

文章编号: 2095-4980(2020)01-0066-06

## 基于 SMDP 的虚拟化无线传感网络资源分配策略

王汝言<sup>1,2,3</sup>, 李宏娟<sup>\*1,2,3</sup>, 李红霞<sup>4</sup>

(1.重庆邮电大学 通信与信息工程学院, 重庆 400065; 2.重庆高校市级光通信与网络重点实验室, 重庆 400065; 3.泛在感知与互联重庆市重点实验室, 重庆 400065; 4.中国联合网络通信有限公司 重庆市分公司, 重庆 401123)

**摘要:** 针对传统无线传感网络(WSN)中资源部署与特定任务的耦合关系密切而造成较低的资源利用率问题, 将虚拟化技术引入 WSN, 提出基于半马尔科夫决策过程(SMDP)的资源分配策略。定义虚拟化 WSN 的状态集、行为集、状态转移概率, 考虑传感网能量受限以及完成虚拟传感网络请求(VSNR)的时间, 给出奖励的表达式, 并使用值迭代的方法求解特定状态下的行为, 在提高资源利用率的同时最大化网络资源提供者的长期收益。数值结果表明, 所提的资源分配策略能有效提高资源提供者的收益。

**关键词:** 无线传感网络; 虚拟化; 资源分配; 半马尔科夫决策过程

**中图分类号:** TP393

**文献标志码:** A

**doi:** 10.11805/TKYDA2018184

## SMDP-based resource allocation strategy in virtualized WSN

WANG Ruyan<sup>1,2,3</sup>, LI Hongjuan<sup>\*1,2,3</sup>, LI Hongxia<sup>4</sup>

(1.School of Telecommunication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Communications, Chongqing 400065, China; 2.Optical Communication and Network Key Laboratory of Chongqing, Chongqing 400065, China; 3.Key Laboratory of Ubiquitous Sensing and Networking in Chongqing, Chongqing 400065, China; 4.Chongqing Branch, Chinaunicom, Chongqing 401123, China)

**Abstract:** The close relationship between resource deployment and specific tasks in traditional Wireless Sensor Network(WSN) leads to low resource utilization. Virtualization technology is introduced into WSN to solve the problem, and resource allocation strategy based on Semi-Markov Decision Process(SMDP) is proposed. Then, defining the state, action, and transition probability of the virtualized WSN, the expected reward is given by considering the energy and time to complete the Virtual Sensor Network Request(VSNR), and the value iteration method is utilized to maximize the long-term reward of the network resource provider. The numerical results show that the proposed resource allocation strategy can effectively improve the revenue of the network resource providers.

**Keywords:** Wireless Sensor Network; virtualization; resource allocation; Semi-Markov Decision Process

无线传感网络(WSN)是由部署在监测区域内的大量传感节点, 通过无线通信方式形成的自组织网络, 实现数据的采集、处理和传输<sup>[1]</sup>, 广泛用于军事、医疗、家居、环境、工业等领域<sup>[2-7]</sup>。WSN 通常面向特定任务进行资源部署, 已部署的物理资源即使闲置也无法用于其他任务, 导致资源利用率较低。因此, 需要使用虚拟化技术整合传感网的物理资源, 将其抽象成虚拟资源<sup>[8]</sup>, 可供灵活分配和使用。

虚拟化传感网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(WSN 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 租赁传感资源并根据用户需求创建虚拟传感网络请求(VSNR)。每个 VSNR 由虚拟传感节点和虚拟链路组成, 需要将其分别映射至底层物理网络的物理传感节点和物理链路才能为用户提供服务。VSNR 的资源需求包括虚拟传感节点的 CPU 资源和缓存资源以及虚拟链路的带宽资源, 不同 VSNRs 中的

收稿日期: 2018-09-01; 修回日期: 2018-12-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61871062; 61771082); 重庆市高校创新团队建设计划资助项目(CXTDX201601020)

作者简介: 王汝言(1969-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为泛在网络、多媒体信息处理等。email:wangry@cqupt.edu.cn

\*通信作者: 李宏娟(1993-), 女, 在读硕士研究生, 主要研究方向为无线传感网络、虚拟化。email:1240221782@qq.com

虚拟传感节点可能映射至相同的物理传感节点, 因此如何合理地为 VSNRs 分配资源, 提高资源利用率, 并最大化 WSNInP 的长期收益至关重要。

文献[9]提出一种无线多媒体传感网中资源分配机制, 引入穷举搜索方法获得带有实时性业务需求的最优调度序列, 并提出了基于马尔科夫链以及动态图的启发式算法降低计算复杂度, 但该机制缺乏对收益问题的分析。文献[10]提出了软件定义无线传感器网络实现资源的集中分配, 通过节点的快速重建实现资源的动态分配, 在满足服务质量的个体约束下制定了一个优化问题来最小化能量消耗, 但该方案并未考虑在节点重建过程中的资源开销和对网络运行状态的影响。文献[11]提出了云辅助的软件定义无线传感器网络资源分配方案, 由多个资源提供商在云服务器的帮助下共同完成用户的资源需求且收益共享, 通过最小化能耗来最大化提供商的收益, 但该方案并未考虑对提供商自身资源的充分复用来最大化资源利用率。

本文提出了基于半马尔科夫决策过程(SMDP)的虚拟化 WSN 资源分配策略, 定义了虚拟化 WSN 的状态集、行为集、状态转移概率分布情况, 考虑资源分配过程中的能量和服务时间, 并将其作为收益的衡量指标对其进行优化, 给出最优策略的解决方法, 确定特定状态下的行为, 从而最大化 WSNInP 的长期收益。

## 1 网络模型

VSNR 至底层物理传感网络的映射模型如图 1 所示, 设  $VSNR_s = \{VSNR_1, VSNR_2, \dots, VSNR_m\}$ , 其对应的资源需求集合为  $RT = \{R_1, R_2, \dots, R_m\}$ 。对于第  $i$  个 VSNR, 其所有虚拟传感节点的资源需求表示为  $R_i = \{R(1), R(2), R(3)\}$ , 其中 1 代表 CPU 资源, 2 代表缓存资源, 3 代表带宽资源, 则所有 VSNRs 的资源需求集合可表示为  $RT = \{RT(\text{CPU}), RT(\text{cache}), RT(\text{band})\}$ , 其表达式为:

$$RT = \sum_{i=1}^m R_i \quad (1)$$

设底层物理传感网络的资源集合为  $PHY = \{PHY(\text{CPU}), PHY(\text{cache}), PHY(\text{band})\}$ , 物理资源总量大小用  $M$  表示, 则在映射过程中需满足的约束条件为:

$$\begin{cases} \sum R_i(R(1)) \leq \text{Map}(R_i(R(1))), \forall i \in [1, m] \\ \sum R_i(R(2)) \leq \text{Map}(R_i(R(2))), \forall i \in [1, m] \\ \sum R_i(R(3)) \leq \text{Map}(R_i(R(3))), \forall i \in [1, m] \\ RT(\text{CPU}) \leq PHY(\text{CPU}) \\ RT(\text{cache}) \leq PHY(\text{cache}) \\ RT(\text{band}) \leq PHY(\text{band}) \end{cases} \quad (2)$$

式中  $\text{Map}(R_i(R(k))), k = \{1, 2, 3\}$  表示将第  $i$  个虚拟传感网络请求映射至底层的物理传感网后, 该物理传感网的资源大小。以上约束条件表明, 虚拟资源请求量小于物理资源量是映射成功的基础。

某一时刻, 网络中会存在带有具体资源需求的 VSNRs 到达或离开, 设其到达或离开的速率服从泊松分布, 大小分别为  $\lambda_p$  和  $\mu_p$ , 则当新的 VSNRs 到来时, 网络选择接受或拒绝这些 VSNRs 需根据网络的整体资源情况、运行状况及可能带来的奖励等因素综合确定。

## 2 基于 SMDP 的虚拟化无线传感网络资源分配

### 2.1 状态集

在 VSNP 创建 VSNRs 向 WSNInP 请求资源并完成映射的资源分配过程中, 状态集  $S$  包括不同 VSNRs 的资源需求情况、当前物理传感网络的可用资源情况以及可能发生的事件, 其中事件包括 VSNR 的到来和离开, 因此状态集  $S$  的表达式为:

$$S = \{s | s = (R_1, R_2, \dots, R_m, M, e)\} \quad (3)$$

根据上节的描述可知,  $R_1, R_2, \dots, R_m$  分别为  $m$  个 VSNR 的资源需求量,  $M$  为物理传感网络中可用的总资源量,

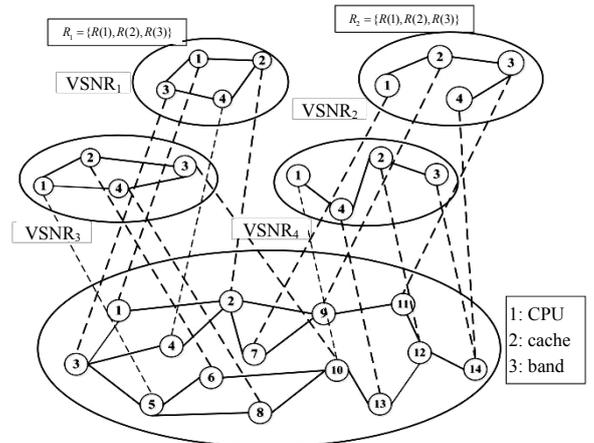


Fig.1 Network model  
图 1 网络模型

$\sum_{x=1}^m R_x \leq M$ 。  $e \in E = \{A_{R_a}, D_{R_i}\}$ ，  $A_{R_a}$  表示资源需求量为  $R_a$  的 VSNR 到达，  $D_{R_i}$  表示资源需求量为  $R_i$  的 VSNR 离开。

## 2.2 行为集

根据状态集，行为集可表示为：

$$a = \{-1, 0, 1\} \quad (4)$$

当新的事件发生时，即存在 VSNR 的到来或离开时，网络根据当前的状态决定采取哪种行为。具体地，

$$a(s) = \begin{cases} \{-1\} & e = D_{R_i} \\ \{0, 1\} & e = A_{R_a} \end{cases} \quad (5)$$

$a(s) = -1$  表示资源需求量为  $R_i$  的 VSNR 已成功完成并从系统中离开。当新的 VSNR 到达时，若网络拒绝该请求，则  $a(s) = 0$ ；否则，接受该 VSNR 且  $a(s) = 1$ 。

## 2.3 状态转移概率

对于虚拟传感网络中的 SMDP，下一个状态出现的概率只依赖于前一个状态以及前状态所采取的行为，与历史状态无关。因此将状态转移概率定义为：在当前状态  $s$  和采取行为  $a$  时，转变为状态  $s'$  的概率<sup>[12]</sup>。设  $\tau(s, a)$  表示在采取行为  $a$  时从当前状态  $s$  转移到下一个状态  $s'$  的服务时间， $\sigma(s, a)$  表示状态转移过程中网络的平均事件发生率，则  $\sigma(s, a) = \tau(s, a)^{-1}$ ，且其表达式为：

$$\sigma(s, a) = \tau(s, a)^{-1} = \begin{cases} M\lambda_p + \sum_{x=1}^m R_x\mu_p - R_i\mu_p, & e = D_{R_i}, a = -1 \\ M\lambda_p + \sum_{x=1}^m R_x\mu_p, & e = A_{R_a}, a = 0 \\ M\lambda_p + \sum_{x=1}^m R_x\mu_p + R_a\mu_p, & e = A_{R_a}, a = 1 \end{cases} \quad (6)$$

式中： $M\lambda_p$  表示网络中 VSNR 的到达率； $\sum_{x=1}^m R_x\mu_p$  表示网络中 VSNR 的离开率。当资源需求量为  $R_i$  的 VSNR 已完成且离开时，所有 VSNR 占用的物理资源总量变为  $(\sum_{x=1}^m R_x - R_i)$ ，则对应的 VSNR 事件发生率为  $(\sum_{x=1}^m R_x\mu_p - R_i\mu_p)$ ；同理，当资源需求量为  $R_a$  的 VSNR 到达且被接受时，所有 VSNR 占用的物理资源量变为  $(\sum_{x=1}^m R_x + R_a)$ ，对应的 VSNR 事件发生率为  $(\sum_{x=1}^m R_x\mu_p + R_a\mu_p)$ 。

考虑不同事件，在状态  $s$  时采取行为  $a$  转变到状态  $s'$  的状态转移概率  $P(s'|s, a)$  计算如下：

1)  $s = (R_1, R_2, \dots, R_m, M, A_{R_a})$

$$P(s'|s, a=0) = \begin{cases} \frac{M\lambda_p}{\sigma(s, a)}, & \text{if } s' = (R_1, R_2, \dots, R_m, M, A_{R_a}) \\ \frac{R_i\mu_p}{\sigma(s, a)}, & \text{if } s' = (R_1, R_2, \dots, R_m, M, D_{R_i}) \end{cases} \quad (7)$$

$$P(s'|s, a=1) = \begin{cases} \frac{M\lambda_p}{\sigma(s, a)}, & \text{if } s' = (R_1, R_2, \dots, R_m, M, A_{R_a}) \\ \frac{R_a\mu_p}{\sigma(s, a)}, & \text{if } s' = (R_1, R_2, \dots, R_m, M, D_{R_a}) \\ \frac{R_i\mu_p}{\sigma(s, a)}, & \text{if } s' = (R_1, R_2, \dots, R_m, M, D_{R_i}) \end{cases} \quad (8)$$

2)  $s = (R_1, R_2, \dots, R_m, M, D_{R_i})$

$$P(s'|s, a = -1) = \begin{cases} \frac{M\lambda_p}{\sigma(s, a)}, & \text{if } s' = (R_1, R_2, \dots, R_m, M, A_{R_a}) \\ \frac{M\lambda_p}{\sigma(s, a)}, & \text{if } s' = (R_1, R_2, \dots, R_m, M, A_{R_i}) \\ \frac{R_i\mu_p}{\sigma(s, a)}, & \text{if } s' = (R_1, R_2, \dots, R_m, M, D_{R_i}) \\ \frac{R_a\mu_p}{\sigma(s, a)}, & \text{if } s' = (R_1, R_2, \dots, R_m, M, D_{R_a}) \end{cases} \quad (9)$$

## 2.4 奖励评估

在当前状态为  $s$ , 采取行为  $a$  时, 网络的奖励可表示为:

$$r(s, a) = k(s, a) - g(s, a) \quad (10)$$

式中  $k(s, a)$  表示系统在事件  $e$  发生时, 在状态  $s$  下采取行为  $a$  的收益, 该收益包括节省能量和加快 VSNR 的处理时间带来的效益, 其具体表达式为:

$$k(s, a) = \begin{cases} \omega_e \beta_e (E_l - P_l \cdot \delta) + \omega_d \beta_d (D_l - \frac{1}{R_a \mu_p} - \delta) - \gamma \delta, & e = A_{R_a}, a = 1 \\ 0, & e = A_{R_a}, a = 0 \\ 0, & e = D_{R_i}, a = -1 \end{cases} \quad (11)$$

式中:  $\omega_e$  和  $\omega_d$  分别表示处理 VSNR 时消耗的能量和时间的权重,  $\omega_e + \omega_d = 1$ ;  $\beta_e$  和  $\beta_d$  分别表示单位能量和时间转换成收益的单价;  $E_l$  和  $D_l$  分别表示处理 VSNR 时消耗的最大能量和时间;  $P_l$  表示处理 VSNR 时单位时间消耗的实际能量;  $\delta$  表示实际的处理时间。若该 VSNR 被分配的资源量大小为  $R_a$ , 则完成该请求需要的服务时间为  $1/R_a \mu_p$ ;  $\gamma \delta$  表示接受该请求并将结果发送给被请求者的成本。

$g(s, a)$  表示系统在一段连续时间内, 从状态  $s$  转变到状态  $s'$  前处理服务请求所需的成本, 其表达式为:

$$g(s, a) = c(s, a) \cdot \tau(s, a) \quad (12)$$

式中  $c(s, a) = \sum_{x=1}^m R_x$  表示在这个过程中给 VSNR 已分配的资源量大小。

为了满足实际条件, 考虑一个连续时间的折扣因子  $\alpha \in [0, 1]$ , 根据式(6)知  $\sigma(s, a) = \tau(s, a)^{-1}$ , 即  $\tau(s, a) = \sigma(s, a)^{-1}$ , 因此折扣奖励  $r(s, a)$  的表达式重新定义为:

$$r(s, a) = k(s, a) - c(s, a) / [\alpha + \sigma(s, a)] \quad (13)$$

## 2.5 最优策略求解

虚拟化传感网中基于 SMDP 的资源分配就是找到最优的策略使得长期期望折扣奖励即收益最大化。策略定义为  $\pi: S \rightarrow a$  即  $\pi(S) = a$ , 该最优策略可描述为: 当系统处于某种状态时, 采取某种行为最大化收益值。因此, 当事件发生时, 在当前状态下网络能采用策略中的行为取得最大的收益, 即

$$v_a^{\pi^*}(s) = \text{Max}_{\pi} E_s^{\pi} \left[ \sum_{m=1}^{\infty} e^{-\alpha \sigma_m} r(s_m, a_m) \mid s_0 = s \right] \quad (14)$$

式中:  $s_0$  为系统的初始状态;  $s_m$  和  $a_m$  分别为第  $m$  个状态和对应的行为,  $\sigma_m$  表示在状态  $s_m$  下单位时间内的平均事件发生率。根据贝尔曼方程<sup>[13]</sup>, 考虑状态转移概率和折扣率  $\lambda$ , 得

$$v(s) = \text{Max} \left[ r(s, a) + \lambda \sum_{s' \in S} p(s' | s, a) \cdot v(s') \right] \quad (15)$$

式中  $\lambda = \sigma(s, a) / (\alpha + \sigma(s, a))$ , 且当前策略  $\pi$  的值函数  $v(s)$  的计算基于前一个策略  $\pi-1$  的值函数  $v(s')$ 。初始状态时, 令等式左右两边的值函数相等。为了进一步均衡连续时间的半马尔科夫决策过程, 引入参数  $y$ , 且  $y = K\lambda_p + KR_a\mu_p$ , 式(15)中相关参数的归一化表达式为:

$$\tilde{r}(s, a) = r(s, a) \frac{\alpha + \sigma(s, a)}{\alpha + y} \quad (16)$$

$$\tilde{\lambda} = \frac{y}{\alpha + y} \quad (17)$$

$$\tilde{p}(s'|s, a) = \begin{cases} 1 - \frac{[1 - p(s'|s, a)]\sigma(s, a)}{y}, & s' = s \\ \frac{[1 - p(s'|s, a)]\sigma(s, a)}{y}, & s' \neq s \end{cases} \quad (18)$$

根据上述表达式, 式(15)可重新定义为:

$$\tilde{v}(s) = \text{Max} \left[ \tilde{r}(s, a) + \tilde{\lambda} \sum_{s' \in S} \tilde{p}(s'|s, a) \cdot \tilde{v}(s') \right] \quad (19)$$

本文考虑有限的状态集和有限的行为集, 但连续时间内到达和离开的 VSNR 数量可能较大, 因此采用值迭代<sup>[14]</sup>的方法解决大规模状态空间的 SMDP, 且其终止条件为前后策略的值函数差值小于  $\varepsilon(1-\tilde{\lambda})/2\tilde{\lambda}$ 。该算法具体步骤如下:

步骤 1: 对于状态  $s$ , 初始化  $\tilde{v}(s)=0$ , 设置  $\varepsilon=0, k=0$ ;

步骤 2: 根据式(19), 利用前一个策略的值函数  $\tilde{v}^k(s)$  计算当前策略的值函数  $\tilde{v}^{k+1}(s)$ ;

步骤 3: 如果  $\|\tilde{v}^{k+1}(s) - \tilde{v}^k(s)\| < \varepsilon(1-\tilde{\lambda})/2\tilde{\lambda}$ , 则转入步骤 4; 否则  $k+1$ , 转入步骤 2;

步骤 4: 对任意的  $s \in S$ , 计算最优策略  $\pi_e^*(s) \in \arg \max \left[ \tilde{r}(s, a) + \tilde{\lambda} \sum_{s' \in S} \tilde{p}(s'|s, a) \cdot \tilde{v}^{k+1}(s') \right]$ 。

### 3 数值结果分析

采用 Matlab 仿真平台验证虚拟化传感网中基于 SMDP 的资源分配策略性能, 并将本文所提策略与虚拟传感网中的 GreedyAirtime(GA)算法<sup>[15]</sup>、Heuristic 算法<sup>[16]</sup>进行对比, 验证本文算法的有效性。为了使实验结果易于观察且考虑实际情况, 本文的仿真参数设置如表 1 所示。

图 2 为不同 VSNR 到达率即不同  $\lambda_p$  的收益对比。从图中可以看出, 随着资源总量的增加(资源总量包括虚拟传感节点的 CPU 资源和缓存资源以及虚拟链路的带宽资源), 收益均呈增加的趋势, 因为网络中消耗的能量和时间的成本在减少。此外, 当资源总量相同时,  $\lambda_p$  越小, 收益越大, 因为需要消耗的能量和时间更少。

表 1 仿真参数设置表

Table1 Simulation parameter setting			
parameter	value	parameter	value
$K$	20-30	$\lambda_p$	1-9
$\omega_e$	0.5	$\omega_s$	0.5
$\beta_e$	2	$\beta_s$	2
$E_l$	20	$P_l$	5
$D_l$	20	$\delta$	2
$\gamma$	2	$\alpha$	0.1

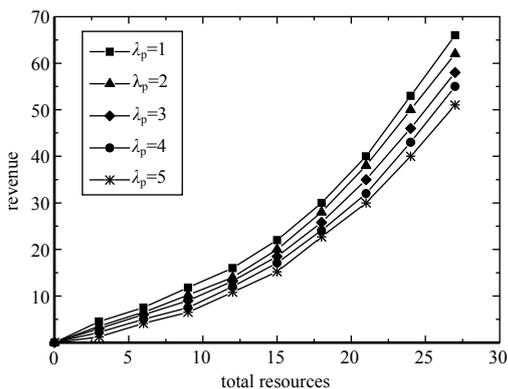


Fig.2 Revenue of different  $\lambda_p$   
图 2 不同  $\lambda_p$  的收益对比

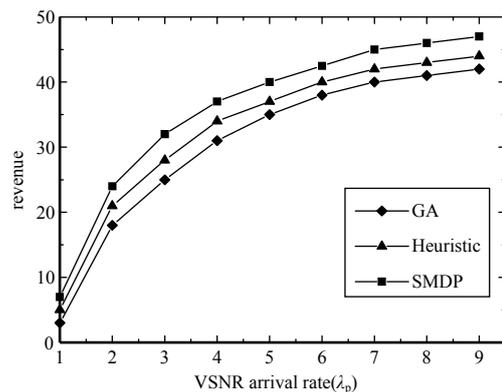


Fig.3 Revenue of different algorithms  
图 3 不同算法的收益对比

图 3 为不同算法随 VSNR 到达率的收益对比。由图可知, 相同条件下, 基于 SMDP 的资源分配策略带来的收益始终高于其他 2 种算法。Heuristic 算法旨在最大化共享物理资源的任务数即 VSNR, 从而提高资源利用率, GA 算法不考虑负载和干扰的情况下, 尽可能部署更多的 VSNRs, 而本文算法能在特定状态下采取合适的行为最大化长期奖励。

图 4 为 3 种算法在不同资源总量时的收益对比, 其中  $\lambda_p=3$ 。由图可知, 随着最大资源总量的增大, 3 种算法的收益均有所增加, 且本文算法的收益始终高于其他 2 种算法。因为资源总量的增大, 使得同等情况下处理 VSNR

的能量和时间更少,且本文算法选择恰当的行为最大化长期收益,因此收益会高于其他 2 种算法。

#### 4 结论

本文提出了基于 SMDP 的虚拟化 WSN 资源分配策略,定义状态集、行为集,计算不同状态的转移概率分布,给出奖励表达式,并采用值迭代的方法求解特定状态下的行为,从而充分利用虚拟化传感网的资源,并同时最大化资源提供者的长期收益。仿真结果表明,本文所提的资源分配策略能有效复用虚拟化传感网的资源,从而提高资源提供者的收益。

#### 参考文献:

- [1] 姜倩倩,王磊,甄贵平. 一种节能无线传感器网络[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2018,16(2):272-276. (JIANG Qianqian,WANG Lei,ZHEN Guiping. An energy-saving wireless sensor networks[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2018,16(2):272-276.) DOI:10.11805/TKYDA201802. 0272.
- [2] YETGIN H,CHEUNG K T K,EL-HAJJAR M,et al. A survey of network lifetime maximization techniques in wireless sensor networks[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2017,19(2):828-854. DOI:10.1109/CCDC.2015.7162497.
- [3] TOKALA M,NALLAMEKALA R. Secured algorithm for routing the military field data using dynamic sink:WSN[C]// 2018 2nd International Conference on Inventive Communication and Computational Technologies(ICICCT). Coimbatore,India: [s.n.], 2018:471-476. DOI:10.1109/ICICCT.2018.8473343.
- [4] XIONG Shuming,WANG Liangmin,WANG Xinsheng,et al. Application of wireless sensor networks to remote medical treatment system[C]// 2009 IEEE International Symposium on IT in Medicine & Education. Jinan,China:IEEE, 2009:96-99.
- [5] ALAIAD A,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.
- [6] LI Hang,SAVKIN A V. Wireless sensor network based navigation of micro flying robots in the industrial internet of things[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018,14(8):3524-3533. DOI:10.1109/TII.2018.2825225.
- [7] GUO Xiaoran,WANG Yahui,WEI Xufeng. Design of WSN-based environment monitoring system on repair of gas leakage[C]// The 27th Chinese Control and Decision Conference(2015 CCDC). Qingdao,China:IEEE, 2015:3340-3344.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] HASSAN M M,ALSANAD A. Resource provisioning for cloud-assisted software defined wireless sensor network[J]. IEEE Sensors Journal, 2016,16(20):7401-7408. DOI:10.1109/JSEN.2016.2582339.
- [12] ZHENG Kan,MENG Hanlin,CHATZIMISIOS P,et al. An SMDP-based resource allocation in vehicular cloud computing systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015,62(12):7920-7928. DOI:10.1109/TIE.2015.2482119.
- [13] SCHOLLIG A,CAINES P E,EGERSTEDT M,et al. A hybrid Bellman equation for systems with regional dynamics[C]// 2007 46th IEEE Conference on Decision and Control. New Orleans,LA,USA:IEEE, 2007:3393-3398.
- [14] GOSAVI A. Relative value iteration for average reward semi-Markov control via simulation[C]// 2013 Winter Simulations Conference(WSC). Washington,DC,USA:IEEE, 2013:623-630. DOI:10.1109/WSC.2013.6721456.
- [15] BOUSNINA S,CESANA M,ORTIN J,et al. A greedy approach for resource allocation in Virtual Sensor Networks[C]// 2017 Wireless Days. Porto,Portugal:IEEE, 2017:15-20. DOI:10.1109/WD.2017.7918108.
- [16] DELGADO C,BOUSNINA S,CESANA M. 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.

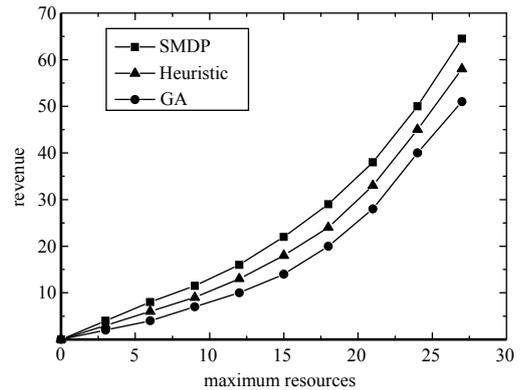


Fig.4 Revenue of different resources

图 4 不同资源总量的收益