

# 一种无线网络控制系统的时空实时任务调度算法

林 强<sup>1,2</sup> 吴国伟<sup>1</sup> 万安民<sup>1</sup> 于军帅<sup>1</sup>

(大连理工大学软件学院 大连 116021)<sup>1</sup> (大连科技学院 大连 116052)<sup>2</sup>

**摘 要** 提出了一种无线网络控制系统的时间空间混合优先级调度算法(STS)。该算法综合考虑了无线网络控制系统中机器人之间与任务区域的距离和任务有效截止期,将时间和距离两个因素通过多个步骤逐步量化,最终形成最优的优先级队列,移动机器人根据优先级队列逐个解决区域的任务需求。为了验证 STS 算法的性能,做了大量的仿真实验来证明时间空间混合优先级算法的优势。实验结果表明,在确保高优先级调度成功并提高系统稳定性的前提下,时间空间混合优先级算法在任务请求吞吐率、任务解决成功率和平均响应时间等方面与之前的算法相比都具有更好的调度表现。

**关键词** 无线网络控制系统,任务响应调度,时间空间混合优先级调度算法

中图分类号 TP399 文献标识码 A

## Real Time Scheduling Algorithm for Temporal and Spatial Tasks in Wireless Networked Control Systems

LIN Qiang<sup>1,2</sup> WU Guo-wei<sup>1</sup> WAN An-min<sup>1</sup> YU Jun-shuai<sup>1</sup>

(School of Software, Dalian University of Technology, Dalian 116021, China)<sup>1</sup>

(Dalian Institute of Science and Technology, Dalian 116052, China)<sup>2</sup>

**Abstract** In this paper, a hybrid spatial and temporal scheduling algorithm for wireless networked control system, which takes the distance between robots and task region as well as the deadline of a tasks into consideration, was proposed. In our method, patial and temporal factors are quantified for eventually getting the priority queue. Based on the priority queue, the robot is able to execute the tasks sequentially. At last, extensive simulations are conducted to show the advantages of our spatial and temporal scheduling algorithm. Simulation results show that, on the premise of ensuring high successful scheduling rate, compared with previous method, our scheme show merits in terms of task requesting throughput, successful task solving ratio, average responding delay.

**Keywords** Wireless networked control system, Request scheduling, Time and spatial priority scheduling algorithm

## 1 引言

### 1.1 无线网络控制系统(WNCS)

无线网络控制系统(Wireless Networked Control Systems, WNCS),是利用无线通讯网络实现地域上分布的、可移动的现场传感器、控制器及执行器之间的信息相互交换,以达到被控对象的实时反馈控制的一套新型控制系统。它代替传统的点对点连接构成的闭环控制系统,打破了传统控制系统在空间物理位置上的限制,拓宽了控制活动的场所,同时降低了系统的连接复杂性以及维护成本,提高了信息集成度,具有可实现资源共享、高的诊断能力、高度移动性、减少系统布线、增加系统的柔性和鲁棒性、安装维护方便等诸多优点<sup>[1,2]</sup>。

采用无线网络进行通信控制可以免去大量的线路连接,节省系统的构建费用和维护成本,还可以满足一些特殊场合的需求,并且可以大大增强系统组成的灵活性。但是由于无线网络自身存在的局限性,在研究 WNCS 时需要考虑如下基本问题:1)随机时延及丢包,由于无线网络传输形式是多跳的(Multi-hopping),导致传播时延及丢包具有较大的随机性,使得在无线网络系统中数据的丢包率较高;2)通信中断,由于网络节点的可移动性,因此网络拓扑结构是动态的,加之丢包率

又较高,使得通信出现间断性的连接,有时候甚至会导致长时间的通信中断;3)时变的信道增益和干扰,无线信道是随时间和空间变化的,因此存在时变信道增益,各节点之间还存在着干涉影响;4)带宽相对较小,使得误码率比较高,传输功率有限,所以需要在使用时对其进行检验,以判断是否符合实验要求<sup>[3-5]</sup>。

无线网络控制系统在现实生活中的应用十分广泛,可用于无线远程机器人控制系统、无线智能家居网络控制系统<sup>[6]</sup>、无线车载控制系统、航天器无线控制系统<sup>[7]</sup>等的设计中,为工业控制、医学、军事等社会生活的诸多领域做出了很大的贡献。特别是如今十分热门的智能家居方面,以智能手机为核心实现对智能家居的无线网络控制,这就需要一套完整的无线网络控制系统作为支撑。

## 2 时间空间混合优先级调度算法下的点播式任务请求响应

本节将详细地介绍时间空间混合优先级调度算法 STS。对于移动无线机器人,从服务池中选择任务请求意味着一个清晰的排队行为,它鼓励我们采用一个排队模型去研究并分析调度过程:移动无线机器人作为“服务器”,而由节点发出的

林 强(1983—),男,硕士,副教授,主要研究方向为无线网络控制系统;吴国伟(1973—),男,博士,教授,主要研究方向为物联网、实时系统;万安民(1993—),男,主要研究方向为物联网;于军帅(1995—),男,主要研究方向为物联网。

任务请求则被看作“客户端”<sup>[8]</sup>。所以,便采用一个 M/M/1/STS 排队模型<sup>[9]</sup>,如图 1 所示。

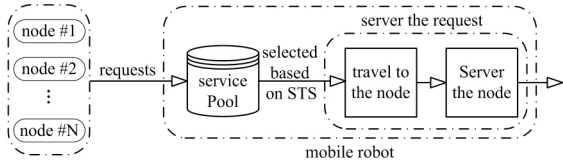


图 1 排队模型

## 2.1 相关符号和定义

表 1 展示了文中所用到的相关符号和定义。

表 1 相关符号和定义

符号	定义
$D(R)$	发出任务请求 $R$ 的节点与无线机器人之间的距离
$T(R)$	任务请求 $R$ 的任务有效截止期
$Pd(R)$	任务请求 $R$ 的距离优先级,取值整数,越小优先级越大
$Pt(R)$	任务请求 $R$ 的时间优先级,取值整数,越小优先级越大
$P1(R)$	任务请求 $R$ 的一级时间空间混合优先级
$De(A)$	任务请求 $R$ 的距离密度
$V_r$	无线机器人运行速度
$N$	时钟变量,初值为 0,随时间增加,为长时间等待的任务请求增大优先值的变量

## 2.2 问题定义

图 2 描绘了点播式任务请求响应过程的框架。把一组节点分布在边长为  $L$  的区域内,当节点产生需求时,就会立即给负责节点任务请求的无线机器人发送任务请求。除此之外,从文献<sup>[10]</sup>中借鉴得出:传感器节点能够实时地确定无线机器人的位置。

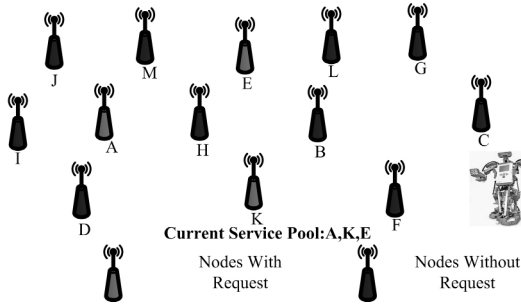


图 2 点播式任务响应架构

同样地,此文中笔者仅仅考虑任务响应传感器网络中只有一个可获得的无线机器人的情况。无线机器人收集所有任务请求并把这些请求保存在服务池中。与图 2 一样,服务池记录了节点 A, K, E 的位置信息。因为任务请求是受实时约束的(受实时约束意味着任务请求有实时的任务有效截止期),任务请求调度问题可以认为是一个实时任务调度问题。这需要在队列中把任务请求按照紧急性和优先级进行排序。一旦一个请求被选为立即响应的节点,无线机器人就会立即为其解决任务需求。因此,机器人的旅行路径直接与队列中任务的顺序相关联。在点播式框架中,无线机器人以一个恒定的速度运行。由于解决任务需求的时间与旅行时间相比太短,因此本文中忽略任务解决时间的影响<sup>[11]</sup>。

## 2.3 算法基础设施

因为无线传感器网络中的机器人响应节点任务并行进至对应节点为其充电的优先级顺序与节点的电池剩余使用时间和其与机器人的距离都有联系,所以调度算法应该兼顾到两者。在本算法中,同时用到了任务请求的时间优先级和空间优先级来确定最后的混合优先级,从而指导机器人响应节点

任务需求路径<sup>[12,13]</sup>。

设置  $D(R)$  为任务请求节点到机器人的距离,  $T(R)$  为节点任务有效截止期时间。利用算法得出节点任务需求的优先级。

点播式调度必须满足不同的要求,比如时间空间相互独立、抢占、优先级调节等。接下来将介绍相应的满足以上要求的方法。

## 2.4 任务有效截止期的确定

混合优先级调度算法(STS)有一个任务有效截止期。此处首先说明怎样计算任务有效截止期  $T$ 。定义  $L$  和  $V_r$  分别为无线传感器网络的边长和无线机器人的运行速度,  $T_m$  表示正方形区域内从一个位置到机器人的另一位置所消耗的最长时间,可以得到:

$$T_m = \frac{\sqrt{2} * L}{V_r} \quad (1)$$

为了确保所有节点能够在任务失效前得到机器人的任务响应,节点的任务有效截止期应该至少为  $T_m$ 。与此同时,还必须考虑到等待任务响应节点队列的长度  $L_q$ ,因为不是所有的任务请求都会立刻被响应。因此,任务有效截止期  $T$  可以由以下式(2)确定:

$$T = T_m * L_q \quad (2)$$

## 2.5 抢占

由于随时会出现新的任务请求进入服务池,新出现的任务请求可能在时间及空间优先级上都高于服务池中已存在的任务请求,造成少数任务请求永远被抢先而得不到响应。

为解决此问题,本文为每个任务请求添加时钟变量  $N$ ,  $N$  的初值为 0,且随时间增加,将  $N$  乘以适当系数后加入最终所得优先级值中,使长时间等待的任务请求获得更高的优先级,从而避免被抢占的问题。

## 2.6 时间空间混合优先级(STS)调度算法

本小节将详细地介绍怎样比较两个任务请求的优先级。本文中决定一个任务请求的优先级的因素有两个:1)时间因素,即任务请求的有效截止期,任务有效截止期短,则时间优先级越高;2)空间因素,即发出任务请求的节点与无线机器人之间的距离,距离越近,距离优先级越高。因此  $Pt(A) > Pt(B)$  当且仅当  $T(A) < T(B)$ ,反之  $Pt(A) < Pt(B)$ 。

首先,要比较两个任务请求的时间优先级。根据以上的算法比较两个任务请求的有效截止期,从而得出该任务请求的时间优先级,时间优先级越大,在时间优先级队列中的位置越靠前,即队列中的位置序号越小。

接下来比较两个任务请求的距离优先级。类似地,  $Pd(A) > Pd(B)$  当且仅当  $D(A) < D(B)$ ,反之  $Pd(A) < Pd(B)$ 。

可以比较两个任务请求的距离优先级,距离优先级越大,则在距离优先级队列中的位置越靠前,即队列中的位置序号越小。

综合以上对节点的时间与距离优先级比较,可将服务池中的任务请求形成两个优先级队列。前文中提出,时间和距离优先级的值都是由整数表示,并且取值越小,优先级越高。因此,令每个节点的时间优先级值为时间优先级队列中的位置值,空间优先级值为空间优先级队列中的位置值。

每个任务请求都有一个一级时间空间混合优先级位置,可以初步确定无线机器人的任务响应调度顺序。  $Pt(A)$  和  $Pd(A)$  分别代表任务请求  $A$  的时间优先级和空间优先级,取值分别为该任务请求  $A$  在时间优先级调度队列和空间优先

级调度队列中的位置值。用式(3)计算一级时间空间混合优先级  $P_1(A)$  的值,从而初步算出任务响应调度顺序。

$$P_1(A) = \gamma Pt(A) + \lambda Pd(A) \quad (3)$$

其中,  $0 \leq \gamma \leq 1, 0 \leq \lambda \leq 1$ 。

$\gamma$  和  $\lambda$  分别强调时间和距离在优先级调度过程中所占的比重,如果  $\frac{\gamma}{\lambda} \rightarrow +\infty$ , 则以上计算所得实际与截止期最早优先法(EDF)所得结果相同;如果  $\frac{\gamma}{\lambda} \rightarrow 0$ , 则以上计算所得实际与最短距离优先抢占法(NJNP)所得结果相同,本文中令  $\frac{\gamma}{\lambda} = 1$ 。

得到一级时间空间混合优先级后,会出现当服务池中有多个节点任务请求时,存在两个任务请求的一级时间空间混合优先级值相等的情况。这样对于无线机器人的调度来说不可能同时为两个任务请求节点响应。因此,就引出了接下来的时间空间混合优先级调度算法的第二步,即确定两个拥有相同的一级时间空间混合优先级的节点的顺序。

任务间的混合优先级比较如表 2 所列。

表 2 时间空间混合优先级比较算法

Algorithm Compare mixed priority	
Input:	Pt(A), Pt(B), Pd(A), Pd(B), N(A), N(B)
Output:	Comparison of P2(A) and P2(B)
1.	If A 混合优先级高于 B(式(3))
2.	Then P2(A) > P2(B)
3.	Else
4.	Then P2(A) < P2(B)
5.	End If

### 2.7 算法可行性及复杂度分析

在普遍的 NJNP(最短距离优先抢占法则)中,算法只根据任务请求节点到机器人的距离来为无线充电机器人设计充电路径,忽略了时间对充电的影响。而 STS 在 NJNP 的理论基础之上,将时间变量(任务有效截止期)与距离变量同时加入算法中,两者实际作用的理论相同,但不重叠,具有可行性。同时,为防止部分任务长时间得不到响应,为其增加时间权重来增加其优先级,其可行性参照操作系统中高响应比优先级调度算法。

在算法复杂度方面,本算法的两个阶段都需要进行任务请求两两之间的优先级比较,即复杂度都为  $O(n^2)$ 。

## 3 实验仿真与结果分析

本节通过大量实验评估了之前所提出的时间空间混合优先级调度算法的性能,主要通过和最短距离优先抢占调度算法进行比较<sup>[15]</sup>。最短距离优先抢占算法被广泛看作是在点播式架构中的一种传统的调度算法<sup>[16,17]</sup>。

### 3.1 仿真设置

如表 3 所列,在模拟实验中,将 100 个节点随机地放置在一个  $100m \times 100m$  的正方形区域内。无线机器人的运行速度设置为  $2m/s$ 。无线机器人将根据以上的算法对服务池中的所有任务请求进行排序,然后根据等待队列的顺序从当前位置到目标节点位置给传感器节点解决任务需求。

表 3 仿真参数设置

参数	数值
无线传感器网络区域大小	$100m \times 100m$
无线传感器节点数量	100
无线机器人的运行速度 $V_r$	$2m/s$

### 3.2 无线机器人的任务请求吞吐量

在点播式架构中,任务请求的吞吐量被看作是调度算法的一个重要的评估方面。从移动无线机器人的角度看,调度过程的吞吐量被定义为移动无线机器人一定时间内能够处理任务请求的数量,它是评估一个系统为各个节点提供任务响应服务能力的一个重要度量标准。通常,一个更高的系统吞吐量意味着更短的无线机器人移动过程时间,也意味着更低的机器人移动消耗。

对于移动机器人,从服务池中请求意味着一个清晰的排队行为,它鼓励我们采用一个排队模型去研究并分析调度过程:移动机器人作为“服务器”,而由节点发出的任务请求则被看作“客户端”。前文已经提到,本文中采用的排队模型是一个 M/M/1/NJNP 排队模型,这里不再赘述。

从图 3 中可以看出,随着时间的增长,时间空间混合优先级调度算法的吞吐量也在逐渐增长;然而最短距离优先抢占调度算法的吞吐量则不是很稳定。时间空间混合优先级调度算法的吞吐量远远大于最短距离优先抢占调度算法的吞吐量,后者吞吐量甚至只是前者的一半多一点。可以很明显看出,时间空间混合优先级调度算法在提高任务响应调度效率方面有了非常大的提升。

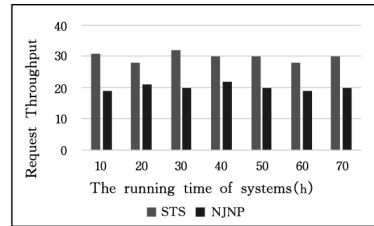


图 3 吞吐量对比

### 3.3 平均响应时间

平均响应时间是指一个传感器节点在发出任务请求那一刻开始到无线机器人接收到任务请求并赶来为之解决任务需求为止的这段时间。它反映了无线机器人的任务响应速度以及调度效率问题,也是衡量一个算法的重要标准。

图 4 说明时间空间混合优先级调度算法中平均响应时间总体上缓慢下降,然而最短距离优先抢占算法下降得却特别快。这是因为在最短距离优先抢占算法下,无线传感器网络中的节点由于任务需求未能及时得到解决而使节点失效(无法进行),导致有效节点数量减少。即使这样,最后最短距离优先抢占算法还是比时间空间混合优先级调度算法的平均响应时间慢了将近 5min。越短的响应时间就意味着节点越短的任务等待时间,这提高了节点任务请求得到解决的几率,进而表明时间空间混合优先级调度算法比最短距离优先抢占算法具有更高的任务响应及解决效率。

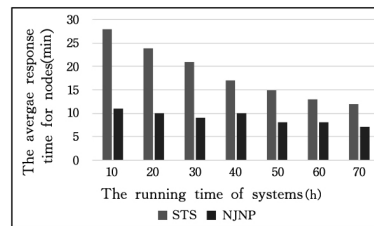


图 4 平均响应时间对比

### 3.4 等待队列的平均长度

等待队列的平均长度表示每一秒钟等待队列中的任务请求的数量,用来表明无线机器人的工作情况和传感器节点的任务等待情况。

从图 5 中可以很明显地看出,时间空间混合优先级的平均等待队列的长度总是稳定在 4 左右,然而最短距离优先抢占算法的平均等待队列长度要远远比前者大。越短的等待队列长度意味着越快的节点任务的完成速度和越持续的节点工作状态,这全面地表明了无线机器人的高效率。因此,这也证明了此算法的优越性。

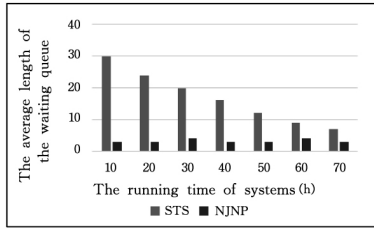


图 5 等待队列长度对比

### 3.5 任务解决成功率

如图 6 所示,虽然无论是在时间空间混合优先级调度算法还是在最短距离优先抢占算法中,无线机器人的任务解决成功率都在不断增加,但是时间空间混合优先级调度算法的任务解决成功率明显高于最短距离优先抢占调度算法的任务解决成功率。最短距离优先抢占调度算法的任务解决成功率增加的原因是传感器任务未能得到及时解决而导致有效节点数量减少,更少的节点才使得任务解决成功率变高。而在时间空间混合优先级调度算法中,任务解决成功率总是很高。

这表明无线机器人能够基本满足传感器节点的任务请求,有效地完成节点任务。因此,可以得出这样的结论,时间空间混合优先级调度算法能够提高无线机器人的任务解决成功率。

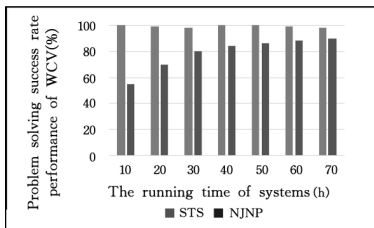


图 6 任务解决成功率比较

### 3.6 平均服务时间

平均服务时间是指无线机器人在为一个任务请求解决任务的过程中所花费的平均时间。平均服务时间能够在确定范围内说明分别在时间空间混合优先级调度算法和最短距离优先抢占算法下无线机器人的任务解决效率。

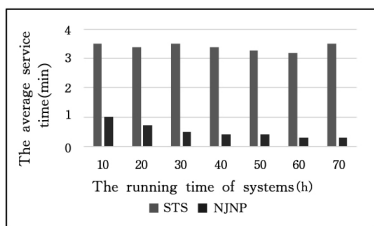


图 7 平均服务时间比较

如图 7 所示,很明显,最短距离优先抢占算法下的无线机器人的平均服务时间是在时间空间混合优先级调度算法下的 4~5 倍。换句话说,最短距离优先抢占算法(NJNP)下的无线机器人每完成一个任务请求就要比同等条件下的但采用时间空间混合优先级算法的无线机器人多花 3min 左右的时间。

所以能够得出:无线机器人的路径规划在时间空间混合优先级调度算法下得到了极大的优化,大量的节点任务能够在非常短的时间内得到响应,因此无线机器人的任务解决效率也得到了显著的提高。

平均服务时间本应由两部分组成:无线机器人从当前位置到任务节点的旅行时间和无线机器人为节点解决任务所消耗的时间。但是由于实际中后者与前者所消耗的时间相比差距很大,不会对实验的结果产生影响,同时本文中又是比较两个算法的优缺点,因此未将此因素纳入到实验中。所以本文中的平均服务时间就是指无线机器人从当前位置到任务节点的旅行时间。

结束语 文中,笔者为无线传感器网络中的点播式架构提出了一个调度算法——时间空间混合优先级调度算法。在时间空间混合优先级调度算法中,笔者将影响优先级的两个因素即时间因素和空间因素形成两个优先级队列,分别为距离队列和任务有效截止期队列;然后对两个队列进行初步运算得到初步任务调度顺序;接着提出距离密度的概念,再根据距离密度与时钟变量来确定具有相同一级混合优先级的任务请求的调度顺序,最后得出整个任务调度的顺序。此外,同时考虑时间空间因素可以避免单独考虑时间或单独考虑空间时所面临的极端问题。最后,笔者通过实验模拟对提出的算法进行了性能评估。通过分析实验结果数据,证明了提出的算法的有效性。实验结果表明,该任务调度算法在吞吐量、任务解决成功率、平均服务时间等方面的性能表现已经胜过了现有的模式——最短距离优先抢占调度算法。

本文所考虑的是无线传感器网络中只有一个无线机器人的情况,然而在现实的大规模无线传感器网络中,由单个无线机器人为所有节点解决任务显然是不可能的。因此,在未来的工作中,笔者会致力于在网络中同时存在多个无线机器人为传感器节点解决任务以及多个无线机器人之间相互协作等方面继续深入研究,进而提高无线机器人解决任务的效率。

### 参考文献

- [1] Pajic M, Sundaram S, Pappas G J, et al. The Wireless Control Network: A New Approach for Control Over Networks [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2011, 56(10): 2305-2318
- [2] Millian Y A, Vargas F, Molona F, et al. A Wireless Networked Control Systems review: Robotics Symposium[C]// 2011 IEEE IX Latin American and IEEE Colombian Conference on Automatic Control and Industry Applications (LARC). Bogota: IEEE, 2011: 1-6
- [3] Taylor J H, Ibrahim H M S. A new, practical approach to maintaining an efficient yet acceptably-performing wireless networked control system[C]// System Science and Engineering (ICSSSE), 2010. Taipei: IEEE, 2010: 269-274
- [4] Ferrari P, Flammini A, Rizzi M, et al. Improving simulation of wireless networked control systems based on Wireless HART [J]. Computer Standards & Interfaces, 2013, 35(6): 605-615
- [5] Tiber U, Fischione C, Johansson K H, et al. Energy-efficient sampling of networked control systems over IEEE 802.15.4 wireless networks[J]. Automatica, 2012, 49(3): 712-724
- [6] Wang Gang. Wireless remote control technology in intelligent buildings system[C]// World Automation Congress (WAC), 2012. Puerto Vallarta, Mexico: IEEE, 2012: 231-233

(下转第 300 页)

动节点和固定节点间消息的转发规律的基础上完善移动节点的缓存管理策略,使其更加适用于基础设施辅助的机会网络。

## 参考文献

- [1] Shahbazi S, Karunasekera S, Harwood A. Improving performance in delay/disruption tolerant networks through passive relay points[J]. *Wireless Networks*, 2012, 18(1): 9-31
- [2] Ying Z, Zhang C, Wang Y. Social based throwbox placement in large-scale throwbox-assisted delay tolerant networks [C]// 2014 IEEE International Conference on Communications (ICC). IEEE, 2014: 2472-2477
- [3] Li F, Yin Z, Tang S, et al. k-Throwbox placement problem in throwbox-assisted delay tolerant networks [C]// 2014 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). IEEE, 2014: 253-258
- [4] Li F, Yin Z, Tang S, et al. Optimization Problems in Throwbox-Assisted Delay Tolerant Networks: Which Throwboxes to Activate? How Many Active Ones I Need [J]. *IEEE Transaction on Computers*, 2016, 65(5): 1663-1670
- [5] Erramilli V, Crovella M. Forwarding in opportunistic networks with resource constraints [C]// Proceedings of the Third ACM Workshop on Challenged Networks. ACM, 2008: 41-48
- [6] 应俊, 杨慧婷, 王汝言. 带有相遇概率估计的机会网络缓存替换策略[J]. *上海交通大学学报*, 2015, 49(11): 1680-1684
- [7] 黄沛昱, 应俊. 消息替换风险动态感知的缓存管理策略[J]. *重庆邮电大学学报(自然科学版)*, 2014, 26(2): 233-237
- [8] Liu Y, Wang J, Zhang S, et al. A buffer management scheme based on message transmission status in delay tolerant networks [C]// 2011 IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 2011). IEEE, 2011: 1-5
- [9] Shin K, Kim S. Enhanced buffer management policy that utilises message properties for delay-tolerant networks[J]. *Communications, IET*, 2011, 5(6): 753-759
- [10] Iranmanesh S. A novel queue management policy for delay-tolerant networks[J]. *Eurasip Journal on Wireless Communications and Networking*, 2016, 2016(88): 1-23
- [11] Rashid S, Abdullah A H, Ayub Q, et al. Dynamic prediction based multi queue (DPMQ) drop policy for probabilistic routing protocols of delay tolerant network[J]. *Journal of Network and Computer Applications*, 2013, 36(5): 1395-1402
- [12] Liu Q, Li G, Li Y, et al. Cache scheduling policy for opportunistic networks based on message priority[J]. *Journal of Information and Computational Science*, 2013, 10(2): 621-632
- [13] Wu D, Zhou J, Zhang P, et al. Intelligent Dynamical Buffer Scheduling Mechanism for Intermittently Connected Mobile Network[J]. *Wireless Personal Communications*, 2013, 73(3): 1269-1288
- [14] Rashid S, Ayub Q, Abdullah A H. Reactive Weight Based Buffer Management Policy for DTN Routing Protocols[J]. *Wireless Personal Communications*, 2015, 80(3): 993-1010
- [15] Keränen A, Ott J, Kärkkäinen T. The ONE simulator for DTN protocol evaluation [C]// Proceedings of the 2nd International Conference on Simulation Tools and Techniques (ICST). 2009: 55
- [16] Pan D, Ruan Z, Zhou N, et al. A comprehensive-integrated buffer management strategy for opportunistic networks[J]. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2013, 2013(1): 1-10
- [17] Spyropoulos T, Psounis K, Raghavendra C S. Spray and wait: an efficient routing scheme for intermittently connected mobile networks [C]// Proceedings of the 2005 ACM SIGCOMM workshop on Delay-tolerant networking. ACM, 2005: 252-259
- [18] Ekman F, Keränen A, Karvo J, et al. Working day movement model [C]// Proceedings of the 1st ACM SIGMOBILE workshop on Mobility models. ACM, 2008: 33-40
- 
- (上接第 281 页)
- [7] Gao Yu-dong, Wu Jin-jie, Hu Min, et al. Design and Development of Hardware-in-Loop Simulation of Spacecraft Attitude Control System Based on Wireless Ad Hoc Networking [C]// Industrial Control and Electronics Engineering (ICICEE), 2012. Xi'an: IEEE, 2012: 584-587
- [8] Gurkan T, Gungor V C, Gulez K, et al. An autonomous wireless sensor network deployment system using mobile robots for human existence detection in case of disasters [J]. *Ad Hoc Networks*, 2012, 13(A): 54-68
- [9] 马新华, 容晓峰. 基于排队模型的无线传感器网络实时性能分析 [J]. *西安邮电大学学报*, 2009, 14(1): 112-115
- [10] Li Xu, Falcon R, Nayak A, et al. Servicing wireless sensor networks by mobile robots [J]. *Communications Magazine, IEEE*, 2012, 50(7): 47-54
- [11] 夏家莉, 陈辉, 杨兵. 一种动态优先级实时任务调度算法 [J]. *计算机学报*, 2012, 35(12): 2685-2695
- [12] Xie Li-guang, Shi Yi, Hou Y T, et al. On Traveling Path and Related Problems for A Mobile Station in A Rechargeable Sensor Network [C]// 14<sup>th</sup> ACM International Symposium on Mobile Ad hoc Networking and Computing (MobiHoc 2013), 2013. New York: ACM New York, 2013: 109-118
- [13] Dai Hai-peng, Wu Xiao-bing, Xu Li-jie, et al. Practical Scheduling for Stochastic Event Capture in Wireless Rechargeable Sensor Networks [C]// Wireless Communications and Networking Conference (WCNC 2013), 2013. Shanghai: IEEE, 2013: 986-991
- [14] Wang Yong-yan, Wang Qiang, Wang Hon-gan, et al. A Real-Time Scheduling Algorithm Based on Priority Table and Its Implementation [J]. *Software Journal*, 2004, 15(3): 360-370
- [15] He Liang, Gu Yu, Pan Jian-ping, et al. On-demand Charging in Wireless Sensor Networks: Theories and Applications [C]// 2013 IEEE 10th International Conference on Mobile Ad-Hoc and Sensor Systems (MASS) 2013. Hangzhou: IEEE, 2013: 28-36
- [16] Naghshtabrizi P, João P. Hesperia Wireless Networking Based Control [M]. New York: Springer New York, 2011: 1
- [17] Zou Cai-feng, Wan Jia-fu, Chen Min, et al. Embedded and Multimedia Computing Technology and Service [M]. Netherlands: Springer Netherlands, 2012: 269