j, r_i)$$

e) 定义位势函数 φ : 此博弈的全局优化函数,在某一策略组合中 $s \in S$ 条件下,其定义为

$$\varphi(s) = \sum_{i=1}^n \sum_{j \neq i} P(s_j)G(s_j, r_i)$$

4 收敛性分析

第 3 章提出了基于位势博弈的传输调度模型 $\Gamma = \langle N, S, u \rangle$, 给出了博弈的每个参与者的支付函数,以及整个网络的全局位势函数。设计的目标是每个参与者(参与调度的链路)通过一定的反应对策(response dynamics)选择自己的策略,即选择合适的时隙进行传输,最小化自己的支付。由于位势博弈的性质,参与者最小化自己的支付的同时,自然地带来全局位势函数值的最小化。本章将分析该博弈的收敛性,并分析博弈的参与者如何选择自己的策略使得自己的收益最小化的同时,系统收敛于相应的纳什均衡点 NE,从而使得网络中的总干扰最小,最大化网络的吞吐量。

对于位势博弈,有以下几个性质^[14]:

性质 1 所有的位势博弈具有至少一个纳什均衡点(NE)。

性质 2 对于位势博弈 $\Gamma = \langle N, S, u \rangle$, 假设其位势函数为 φ 。 φ 的全局最优解为位势博弈 $\Gamma = \langle N, S, u \rangle$ 的纳什均衡点。

性质 3 每一个严格位势博弈具有有限改进特性。

根据性质 1, 该博弈存在至少一个 NE。由性质 2 可知, 该

NE 是位势函数的局部最优点。性质 3 可以保证,不管博弈的初始状态如何,沿着博弈的改进路径,参与者采取合适的对策,最终会收敛到纳什均衡点。

定义参与者 i 可以采取的对策为一映射 $d_i:S \rightarrow S_i$,常用的对策主要有以下几种^[15]:

a) 最优响应对策

如果对策 d_i 是最优响应对策,则参与者 i 在对策 d_i 下,会在博弈过程的每一步选择最小化自己的支付函数 u_i 的策略。对 $\forall a \in S$,有

$$d_i(a) = \arg \min_{a_i \in S_i} u_i(a_i, a_{-i})$$

其中: $a = (a_i, a_{-i})$ 。

b) 较优响应对策

如果对策 d_i 是较优响应对策,则参与者 i 在对策 d_i 下,会在博弈过程的每一步选择使自己的支付函数 u_i 变小的策略。对 $\forall a \in S$,有

$$d_i(a) \in \{b_i \in S_i : u_i(b_i, a_{-i}) > u_i(a_i, a_{-i})\} \tag{14}$$

其中: $a = (a_i, a_{-i})$ 。

c) 随机较优响应对策

如果对策 d_i 是随机较优响应对策,则参与者 i 在对策 d_i 下,会为自己策略空间中的每个策略设定一个概率,在博弈过程的每一步按照概率选取一个策略,如果该策略自己的支付函数 u_i 变小,则执行该策略;否则,保持策略不变。

d) 智能随机较优响应对策

如果对策 d_i 是智能随机较优响应对策,则参与者 i 在对策 d_i 下,首先寻找较优策略子集,在这个子集中的每个策略会使该参与者的支付变小。然后为较优策略子集中的每个策略设定一个概率,在博弈过程的每一步按照概率选取一个策略。

当博弈中各个参与者异步采取对策时,最优响应对策和较优响应对策会使博弈很快收敛到 NE。然而,本章讨论的调度方法是基于 TDMA 的,每个参与者在数据帧的开始阶段同时进行决策,进而同时选择合适的时隙。在同步的条件下,最优响应对策和较有响应对策可能不会收敛到 NE。由于智能随机较优响应对策的收敛速度要大于随机较优响应对策,所以在本文提出的传输调度算法中,参与者采用智能随机较优响应对策来选择自己的策略。

在智能随机较优对策下,本文提出的传输调度算法的伪代码如下所示:

```
t = 0;
while i = 1 到 n do
    链路 i 随机选择其对策  $a_i \in S_i$ ;
    根据接收信号强度得到链路 i 的支付函数  $u_i(a_i, a_{-i})$ ;
end
while t = 1 到 T do
    while i = 1 到 n do
        链路 i 按照式 (14) 找到其较优策略子集;
        为较优策略子集中的每个策略设定一个概率,并且按照概率从中选取策略  $a_i$ ;
    end
end
```

在该算法中,对于每个时隙的每条链路来说,计算的复杂度体现在寻找较优策略子集的过程中。由于要遍历该链路的策略集,所以此过程的复杂度为 T 。故算法总的算法复杂度为 nT^2 ,其中 n 为网络中链路的个数, T 为数据帧中时隙的个数。

5 仿真与分析

本章使用 MATLAB 平台工具,利用蒙特卡洛方法对文中基于位势博弈的算法进行计算机仿真,验证所提出的调度算法的性能,主要从吞吐量性能、收敛速度、数据帧长度三方面来考虑。

5.1 仿真场景

无线节点均匀地分布在 $350\text{ m} \times 350\text{ m}$ 的方形区域中,相邻节点的平均距离为 70 m 。不失一般性,假设所有节点使用相同的发送功率 0 dBm 。背景噪声功率 $N = -90\text{ dBm}$,信干噪比门限为 $\beta = 10$ 。假设每个数据帧的时隙数为 T ,从方形区域中随机选择 n 个通信链路进行仿真。由于考虑物理干扰模型,假设信道为瑞利(Rayleigh)衰落,链路 e_{ij} 的信道增益 G_{ij} 可以建模为独立的零均值复高斯随机变量,并有 $E(|G_{ij}|^2) = d_{ij}^{-\alpha}$,路径衰减因子 α 的取值为 4。每条链路根据式 (5) 来计算链路速率,其中信道带宽 W 归一化为 1。

5.2 吞吐量分析

图 1 比较了调度算法的最优解与位势博弈算法的吞吐量,其中最优解是使用穷举的方式求得。从图 1 中可以看出,两者的性能比较接近,位势博弈算法具有较好的吞吐量性能。随着网络中通信连路数量的增多,当链路数目大于时隙数时,两者开始出现较小差距。这是因为位势博弈的优化目标是最小化网络中的干扰量,与最小化链路速率之和之间存在略微不同。

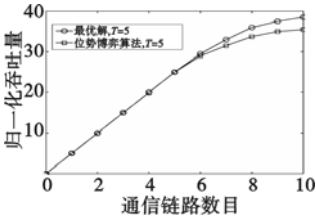


图1 算法吞吐量分析

5.3 收敛特性分析

图 2 显示了几种相应对策下算法的收敛情况。从图 2 中可以看出,最优响应对策具有最快的收敛速度,然而存在不收敛的情况。此时算法在两个状态之间振荡,大大影响了网络的吞吐量。随机较优响应对策和智能随机较优对策都能够收敛到 NE,但是智能随机较优响应的收敛速度较快。所以,本文提出的基于位势博弈的算法应该采用智能随机较优响应对策。

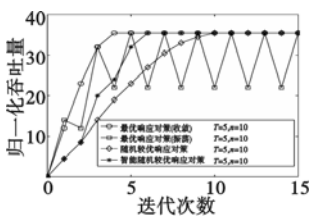


图2 不同响应对策下的收敛性分析

5.4 数据帧时隙数分析

图 3 显示了一个数据帧的时隙数 T 对网络吞吐量的影响。从图中可以看出,当链路个数一定的情况下(即网络规模一定),选取不同的时隙数时,网络性能有较大不同。如果时隙数过大,如图 3 中的 $T = 15$,每个时隙分配的链路数少,信道利用率低,从而使网络的吞吐量下降。如果时隙数过少,那么在每个

时隙发送数据的链路过多,从而使网络中的干扰量增大,同样使网络中的吞吐量下降。因此,在实际的协议设计过程中,根据具体的网络规模需要合理地设计数据帧时隙数的取值。

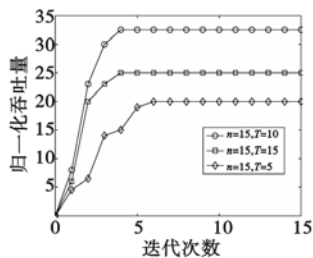


图3 数据帧时隙数对吞吐量的影响

6 结束语

本文考虑链路速率随着 SINR 动态变化的场景,在物理干扰模型下提出了基于位势博弈的传输调度方法。通过设计合理的位势函数、每个参与者的支付函数以及相应对策,构造了传输调度问题的位势博弈模型。在这个博弈中,每个参与者通过最小化自己的支付,使全局函数达到最优,即全网的干扰量达到最小,从而提高网络的吞吐量。仿真结果表明,此传输调度算法与最优算法的性能较为接近,并且有较快的收敛速度,具有较好的性能。

参考文献:

[1] 郑少仁,王海涛,赵志峰,等. Ad hoc 网络技术[M]. 北京:人民邮电出版社, 2005.

[2] MURTHY C, MANOJ B. Ad hoc wireless networks: architectures and protocols [M]. Upper Saddle River;Prentice Hall PTR, 2004.

[3] KUMAR S, RAGHAVAN V, DENG J. Medium access control protocols for Ad hoc wireless networks: a survey[J]. Ad hoc Networks, 2006,4(3):326-358.

[4] TOH C. Ad hoc wireless networks: protocols and systems[M]. Upper Saddle River;Prentice Hall PTR, 2001.

(上接第 1010 页)

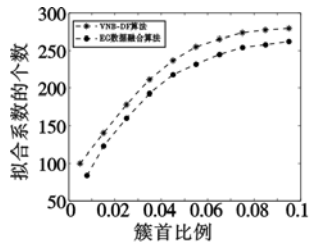


图4 拟合系数个数与簇首比例的关系

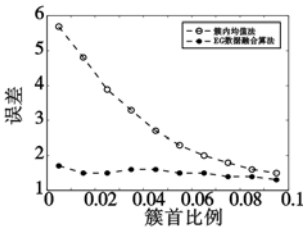


图5 误差与簇首比例的关系

参考文献:

[1] 马琦,张记龙,王志斌. 无线传感器网络簇内自适应融合算法研究[J]. 计算机应用研究, 2009,26(7):2502-2503,2507.

[2] LING Qing, FU Yin-fei, TIAN Zhi. Localized sensor management for multi-target tracking in wireless sensor networks[J]. Information Fusion, 2011,12(3):194-201.

[3] COLLETT M A, SALTER M J, ADAMSON D B. Data fusion for wireless sensor networks: an assisted living case-study[J]. IET Digest, 2009(12725):1-2.

[4] NAKAMURA E F, LOUREIRO A A F, FRERY A C. Information fusion for wireless sensor networks: methods, models, and classifications

[5] AKYILDIZ I, MCNAIR J, MARTORELL L, et al. Medium access control protocols for multimedia traffic in wireless networks [J]. IEEE Trans on Network, 1999,13(4):39-47.

[6] BLOUGH D, RESTA G, SANTI P. Approximation algorithms for wireless link scheduling with SINR-based interference [J]. IEEE/ACM Trans on Networking, 2010,18(6):1701-1712.

[7] KARNIK A, IYER A, ROSENBERG C. Throughput-optimal configuration of fixed wireless networks [J]. IEEE/ACM Trans on Networking, 2008,16(5):1161-1174.

[8] AKYILDIZ I, WANG X, WANG W. Wireless mesh networks: a survey [J]. Computer networks, 2005,47(4):445-487.

[9] GUPTA P, KUMAR P. The capacity of wireless networks [J]. IEEE Trans on Information Theory, 2000,46(2):388-404.

[10] KUMAR V, MARATHE M, PARTHASATHY S, et al. End-to-end packet-scheduling in wireless Ad hoc networks [C]// Proc of the 5th Annual ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms. New York: ACM Press, 2004:1021-1030.

[11] MOSCIBRODA T, WATTENHOFER T. Coloring unstructured radio networks [C]//Proc of the 7th Annual ACM Symposium on Parallelism in Algorithms and Architectures. New York: ACM Press, 2005:39-48.

[12] MAHESHWARI R, JAIN S, DAS S. A measurement study of interference modeling and scheduling in low-power wireless networks [C]//Proc of the 6th ACM Conference on Embedded Network Sensor Systems. New York: ACM Press, 2008:141-154.

[13] MONDERER D, SHAPLEY L. Potential games [J]. Games and Economic Behavior, 1996,14(1):124-143.

[14] CHRISTODOULOU G, MIRROKNI V, SIDIROPOULOS A. Convergence and approximation in potential games [C]//Proc of the 23rd International Symposium on Theoretical Aspects of Computer Science. [S.l.]:Springer Press, 2006:349-360.

[15] MORRIS S, UI T. Best response equivalence[J]. Games and Economic Behavior, 2004,49(2):260-287.

[J]. ACM Computing Surveys, 2007,39(3):1-55.

[5] 郭建全. 大规模无线传感器/执行器网络数据收集研究[D]. 北京:清华大学, 2010.

[6] GUO Le-jiang, WANG Bing-wen, WANG Wei, et al. Energy function analysis and optimized computation based on hopfield neural network for wireless sensor network [J]. Information Technology Journal, 2011,10(6):1208-1214.

[7] LI Feng-rong, ZHANG Bao-xian, ZHENG Jun. Geographic hole-by-passing forwarding protocol for wireless sensor networks [J]. IET Commun, 2011,5(6):737-744.

[8] 曾清红, 卢德唐. 基于移动拟合最小二乘法的曲线曲面拟合[J]. 工程图学学报, 2004,1(3):84-87.

[9] XU Jian, LI Jian-xun, XU Sheng. Analysis of quantization noise and state estimation with quantized measurements[J]. Journal of Control Theory and Applications, 2011,9(1):66-75.

[10] 徐文君. 无线传感器网络跨层协议研究[D]. 武汉:武汉理工大学, 2007.

[11] 崔艳荣, 曹加恒, 何宁, 等. 无线传感器网络中数据查询处理算法研究[J]. 计算机应用研究, 2008,25(5):1511-1512.

[12] LI Xiao-fang, XU Li-zhong, WANG Hui-bin, et al. A differential evolution-based routing algorithm for environmental monitoring wireless sensor networks[J]. Sensors, 2010,10(6):5425-5442.