

## 基于Stackelberg博弈的虚拟化无线传感网络资源分配策略

王汝言 李宏娟\* 吴大鹏

(重庆邮电大学通信与信息工程学院 重庆 400065)  
(重庆高校市级光通信与网络重点实验室 重庆 400065)

**摘要:** 虚拟化技术可有效缓解当前无线传感网络(WSN)中资源利用率较低、服务不灵活的问题。针对虚拟化WSN中的资源竞争问题, 该文提出一种基于Stackelberg博弈的多任务资源分配策略。依据所承载业务的不同服务质量(QoS)需求, 量化多个虚拟传感网络请求(VSNRs)的重要程度, 进而, 利用分布式迭代方法, 获取WSN的最优价格策略和VSNRs的最优资源需求量, 最后, 根据纳什均衡所确定的最优价格、最优资源分配量, 对多个VSNRs分配资源。仿真结果表明, 所提策略不仅能满足用户的多样化需求, 而且提升了节点和链路资源利用率。

**关键词:** 无线传感网络; 虚拟化; 资源分配; 博弈论

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2019)02-0377-08

DOI: 10.11999/JEIT180277

## Stackelberg Game-based Resource Allocation Strategy in Virtualized Wireless Sensor Network

WANG Ruyan LI Hongjuan WU Dapeng

(School of Telecommunication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

(Optical Communication and Network Key Laboratory of Chongqing, Chongqing 400065, China)

**Abstract:** Virtualization is a new technology that can effectively solve the low resource utilization and service inflexibility problem in the current Wireless Sensor Network (WSN). For the resource competition problem in virtualized WSN, a multi-task resource allocation strategy based on Stackelberg game is proposed. According to the different Quality of Service (QoS) requirements of the business carried by Virtual Sensor Network Request (VSNR), the importance of multiple VSNRs is quantified. Then, the optimal price of WSN and the optimal resource requirements of VSNRs are obtained by using distributed iteration method. Finally, the resource corresponding to multiple VSNRs is acquired according to optimal price and optimal resource allocation determined by Nash equilibrium. The simulation results show that the proposed strategy can not only meet the diversified needs of users, but also improve the resource utilization of nodes and links.

**Key words:** Wireless Sensor Network (WSN); Virtualization; Resource allocation; Game theory

### 1 引言

随着物联网的蓬勃发展, 作为其终端末梢网络的无线传感网络(Wireless Sensor Network, WSN)得到前所未有的关注<sup>[1]</sup>。WSN由具有感知、计算和通信能力的节点组成, 其被广泛应用于各种领域, 包括环境监控<sup>[2]</sup>、智能交通<sup>[3]</sup>、智慧医疗<sup>[4]</sup>和

工业应用<sup>[5]</sup>等。WSN通常面向特定领域和既定任务, 其任务的实现与WSN资源的部署耦合关系紧密<sup>[6]</sup>, 导致任务执行的灵活性与可扩展性受到极大的限制。

将虚拟化技术引入WSN网络, 可有效缓解当前WSN网络中资源利用率较低、服务灵活性较差的问题<sup>[7]</sup>。利用虚拟化的思想, 可将给定区域的所有传感器节点抽象为单个通用基础设施, 充分发挥资源共享的优势。根据用户的不同服务质量(Quality of Service, QoS), 当多个任务并发执行时, 对传感器节点进行灵活分组与运用, 组建不同的虚拟传感网络请求(Virtual Sensor Network Request, VSNR), 从而最大限度地复用传感资源, 显著提

收稿日期: 2018-03-23; 改回日期: 2018-07-25; 网络出版: 2018-08-06

\*通信作者: 李宏娟 ilihj@foxmail.com

基金项目: 国家自然科学基金(61771082), 重庆市高校创新团队建设计划资助项目(CXTDX201601020)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61771082), The Chongqing Funded Project of Chongqing University Innovation Team Construction Plan (CXTDX201601020)

升WSN的灵活性与可扩展性。区别于传统的WSN, 虚拟化WSN将提供网络服务的角色解耦为无线传感网络基础设施提供者(Wireless Sensor Network Infrastructure Provider, WSNInP)和虚拟传感网服务提供者(Virtual Sensor Network Service Provider, VSNSP), 其中WSNInP负责部署、管理和维护WSN, 而VSNSP向WSNInP租赁传感资源并创建VSNR。VSNR需映射至物理传感网络才能为用户提供服务, 但是不同VSNSPs之间存在竞争关系, 在资源竞争过程中各个VSNSP无法获知彼此的资源需求, 因此多个VSNSPs之间的资源竞争过程属于不完全信息动态博弈过程。如何对具有相同资源需求的VSNRs分配资源, 最大化资源供需双方的利益, 对于提升网络资源利用率、满足用户服务体验至关重要。

针对WSN中的资源分配问题, 国内外研究人员进行了广泛深入的研究。为了满足多种并发任务的差异化QoS需求, 文献[8]提出一种无线多媒体传感网中QoS感知的高效资源分配机制, 引入穷举搜索方法以获得带有实时性业务需求的最优调度序列。但是, 该机制并没有使用虚拟化技术充分利用传感网的物理资源, 并且缺乏对收益问题的分析。文献[9]提出一种虚拟化传感网中的最优资源分配机制, 首先建立基于混合整数线性规划的优化框架, 旨在最大化共享物理资源的并发任务数量。但是, 该机制没有考虑多种任务的异构性以及不同任务对QoS需求的差异性。文献[10]提出一种虚拟化传感网中联合接纳控制和网络切片的方案, 主要解决任务的接纳控制问题以及为接纳的任务分配所需资源问题。但是, 该机制并没有讨论如何划分网络切片来为差异化任务提供服务, 此外, 该机制的资源分配方式灵活性不高, 不适用于高动态性的虚拟化传感网资源分配过程。

本文提出一种基于Stackelberg博弈的虚拟化WSN资源分配策略, 从VSNRs所承载任务的特性出发, 结合相应业务的QoS需求, 量化多个VSNRs的重要程度。考虑节点的处理速度、缓存、能量以及链路带宽等资源状况, 建立资源提供者WSNInP和基于不完全信息的资源需求者VSNSPs之间的单主多从Stackelberg博弈模型, 求解纳什均衡得到双方各自最优的策略。

## 2 网络模型

如图1所示, WSN的物理网络用无向图 $G^S = (N^S, L^S)$ 表示, 其中 $N^S$ 表示WSN的传感节点,  $L^S$ 表示WSN中传感节点对之间的链路。WSN中的信息传送到汇聚节点后再传送到控制器, 由控制器对

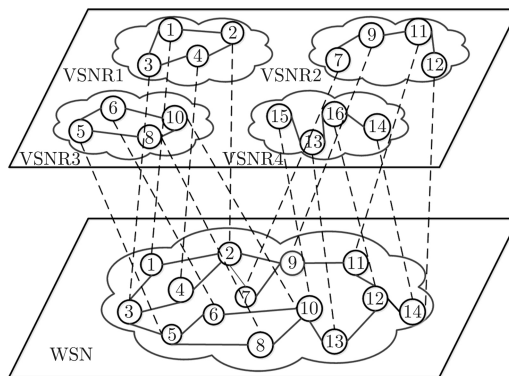


图1 虚拟化无线传感网络示意图

网络中的资源进行控制和管理。VSNR用有向图 $G_{Ta}^V = (N^V, L^V)$ 表示, 其中 $Ta = \{Ta_1, Ta_2, \dots, Ta_n\}$ 表示VSNRs承载的任务,  $N^V$ 和 $L^V$ 表示虚拟传感节点和虚拟链路。不同的VSNRs对应不同的业务, 具有不同的重要程度, 也有不同的资源需求。

VSNR到WSN物理网络的映射, 即将虚拟传感节点和虚拟链路映射到物理传感节点和物理链路, 并且满足虚拟传感节点和虚拟链路的资源需求, 同时满足业务的QoS。WSN虚拟化的本质在于能够充分利用已部署的WSN资源, 从而提高资源的利用率, 减少资源的冗余部署。因此在虚拟化过程中, 针对并发的业务请求, VSNRs的映射可能会出现重叠的情况, 即不同的VSNRs可能会映射到相同的WSN物理资源。因此, 如何合理地将VSNRs中的虚拟传感节点和虚拟链路映射到共享的物理传感节点和链路, 从而提高资源利用率减少资源冗余部署至关重要。

## 3 资源分配策略

根据上述分析可知, 当多个VSNRs同时请求WSN资源时, 存在资源竞争问题。因此, 如何合理地分配物理资源, 对网络所承载任务的QoS以及网络整体运行态势有至关重要的影响。

### 3.1 VSNR重要程度感知

不同VSNRs所承载的任务存在差异性, 且不同的任务具有不同的业务形态。因此, 为体现差异化服务, 需准确剖析任务及其所属业务的自身特征及行为属性, 进而将其整合, 量化不同VSNRs所承载任务的重要程度, 并以此为主要依据来优化资源分配过程。

假设当前时刻有 $n$ 个VSNRs, 即 $VSNRs = \{VSNR_1, VSNR_2, \dots, VSNR_n\}$ 同时竞争部分WSN资源, 其所承载的任务分别为 $\{Ta_1, Ta_2, \dots, Ta_n\}$ , 属于任务的业务分别为 $\{Tr_1, Tr_2, \dots, Tr_n\}$ 。

受物联网需求的驱动, 5G将解决多样化应用

场景下差异化性能指标带来的挑战，低时延高可靠是主要应用场景之一，而虚拟化传感网也是物联网中的关键技术。显然，低时延高可靠任务对资源的需求更为迫切，根据上述分析，可给出任务重要程度的量化式，如式(1)所示，其中 $\text{Pr}(\text{Ta}_i)$ 表示任务 $\text{Ta}_i$ 的重要程度量化值， $\text{De}_i$ 和 $\text{Re}_i$ 分别表示任务 $\text{Ta}_i$ 的时效程度和可靠程度。

$$\text{Pr}(\text{Ta}_i) = \exp(\text{De}_i + \text{Re}_i) \quad (1)$$

为了更清晰地体现任务重要程度之间的差异，本文将任务重要程度进行归一化处理，得到归一化任务重要程度量化式，如式(2)所示，其中 $\text{Max}(\exp(\text{De}_i + \text{Re}_i))$ 表示最大的任务重要程度量化值。

$$\text{Pr}^*(\text{Ta}_i) = \frac{\exp(\text{De}_i + \text{Re}_i)}{\text{Max}(\exp(\text{De}_i + \text{Re}_i))} \quad (2)$$

在虚拟化WSN中，业务具有多种类别和多重属性，且多媒体业务逐渐占据主体部分。不同业务有不同的QoS参数要求，实时视频、音频对抖动、时延的要求较高，而普通背景类、交互类业务对分组丢失率要求较高。此外，大量实际测量结果表明多媒体业务流具有普遍的自相似以及长相关特性<sup>[11]</sup>，Hurst参数为表征业务流长相关性与突发性的唯一参数<sup>[12]</sup>，其值为[0, 1]之间的数值，Hurst参数值越接近1，业务流的突发性越强，其对网络性能的影响越明显。高突发性业务一般都是多媒体业务，其对资源需求更加迫切，因此突发性较高的业务其服务优先级相对较高，业务重要程度量化值相对较大。

根据上述分析，可给出业务流 $\text{Tr}_i$ 的属性值，如式(3)所示， $\text{los}_i$ 、 $\text{Dv}_i$ 、 $\text{Td}_i$ 分别表示业务流 $\text{Tr}_i$ 的分组丢失率、时延抖动和最大容忍时延。

$$\text{Attr}(\text{Tr}_i) = \frac{-\ln(\text{los}_i)}{\text{Dv}_i \cdot \text{Td}_i} \quad (3)$$

此外，结合业务流 $\text{Tr}_i$ 的突发特性，可得其重要程度量化式，如式(4)所示，其中 $H_i$ 表示业务流 $\text{Tr}_i$ 的Hurst参数值， $\text{Pr}^*(\text{Tr}_i)$ 表示业务流 $\text{Tr}_i$ 的归一化重要程度量化值。

$$\text{Pr}^*(\text{Tr}_i) = \frac{\text{Attr}(\text{Tr}_i)}{\text{Max}(\text{Attr}(\text{Tr}_i))} \cdot \exp\left(-\frac{1}{H_i}\right) \quad (4)$$

将上述任务重要程度与业务重要程度的分析量化过程进行整合，可得承载任务的VSNR的归一化重要程度量化式，如式(5)所示。

$$\begin{aligned} \text{Pr}^*(\text{VSNR}_i) &= \log_2\left(1 + \frac{1}{2}(\text{Pr}^*(\text{Ta}_i) + \text{Pr}^*(\text{Tr}_i))\right) \\ &= \log_2\left(1 + \frac{1}{2}\left(\frac{\exp(\text{De}_i + \text{Re}_i)}{\text{Max}(\exp(\text{De}_i + \text{Re}_i))}\right.\right. \\ &\quad \left.\left. + \frac{\text{Attr}(\text{Tr}_i)}{\text{Max}(\text{Attr}(\text{Tr}_i))} \cdot \exp\left(-\frac{1}{H_i}\right)\right)\right) \quad (5) \end{aligned}$$

对于任务执行时间存在交叠并接受的VSNRs，根据式(5)量化其重要程度值，并以此为主要依据优化资源分配过程。

### 3.2 基于Stackelberg博弈的资源分配

虚拟化WSN中利益博弈涉及WSNInP和VSNSP，WSNInP需制定合理的价格以吸引VSNSPs购买其资源，进而获得收益，而相互之间存在竞争关系的VSNSPs需确定从WSNInP购买的资源数量，以最大化自己的收益，同时需考虑竞争对手的策略。如何合理而高效地分配有限的资源并最大化资源所有者的利益是一个典型的经济学问题，根据上述所描述的WSNInP和VSNSPs之间的资源供需关系中，WSNInP和VSNSPs彼此之间的交互构成了一个典型的Stackelberg博弈，在博弈过程中各自确定最优的策略从而达到均衡是本文的主要研究点。

#### 3.2.1 Stackelberg博弈模型

一般情况下，Stackelberg博弈<sup>[13, 14]</sup>有两类参与者，领导者和跟随者。领导者根据需求作出定价策略，跟随者在领导者的策略下进行非合作博弈确定自己的资源需求策略，以最大化自身的效用。领导者根据跟随者的策略进一步调整他的策略以最大化当前状态下的自身效用，经过多次策略调整后，领导者和跟随者都获得了最优的效用函数，此时博弈达到了均衡状态，称为纳什均衡。在这种状态下，任何一个参与者都不会再改变自身的策略，因为更改策略并不会获得比当前策略更高的效益。

**领导者：**在WSN虚拟化过程中，把WSNInP定义为领导者。WSNInP根据拥有的资源给出定价策略，提供VSNSPs所需的资源以满足用户的业务需求，其具体的资源控制与管理过程由控制器执行。价格是调节资源供需矛盾的主要手段和方式，因此WSNInP的价格策略会影响VSNSPs的资源需求。

**跟随者：**把每一个VSNSP定义为跟随者。VSNSPs是资源的需求者，其根据WSNInP的价格策略和自身的效用函数调整资源需求策略。

**策略：**对于WSNInP而言，其策略就是公布自己的资源价格，比如带宽、处理速度、缓存资源和能量的单价。对于VSNSPs而言，其策略就是向WSNInP请求资源及其大小，具体包括传感节点或链路的资源。

设 $p$ 为WSNInP给出的资源单价， $q_i$ 为第 $i$ 个VSNSP的资源需求量， $q = (q_1, q_2, \dots, q_n)$ 为 $n$ 个VSNSPs的资源需求组合，则 $n$ 个VSNSPs的资源需求总量可表示为 $Q = \sum_{i=1}^n q_i$ 。WSNInP和VSNSPs之间的单主多从式Stackelberg博弈均衡解的获取分两个阶段完成。在第1阶段，WSNInP首先声明其价

格策略  $p$ ，并将价格策略公告给所有的VSNP<sub>s</sub>。VSNP<sub>s</sub>根据收到的价格策略  $p$ ，确定自己的资源需求策略  $q$ 。在第2阶段，WSNInP获知VSNP<sub>s</sub>的资源需求后，又会调整自己的价格来进一步获取最优的效用。

### 3.2.2 效用函数

效用函数用来直观描述博弈参与者的利益，同时体现了博弈参与者对策略的满意度。

(1)VSNP效用函数：VSNP<sub>s</sub>的效用函数由其收益和开销两部分组成，VSNP<sub>s</sub>的收益来自用户，因为它从WSNInP处请求资源为用户提供多样化的服务；VSNP<sub>s</sub>的开销包括从WSNInP请求资源需要支付的费用以及不同业务形态所支付的额外风险费用。对于重要程度较高的业务来说，VSNP<sub>s</sub>需提供更高质量的服务，以满足相应用户的服务需求，其所承担风险更高。对于VSNR<sub>*i*</sub>，其相应服务提供者VSNP<sub>*i*</sub>的效用函数定义为  $F_i(p, q_i, q_{-i})$ ，表达式为

$$F_i(p, q_i, q_{-i}) = U_i(q_i) - P_i(q_i) - Pr_i(q_i) \quad (6)$$

其中， $q_{-i}$ 表示除VSNP<sub>*i*</sub>外其他VSNP<sub>s</sub>的资源需求量， $U_i(q_i)$ 表示VSNP<sub>*i*</sub>在资源需求量为 $q_i$ 时从用户处获取的收益函数， $P_i(q_i)$ 表示VSNP<sub>*i*</sub>得到资源后支付给WSNInP带来的开销函数， $Pr_i(q_i)$ 表示由于该业务的重要程度需求而产生的额外开销函数。

VSNP为用户提供服务获得收益，因此VSNP的收益函数与用户的资源需求量密切相关。本文用对数函数来表示资源需求的收益函数，需求量越大，获得的收益也越多，且收益增速加快，可表示为

$$U_i(q_i) = a \log_2(1 + q_i) \quad (7)$$

其中， $a$ 为[1, 2]之间的数值，与用户QoS需求有关。 $a$ 值越大，表明用户对QoS要求越高，对物理资源的需求越迫切，其给VSNP支付的费用也越多。本文主要探讨实时业务流与非实时业务流，对于不同类别的业务流， $a$ 值具体定义如下：

对于实时业务流，如果分配的资源无法满足用户的实时需求，将导致较差的QoS。设 $q_{th}$ 表示分配的资源量能满足相应服务的阈值，则 $a$ 的取值可表示为

$$a = 1 + \frac{1}{1 + \exp(-q_i/q_{th})} \quad (8)$$

对于非实时业务流，虚拟化传感网采用尽力而为的方式对其进行资源分配，尽可能地分配较多资源来传输业务流，则 $a$ 的取值可表示为

$$a = 2 - \exp(-q_i/q_{th}) \quad (9)$$

VSNP<sub>*i*</sub>根据WSNInP的价格策略 $p$ 调整自己的资源需求，最终选择自己的最优资源需求策略 $q_i^*$ ，从而最大化自身的效用函数，即满足 $\text{Max}\{F_i(p^*, q_i, q_i^*)\}$ ，其中 $p^*$ 和 $q_i^*$ 分别表示博弈中的WSNInP的最优价格策略以及其他VSNP<sub>s</sub>的最优资源需求策略。

从经济学的角度考虑，WSNInP给出的资源单价 $p$ 一般是资源需求总量 $Q$ 的非线性递减函数<sup>[15]</sup>： $p = b/Q$ ，其中 $b$ 为大于零的常量，WSNInP单价越小，VSNP<sub>s</sub>需求量越大。则VSNP<sub>*i*</sub>从WSNInP处购买资源的成本可表示为

$$P_i(q_i) = b/Q \cdot q_i \quad (10)$$

业务重要程度越高，则说明其对资源需求越迫切，因此，会产生更多的由于QoS要求而带来的额外开销。另外，网络中的资源数量是有限的，因此，当用户的资源需求量越大，同时业务重要程度越高时，其给VSNP<sub>*i*</sub>带来的开销也越大。将VSNP<sub>*i*</sub>由于业务重要程度而产生的额外开销函数表示为

$$Pr_i(q_i) = Pr^*(VSNR_i)/(C - q_i) \quad (11)$$

其中， $Pr^*(VSNR_i)$ 表示承载相应任务的VSNR<sub>*i*</sub>重要程度量化值，本文已对VSNR<sub>*i*</sub>重要程度进行了深入分析与推导， $C$ 表示WSNInP对于某种资源所能提供的最大资源量。

根据以上分析，可知VSNP<sub>*i*</sub>的效用函数可表示为

$$F_i(p, q_i, q_{-i}) = a \log_2(1 + q_i) - (b/Q) q_i - \frac{Pr^*(VSNR_i)}{C - q_i} \quad (12)$$

(2)WSNInP效用函数：WSNInP的效用函数等于其销售金额与成本之差，即

$$G(p, q) = pQ - cQ \quad (13)$$

其中， $Q$ 表示VSNP<sub>s</sub>总的资源需求量， $p$ 为价格策略， $c$ 表示WSNInP资源的成本单价。WSNInP的收益不仅受到自身价格策略的影响，还受VSNP<sub>s</sub>的资源需求量的影响。当WSNInP定价过高，导致VSNP<sub>s</sub>资源需求量减少，使得网络中有较多的资源被闲置；当WSNInP定价过低，导致VSNP<sub>s</sub>资源需求量增大，使得整个网络的负载过大影响用户的体验，进而影响收益。因此，在博弈过程中，WSNInP希望制定合理的价格来最大化自身的效用。假设WSNInP的最优价格策略为 $p^*$ ，则其最大效用满足 $\text{Max}\{G(p^*, q^*)\}$ ，其中 $q^*$ 表示所有VSNP<sub>s</sub>的最优资源需求策略，则 $(p^*, q^*)$ 表示单主多从Stackelberg博弈的一个均衡点。

### 3.2.3 VSNSP非合作博弈的纳什均衡点

在VSNSPs非合作博弈问题中，当所有的VSNSPs不再改变自己的策略，且VSNSPs单方面改变自己的策略并不会增加其收益，此时每个VSNSP的效用达到最优，即达到纳什均衡。表示为

$$F_i(p^*, q_i^*, q_{-i}^*) \geq F_i(p^*, q_i, q_{-i}^*) \quad (14)$$

但是并不是每一个非合作博弈都存在纳什均衡解，所以需要证明该纳什均衡是否存在。

**定理 1** 对于给定的WSNInP的价格策略 $p$ ，VSNSP $_i$ 效用函数 $F_i(p, q_i, q_{-i})$ 存在非合作博弈均衡点 $q^*$ 。

**证明** 显然，对于任意VSNSP $_i$ 的资源需求策略 $\{q_i\}$ 是欧几里得空间中的有界闭集，而且VSNSP $_i$ 的效用函数 $F_i$ 在其策略空间上是连续的。下面证明效用函数为凹函数，证明该效用函数为凹函数需求出其2阶偏导，若其2阶偏导恒小于或等于0，则该效用函数为凹函数。

对于任意的VSNSP $_i$ 的效用函数求1阶偏导得

$$\frac{\partial F_i(p, q_i, q_{-i})}{\partial q_i} = \frac{a}{1+q_i} - \frac{b}{Q} - \frac{\text{Pr}^*(\text{VSNR}_i)}{(C-q_i)^2} \quad (15)$$

对于任意的VSNSP $_i$ 的效用函数求2阶偏导得

$$\frac{\partial^2 F_i(p, q_i, q_{-i})}{\partial q_i^2} = -\frac{a}{(1+q_i)^2} - \frac{\text{Pr}^*(\text{VSNR}_i)}{(C-q_i)^3} < 0 \quad (16)$$

可见，任意VSNSP $_i$ 的效用函数是严格凹函数，这确保了纳什均衡的存在性<sup>[16]</sup>。证毕

### 3.2.4 Stackelberg博弈问题的求解

逆向归纳法<sup>[17]</sup>是求解完全信息状态下Stackelberg博弈问题领导者和跟随者最优策略的主要方法，但是该方法需要参与者知道其他所有参与者的相关信息，因此逆向归纳法不适合求解本文的纳什均衡。针对上述问题，本文提出了一种分布式的迭代方法，来获取Stackelberg博弈的纳什均衡解。

假定在 $t$ 时刻WSNInP公布的价格策略为 $p(t)$ ，这时VSNSPs需要调节自身的资源需求策略，使其资源需求策略满足纳什均衡解。VSNSPs的资源需求策略直接决定其效用函数，因此，本文考虑一个简单的动态模型，其中VSNSPs资源需求量的改变率同它的效用函数在自身资源需求处的1阶偏导成正比，即

$$\Delta q_i = \frac{\partial F_i(p, q_i, q_{-i})}{\partial q_i} \quad (17)$$

此外，当前时刻 $t$ 和下一时刻 $t+1$ 的时间间隔内，VSNSP $_i$ 的资源需求策略迭代方程可表示为

$$q_i(t+1) = q_i(t) + \theta_i \Delta q_i \quad (18)$$

其中， $\theta_i > 0$ 表示VSNSP资源需求策略调节步长，其影响达到均衡状态的收敛速度。效用函数是凹函数的特性保证了迭代算法能够收敛到博弈的纳什均衡<sup>[18]</sup>。

在VSNSPs达到纳什均衡后，WSNInP根据用户的资源需求策略分布，通过价格迭代来调节自身的价格，WSNInP价格的变化率通过微观经济学边际效用<sup>[19]</sup>表示。WSNInP的价格迭代方程为

$$p(t+1) = p(t) + \omega \left( \frac{\partial G(p(t), q(t))}{\partial p(t)} \right) \quad (19)$$

其中， $\omega > 0$ 表示WSNInP的价格策略调节步长，其影响达到均衡状态的收敛速度。

WSNInP的边际效用可以通过价格的变化量 $\varepsilon$ 来计算其对效用产生的影响，其基于价格的边际收益可以计算为

$$\frac{\partial G(p(t), q(t))}{\partial p(t)} \approx \frac{G(\dots, p(t)+\varepsilon, \dots) - G(\dots, p(t)-\varepsilon, \dots)}{2\varepsilon} \quad (20)$$

对于整个网络而言，迭代的结果是VSNSPs和WSNInP各自取得最优的资源需求策略 $q^*$ 和价格策略 $p^*$ ，由于VSNSPs和WSNInP都达到了纳什均衡，对于整个两阶段的单主从Stackelberg博弈而言，取得了纳什均衡 $(p^*, q^*)$ 。

整个过程迭代如下：

(1) WSNInP在每一个时刻 $t$ ，根据式(19)和式(20)的边际效用调整自己的价格策略。

(2) VSNSPs得知WSNInP的价格策略后，根据式(17)和式(18)调整自己的资源需求策略，直到自身的效用达到最大值，所有VSNSPs的效用达到均衡为止。

(3) 如果此时WSNInP的效用达到了均衡，则停止迭代。否则在下一个时刻 $t+1$ ，WSNInP根据VSNSPs的资源需求策略调整价格策略，重复步骤(1)。

## 4 数值结果分析

### 4.1 参数设定

本文采用MATLAB仿真平台验证所提策略的有效性，仿真场景中有55个传感节点，博弈过程主要包括WSNInP和VSNSPs之间的博弈以及VSNSPs之间的非合作博弈，分别得到了基于Stackelberg博弈进行资源分配的纳什均衡以及VSNSPs间的非合作博弈均衡。为了验证本文算法的有效性及其优劣性，本文引入传感网资源分配算法CABPA<sup>[20]</sup>及虚拟传感网中的Heuristic<sup>[9]</sup>资源分配算法，并将上述两种算法的收益以及带宽性能与本文虚拟化传感网中基于Stackelberg博弈的资源分配策略(V-SG)进行对比分析。仿真参数设置如表1所示。

表1 仿真参数设置

参数设定	参考数值
仿真区域(m <sup>2</sup> )	50×50
节点数量(个)	55
节点处理速度(bit/s)	16~32
节点存储能力(kb)	4~15
节点能量(J)	2~4
链路带宽(kb/s)	5~30
用户体验常量	1或2
VSNR资源需求策略调节步长	0.1
WSN价格策略调节步长	0.1
最大迭代次数/次	200

4.2 仿真结果分析

图2和图3分别描述了虚拟化前后传感网中节点缓存资源和链路带宽资源的利用率随传感节点数量的变化曲线。由图可知，随着传感节点数量的增多，虚拟化前后WSN中的资源利用率均有所增加，但是虚拟化后的资源利用率始终高于虚拟化前的资源利用率。由于虚拟化技术不仅重用了节点资源，选择节点资源更加充足、能力更强的节点执行多种任务，并且会选择最优的带宽资源分配方案提高资源提供者的利益，从而使得原有的WSN资源得到了更充分的利用，数值结果表明虚拟化后比虚拟化前的节点缓存资源利用率、带宽资源利用率分别提高约23.35%和27.26%。

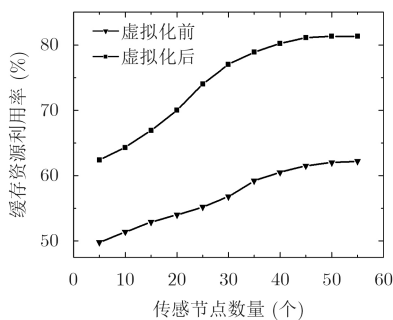


图2 虚拟化前后节点缓存资源利用率

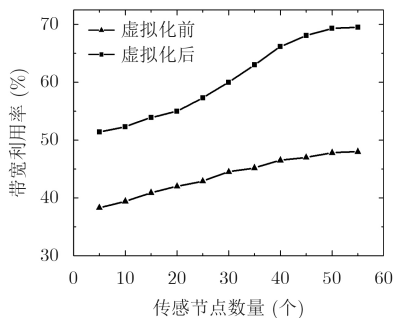


图3 虚拟化前后链路带宽资源利用率

图4描述了不同用户体验即不同 $a$ 值时，VSNSPs的效用函数在迭代过程中呈现出的变化曲线。不同的 $a$ 值使得VSNSPs的效用函数变化不尽相同，由图可知 $a = 1$ 时VSNSP的效用函数值小于 $a = 2$ 时的VSNSP效用函数值。 $a$ 值越大表明用户体验越好，其给VSNSP带来的收益也更大，因此相应的VSNSP效用函数值越大。最终在VSNSPs之间达到纳什均衡时，VSNSPs的效用函数趋于稳定。在迭代次数大约为100时， $a = 1$ 时VSNSP的效用函数达到稳定为0.45， $a = 2$ 时VSNSP的效用函数达到稳定为2.45。

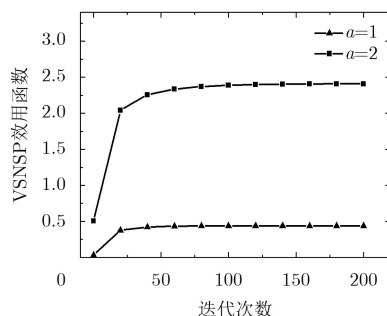


图4 不同 $a$ 值时VSNSP效用函数在迭代过程中的变化

图5描述了虚拟化无线传感网络的Stackelberg博弈的纳什均衡，其中有两个VSNSPs竞争WSNInP资源。在第1阶段，WSNInP给出价格策略，VSNSPs根据其策略给出资源需求策略，由于WSNInP价格的不断提高使得VSNSPs资源需求降低，同时WSNInP效用函数降低。第2阶段WSNInP根据VSNSPs资源需求策略调整价格策略，其价格不断降低，使得VSNSPs资源需求量升高，WSNInP效用函数增大。经过多次博弈后，大约在迭代次数为150时，WSNInP的价格策略和VSNSPs资源需求策略均趋于稳定，WSNInP效用函数也达到稳定。

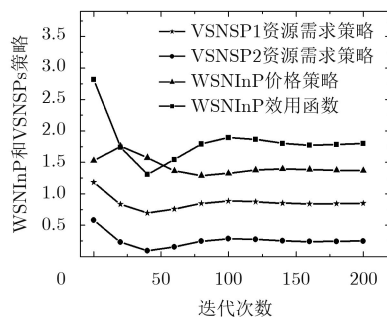


图5 WSNInP与VSNSPs间的纳什均衡

图6描述了3种不同算法的收益随任务数的变化曲线。由图可知，在相同任务数时本文V-SG算法的收益始终高于其它两种算法，其原因在于本文在

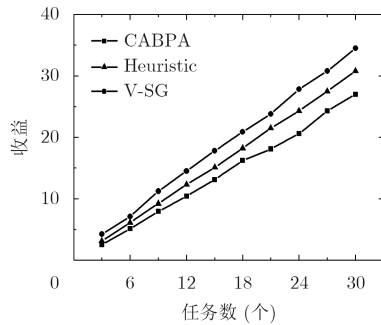


图6 不同任务数产生的收益

资源供需的矛盾关系中采用了Stackelberg博弈论方法，能够最大化资源提供者的利益，而其他两种算法并未充分考虑具有差异性的多任务与物理资源之间的映射问题以及供需关系的动态变化特性。此外，随着任务数的增多，收益差距越来越大，本文算法的性能优势更加明显。

图7描述了3种不同算法的带宽利用率随任务数的变化曲线。当任务数增加时，3种算法的带宽利用率均有所增加，但本文V-SG算法始终高于其他两种算法，其原因在于虚拟化技术能够实现对资源的合理复用，且Stackelberg博弈策略考虑竞价机制优化资源分配过程，使得本文算法具有较高的带宽利用率。CABPA 算法均衡功率分配和带宽利用率，因此带宽利用率并未最大化，Heuristic算法主要是最大化共享资源的任务数并均衡计算时间和计算复杂度，并未考虑带宽资源的最大化使用。

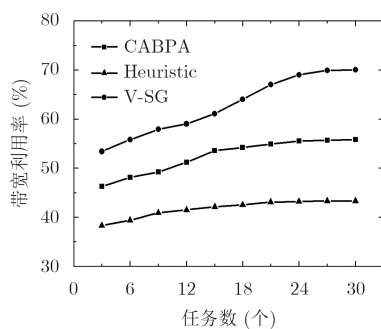


图7 不同任务数的带宽利用率

## 5 结束语

本文提出了虚拟化WSN中存在资源竞争的多个VSNPs的资源分配策略，根据不同VSNRs所承载任务的QoS要求量化重要程度，建立WSNInP和VSNPs之间的单主多从Stackelberg博弈模型，证明纳什均衡点的存在性并给出求解过程，经过多次博弈取得纳什均衡，得到WSNInP最优的价格策略和VSNPs最优的资源需求策略。虚拟化传感网未来可广泛应用于智慧医疗、智能家居、车联网等领域。

此外，结合基础设施即服务(Infrastructure as a Service, IaaS)和平台即服务(Platform as a Service, PaaS)的思想，虚拟化传感网可简化网络架构的设计及维护，可根据业务需求快速进行场景部署，充分共享传感基础设施资源，灵活部署任务，提升用户体验并提高资源利用率。

## 参考文献

- [1] EZDIANI S, ACHARYYA I S, SIVAKUMAR S, *et al.* Wireless sensor network softwarization: Towards WSN adaptive QoS[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2017, 4(5): 1517–1527. doi: [10.1109/JIOT.2017.2740423](https://doi.org/10.1109/JIOT.2017.2740423).
- [2] LIAO Yizheng, MOLLINEAUX M, HSU R, *et al.* SnowFort: An open source wireless sensor network for data analytics in infrastructure and environmental monitoring[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2014, 14(12): 4253–4263. doi: [10.1109/JSEN.2014.2358253](https://doi.org/10.1109/JSEN.2014.2358253).
- [3] HU Xiaoya, YANG Liuqing, and XIONG Wei. A novel wireless sensor network frame for urban transportation[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2015, 2(6): 586–595. doi: [10.1109/JIOT.2015.2475639](https://doi.org/10.1109/JIOT.2015.2475639).
- [4] ALAIAD A and ZHOU Lina. Patients' adoption of WSN-Based smart home healthcare systems: an integrated model of facilitators and barriers[J]. *IEEE Transactions on Professional Communication*, 2017, 60(1): 4–23. doi: [10.1109/TPC.2016.2632822](https://doi.org/10.1109/TPC.2016.2632822).
- [5] PARK P, MARCO P D, and JOHANSSON K H. Cross-layer optimization for industrial control applications using wireless sensor and actuator mesh networks[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2017, 64(4): 3250–3259. doi: [10.1109/TIE.2016.2631530](https://doi.org/10.1109/TIE.2016.2631530).
- [6] KHAN I, BELQASMI F, GLITHO R, *et al.* Wireless sensor network virtualization: Early architecture research perspectives[J]. *IEEE Network*, 2015, 29(3): 104–112. doi: [10.1109/MNET.2015.7113233](https://doi.org/10.1109/MNET.2015.7113233).
- [7] KHAN I, BELQASMI F, GLITHO R, *et al.* Wireless sensor network virtualization: A survey[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2016, 18(1): 553–576. doi: [10.1109/COMST.2015.2412971](https://doi.org/10.1109/COMST.2015.2412971).
- [8] GUO Lei, NING Zhaolong, SONG Qingyang, *et al.* A QoS-oriented high-efficiency resource allocation scheme in wireless multimedia sensor networks[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2017, 17(5): 1538–1548. doi: [10.1109/JSEN.2016.2645709](https://doi.org/10.1109/JSEN.2016.2645709).
- [9] DELGADO C, BOUSNINA S, CESANA M, *et al.* On optimal resource allocation in virtual sensor networks[J]. *Ad Hoc Networks*, 2016, 50(C): 23–40. doi: [10.1016/j.adhoc.2016.04.004](https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2016.04.004).
- [10] DELGADO C, CANALES M, ORTIN J, *et al.* Joint

- application admission control and network slicing in virtual sensor networks[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2017, 5(1): 28–43. doi: [10.1109/JIOT.2017.2769446](https://doi.org/10.1109/JIOT.2017.2769446).
- [11] OBELE B O, IFTIKHAR M, MANIPORNSUT S, *et al.* Analysis of the behavior of self-similar traffic in a QoS-aware architecture for integrating WiMAX and GEAPON[J]. *Journal of Optical Communication and Network*, 2009, 1(4): 259–273. doi: [10.1364/JOCN.1.000259](https://doi.org/10.1364/JOCN.1.000259).
- [12] MILAN G, JUAN E S, and JAMETT M. A simple estimator of the Hurst exponent for self-similar traffic flows[J]. *IEEE Latin America Transactions*, 2015, 12(8): 1349–1354. doi: [10.1109/TLA.2014.7014500](https://doi.org/10.1109/TLA.2014.7014500).
- [13] TRAN T D and LE L B. Stackelberg game approach for wireless virtualization design in wireless networks[C]. 2017 IEEE International Conference on Communications (ICC), Paris, France, 2017: 1–6. doi: [10.1109/ICC.2017.7997224](https://doi.org/10.1109/ICC.2017.7997224).
- [14] WANG Cong, WANG Cuirong, and YUAN Ying. Game based dynamical bandwidth allocation model for virtual networks[C]. 2009 First International Conference on Information Science and Engineering, Nanjing, China, 2009: 1745–1747. doi: [10.1109/ICISE.2009.616](https://doi.org/10.1109/ICISE.2009.616).
- [15] LUONG N C, HOANG D T, WANG Ping, *et al.* Data collection and wireless communication in Internet of Things (IoT) using economic analysis and pricing models: A survey[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2016, 18(4): 2546–2590. doi: [10.1109/COMST.2016.2582841](https://doi.org/10.1109/COMST.2016.2582841).
- [16] AL-ZAHRANI A Y and YU F R. An energy-efficient resource allocation and interference management scheme in green heterogeneous networks using game theory[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2016, 65(7): 5384–5396. doi: [10.1109/TVT.2015.2464322](https://doi.org/10.1109/TVT.2015.2464322).
- [17] XU Qichao, SU Zhou, and GUO Song. A game theoretical incentive scheme for relay selection services in mobile social networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2016, 65(8): 6692–6702. doi: [10.1109/TVT.2015.2472289](https://doi.org/10.1109/TVT.2015.2472289).
- [18] GHOSH A, COTTATELLUCCI L, and ALTMAN E. Normalized Nash equilibrium for power allocation in cognitive radio Networks[J]. *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, 2015, 1(1): 86–99. doi: [10.1109/TCCN.2015.2496578](https://doi.org/10.1109/TCCN.2015.2496578).
- [19] RAO M S S and SOMAN S A. Marginal pricing of transmission services using min-max fairness policy[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2015, 30(2): 573–584. doi: [10.1109/TPWRS.2014.2331424](https://doi.org/10.1109/TPWRS.2014.2331424).
- [20] ZHANG Yueyue, ZHU Yaping, YAN Feng, *et al.* Energy-efficient radio resource allocation in software-defined wireless sensor networks[J]. *IET Communications*, 2018, 12(3): 349–358. doi: [10.1049/iet-com.2017.0937](https://doi.org/10.1049/iet-com.2017.0937).
- 王汝言: 男, 1969年生, 教授, 博士, 研究方向为泛在网络、多媒体信息处理等。
- 李宏娟: 女, 1993年生, 硕士生, 研究方向为虚拟化、无线传感网络。
- 吴大鹏: 男, 1979年生, 教授, 博士, 研究方向为泛在无线网络、无线网络服务质量控制等。