

# 传感环境下一种启发式反监控路径搜索算法

陈 喆, 王 雷

(湖南大学 软件学院, 长沙 410082)

(i\_am\_co2@163.com)

**摘 要:**研究传感环境下移动对象的反监控问题,给出了三角形网格,穿行代价,搜索相关度等概念,基于 A\* 启发式路径搜索算法,提出了一种传感环境下启发式反监控路径搜索算法。理论分析和实验结果表明,与已有相关研究工作相比,新算法具有较好的反监控性能和较低的计算复杂度,从而使得移动对象能够快速找到一条到达目标位置点的安全路径。

**关键词:**传感器网络;反监控;启发式算法;三角形网格

**中图分类号:** TP393 **文献标志码:** A

## Heuristic anti-monitoring path searching algorithm in sensory field

CHEN Zhe, WANG Lei

(Software School, Hunan University, Changsha Hunan 410082, China)

**Abstract:** Focusing on the anti-monitoring problem of mobile object in sensory fields, new concepts such as triangle grid, cross cost, SRE were proposed, a novel heuristic anti-monitoring path searching algorithm in sensory field by utilizing A\* algorithm was designed. Theoretical analyses and experimental results show that, compared with conventional works, the new algorithm has better anti-monitoring performance and lower computation complexity, and can guarantee the mobile object move along the path with less risk to the destination position.

**Key words:** Wireless Sensor Network (WSN); anti-monitoring; heuristic algorithm; triangle grid

## 0 引言

无线传感器网络中,节点之间可以相互通信,自己组织成网并通过多跳的方式连接至 Sink(基站节点)<sup>[1]</sup>,像这样的路由问题,或者覆盖等问题,一直是无线传感器网络中的研究热点,但从被监控的移动物体的角度出发,如何针对传感器环境的反监控的研究才刚刚起步。所谓移动物体的反监控,是指利用移动物体所掌握的全局或者局部的传感器节点的分布信息,计算出一条风险程度最小,长度最短的路径。

在研究移动对象的反监控问题时,目前代表性的研究方法一般均首先采用基于网格(Grid)划分<sup>[2-4]</sup>或 VORONOI 划分<sup>[5-8]</sup>的策略来进行下一位置点的候选集合的确定,然后基于各自给出的路径暴露程度(Exposure Degree)的不同定义来进行下一位置点的选择,从而使得移动对象从源点位置出发并沿着一条风险尽可能最小的路径到达目标点位置。

在文献[4]中,首先基于 GRID 划分来进行下一位置点的候选集合的确定,然后将路径的暴露程度定义为移动对象沿路径移动时传感器网节点收集到的移动对象的总能量,并据此选择暴露程度最小的下一位置点来进行路由选择。而在文献[7]中,其路径的暴露程度定义为传感器网节点与路径之间的距离,在文献[2]中,路径暴露程度定义为传感器网节点发现移动对象的可能性大小。在文献[8]中,首先基于 VORONOI 划分来进行下一位置点的候选集合的确定,然后将路径暴露程度定义为传感器网节点收集到的移动对象的信号强度。就划分方式而言,VORONOI 划分虽然能够保证每一个传感器蜂窝内的任何点到本传感器节点的距离小于到任何临

近传感器节点的距离,但是 VORONOI 计算复杂度高。而在简单的正方形 GRID 网格划分中,每一网格内只有水平和垂直两条路径可供选择,从而增加了移动物体的行驶复杂度。在路径搜索算法上,在文献[2,5,6,8]中,路径搜索算法都是采用的 Dijkstra 最短路径搜索算法。Dijkstra 算法的思想是广度优先搜索,它是通过起点向四周发散的遍历搜索,最后找到目的点的一个过程。这在状态空间不大的情况下是很合适的算法,可是当状态空间较大时,它并不关心目的点的位置,只是穷尽所有的可选路径,降低了搜索的效率。

为了进一步提高算法的反监控性能并降低算法复杂度,首先采用了三角形网格对传感区域进行离散化划分,然后计算出每一个三角形网格边作为路径的穿行代价,再通过 A\* 启发式路径搜索算法得到传感环境中移动物体的穿行路径。最后,进行了仿真实验,分析了 A\* 算法的参数设置,传感区域内的传感器密度,传感器的传感半径的大小对最短路径搜索的影响。

## 1 网络模型和问题描述

传感器因使用途径不同,在物体特性,工作方式上存在比较大的差异,但是,绝对大多数传感装置的传感能力随着距离而降低,基于以上特性,对于传感器节点  $s$ ,其针对  $p$  处的移动物体的感知模型可表达为:

$$S(s,p) = \frac{\lambda}{[d(s,p)]^k} \quad (1)$$

其中: $d(s,p)$  是传感器节点  $s$  与移动物体  $p$  之间的 Euclidean 距离, $\lambda,k$  为环境变量。

收稿日期:2008-05-07;修回日期:2008-07-09。 基金项目:国家 863 计划项目(2006AA01Z2227)。

作者简介:陈喆(1984-),男,湖南邵阳人,硕士研究生,主要研究方向:计算机网络; 王雷(1973-),男,湖南长沙人,副教授,博士,主要研究方向:计算机网络。

由式(1)可知,当移动物体和传感器节点之间的距离大到一定程度,移动物体将逃避传感器节点的检测。为了方便理论分析,本文采用布尔感知模型,该模型被广泛应用于传感器网络的研究工作中<sup>[9]</sup>,在布尔感知模型中每个节点都具有一个固定的传感半径,每个传感器只能感知和发现其传感半径内的环境或者事件。并且,本文假设所有节点的传感半径相同,移动物体被传感器检测到,当且仅当其位于至少一个传感器节点的感知半径内。本文还假设所有的节点都被随机部署在一个二维长方形区域  $F$  中,移动对象  $T$  的源点位置为  $p_s$  目标位置为  $p_d$ ,即  $T$  需要找到并沿着一条从  $p_s$  出发尽可能不被  $F$  中部属的传感器节点发现的路径  $P = \{p_0 (= p_s), p_1, \dots, p_{n+1} (= p_d)\}$  到达  $p_d$ ,此外,对路径  $P$  的要求还有越短越好,从而降低风险。

## 2 相关定义和算法步骤

### 2.1 三角形网格

**定义 1** 三角形网格:设在长为  $l$ ,宽为  $h$  的方形区域  $A$  中,划分因子  $\rho$  为某正常数,且  $\text{MOD}(l, \rho) = 0$ ,  $\text{MOD}(h, \rho) = 0$ ,则在  $(l/\rho) \times (h/\rho)$  个正方形中,任意相邻的三个顶点和连接三个顶点的三条边构成一个三角形网格。

如图 1 中,在某  $60 \times 60$  的区域  $A'$  中随机分布着三个传感器节点  $s_1, s_2, s_3$ ,  $\rho = 20$ ,则共存在  $(60/20) \times (60/20) \times C_3^4$  个三角形网格,如顶点 00-01-04,00-01-05,00-04-05 以及 01-04-05 分别构成四个不同的三角形网格。

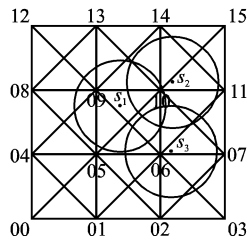


图 1 分布着三个传感器节点区域的带对角线正方形划分

**定义 2** 网格边:三角形网格的任意两个顶点之间的连线构成一条三角形网格的网格边。

**定义 3** 暴露强度:假定  $T$  经过路径网格边  $e(e_1, e_2)$  时,能检测到  $T$  的全部传感器节点为  $\Omega = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$ ,当  $\Omega$  为空时,网格边  $e(e_1, e_2)$  的暴露强度  $Q(e_1, e_2) = 0$ ;当  $\Omega$  不为空时,  $Q(e_1, e_2)$  定义如下:

$$Q(e_1, e_2) = \frac{\lambda \times n}{[\alpha \times d(s_{\min}, e(e_1, e_2)) + \beta \times d(s_{\text{ave}}, e(e_1, e_2))]}^{\sigma} \quad (2)$$

其中  $s_{\min} = \{s_m \mid d(s_m, e(e_1, e_2)) \leq d(s_j, e(e_1, e_2))\}$ ,  $s_m \in$

$$\Omega, \forall s_j \in \Omega \mid s_{\text{ave}} = \frac{\sum_{i=1}^n d(s_i, e(e_1, e_2))}{n}, s_i \in \Omega, \lambda > 0, \sigma >$$

$0, \alpha \geq 0, \beta \geq 0$  分别为技术、环境相关常量,且  $\alpha + \beta = 1$ 。

**定义 4** 穿行代价:假定  $T$  经过网格边  $e(e_1, e_2)$  从  $e_1$  移动到  $e_2$  时,  $e(e_1, e_2)$  的暴露强度为  $Q(e_1, e_2)$ ,  $e(e_1, e_2)$  的长度为  $L(e_1, e_2)$ ,则称  $CC(e_1, e_2) = Q(e_1, e_2) \times L(e_1, e_2)$  为网格边  $e(e_1, e_2)$  的穿行代价。

由定义 3,4 可知,网格边  $e(e_1, e_2)$  的穿行代价  $CC(e_1, e_2)$  随着网格边  $e(e_1, e_2)$  上暴露强度  $Q(e_1, e_2)$  以及路径的长度  $L(e_1, e_2)$  的增大而增大。

### 2.2 A\* 启发式路径搜索算法

A\* 启发式路径搜索算法,其核心思想是利用一个估价函

数评估每次的决策的价值,决定先尝试哪一种方案,这样可以优化普通的广度优先搜索,因为无论搜索展开到哪一步,都会算出一个评估值,每一次决策后,将评估值和等待处理的方案一起排序,然后挑出待处理的各个方案中最有可能是最短路线的方案展开到下一步,再重复以上过程,直到到达目的节点<sup>[10]</sup>。

A\* 算法中的基本估价是用估价函数  $f(n)$  表示的,  $f(n)$  由代表在状态空间中从初始节点到  $n$  节点的实际代价的  $g(n)$  和代表从  $n$  到目标节点最佳路径的估计代价  $h(n)$  组成,在本文中,  $g(n)$  定义为从初始节点到当前节点  $n$  所选取的三角形网格的网格边的穿行代价的累加,而  $h(n)$  定义为从当前节点  $n$  到目标节点  $p_d$  的 Euclidean 距离。由于在不同的技术环境下,启发函数中的实际代价和估计代价的权重对算法的效率将产生影响,为了保证算法的搜索效率,在本文中,对 A\* 启发函数的定义改进如下:

$$f(n) = \varepsilon \times g(n) + \omega \times h(n) \quad (3)$$

其中  $\varepsilon \geq 0$  和  $\omega \geq 0$ , 分别为  $g(n)$  和  $h(n)$  权重因子。

### 2.3 基于三角形网格启发式反监控路径搜索算法步骤

假定移动对象  $T$  需要从源点位置  $p_s$  通过传感区域  $F$  到达目标点位置  $p_d$ , 基于上述相关定义,基于三角形网格启发式反监控路径搜索算法 (THAP 算法) 可表述如下:

Procedure of Triangle Grid Based heuristic Anti-monitoring Path Searching Algorithm

THAP (  $p_s, p_d$  ) {

1) 对目标区域  $F$  进行的三角形网格划分

2) For each 网格边  $e(a, b)$

根据公式计算其穿行代价  $CC(a, b)$

End For

3) 利用 A\* 算法, 计算出从源点  $p_s$  到目的地  $p_d$  的最短路径  $P$

4) 返回最短路径  $P$

}

## 3 算法分析与实验结果

### 3.1 算法分析

**定理 1** 假定传感区域为  $F$  中部署的传感器节点的个数为  $n$ ,  $F$  中任意传感器节点的监控半径都相等且为  $r_s$ , 则在最坏的情况下, 算法 THAP 的计算复杂度不超过  $O(n^2)$ 。

**证明** 由于  $F$  中的传感器节点的个数为  $n$ , 则某三角形网格边上最多暴露  $n$  个传感器节点, 由式(2)可知:  $\Omega$  最多包含  $n$  个传感器节点, 再由定义 1 可知, 三角形网格边的数量和三角形网格的个数成线性比例, 故生成所有三角形网格边暴露程度的算法时间复杂度最高为  $O(n^2)$ 。在路径搜索算法上, A\* 的时间复杂度最高也为  $O(n^2)$ 。综上所述, 算法 THAP 的计算复杂度不超过  $O(n^2)$ 。

### 3.2 实验结果

为了进一步分析算法 THAP 的性能, 本节采用 Java 编写实验程序, 在 Pentium 4 3.06 GHz, 512 MB, Windows XP 系统环境下进行了仿真实验。在模拟实验中, 首先对 A\* 算法的权重因子  $\varepsilon$  和  $\omega$  对算法的影响进行实验分析。为简化起见, 设定传感区域  $F$  为一个长  $\times$  宽为  $600 \times 500$  的长方形区域, 移动物体将从位置点  $p_s(20, 20)$  移动到位置点  $p_d(580, 480)$ , 划分因子  $\rho = 500$ , 区域  $F$  内随机分布着 200 个传感器节点, 传感器节点的传感半径为 20。式(1)和(2)中的参数取值  $\lambda = 0.05$ ,  $\sigma = 1$ 。图 2 ~ 7 给出了 A\* 的权重因子  $\varepsilon$  和  $\omega$  取值不同时的路径搜索情况, 其中灰色部分代表本搜索过的区域, 黑色

线条代表最后生成的反监控穿行路径。



图2 路径搜索情况( $\varepsilon = 0 \omega = 1.0$ )

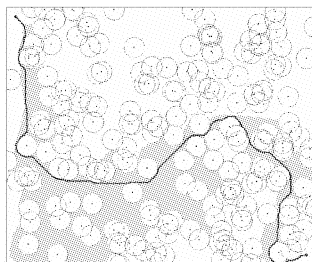


图3 路径搜索情况( $\varepsilon = 1.6 \omega = 1.5$ )

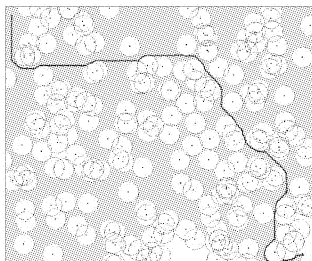


图4 路径搜索情况( $\varepsilon = 2.4 \omega = 0$ )

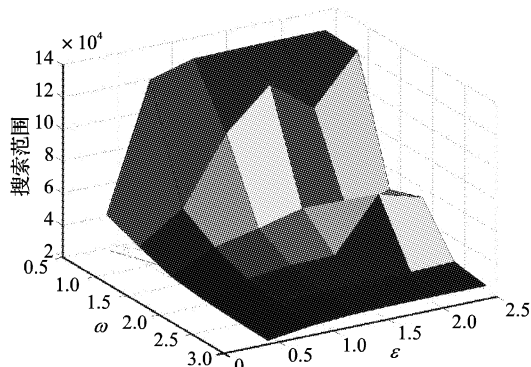


图5  $\varepsilon$  和  $\omega$  与搜索面积的关系

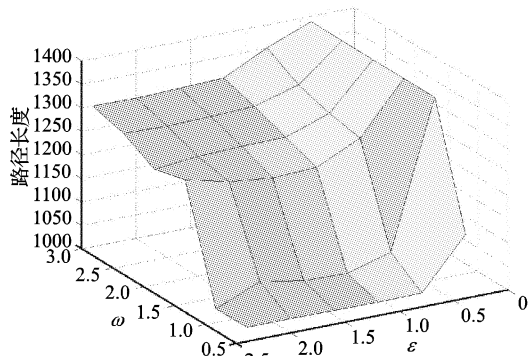


图6  $\varepsilon$  和  $\omega$  与最优路径的关系

从以上图中可以看出,算法中A\*的权重因子 $\varepsilon$ 和 $\omega$ 对算法搜索结果有较大的影响。特别地,当 $\omega = 0$ 时(如图7所示),新算法就是文献[2,5,6,8]中使用的Dijkstra路径搜索算法,即文献[2,5,6,8]中使用的Dijkstra路径搜索算法为本文所提出的算法的一种特例,可见采用新算法的搜索性能要

明显优于采用Dijkstra算法的搜索性能。

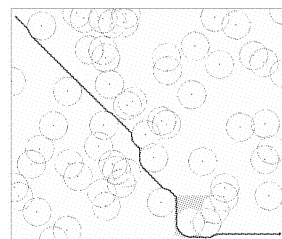


图7 传感器节点60,传感半径30

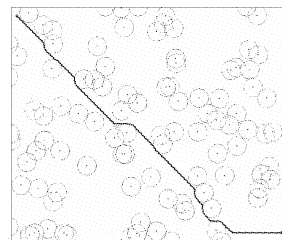


图8 传感器节点100,传感半径20

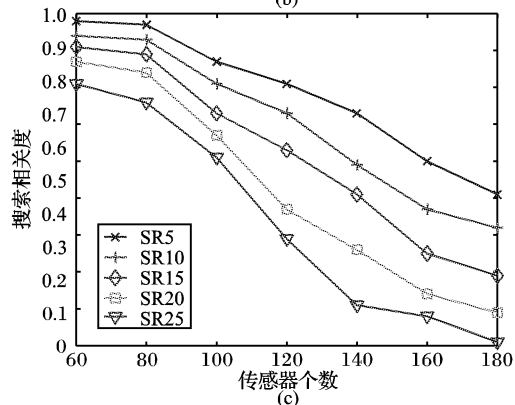
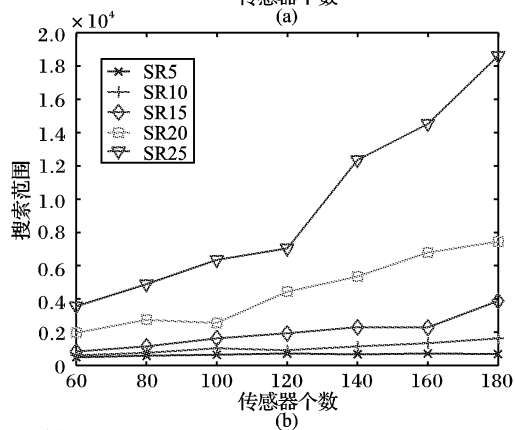
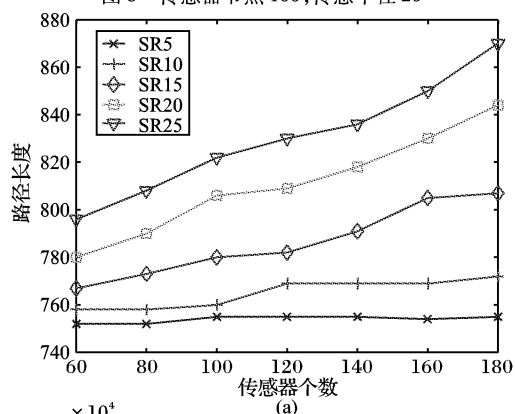


图9 算法结果 VS 传感器个数和传感半径

为了更准确地分析权重因子的取值与搜索范围和搜索出的最优路径的关系,图8~9给出了更多的量化分析实验结果。

从图 5 ~ 6 可知,当  $\varepsilon$  很小时,搜索算法尽可能要接近目标节点,而不关心从初始节点到当前行驶节点路径的代价,随着  $\varepsilon$  的增大,算法对降低移动物体从初始节点到当前行驶节点穿越代价的要求也随之增高,从而能够保证移动物体获得更为安全的反监控路径,但同时,不可避免地也增加了搜索范围,降低了算法效率。而本算法随着  $\omega$  的增大,启发式算法中的启发权重也就越大,此时,算法拥有较高的执行效率,但不保证能为移动物体找到最优的反监控路径;当  $\omega$  的取值较小时,启发式算法中的启发权重也就较小,此时,算法趋向于盲目的搜索路径而导致算法的低效率。

通过数据比较,取搜索范围和路径实际优劣程度达到均衡较优的权重因子  $\varepsilon = 1$  和  $\omega = 1$ , 算法的搜索范围比 Dijkstra 路径搜索算法缩小约 40%。

为了进一步揭示在传感环境中  $A^*$  算法的搜索区域和实际生成的反监控路径的关系,下面首先给出相关定义:

**定义 6** 搜索相关度:假定  $A^*$  算法执行完成后,生成的最优路径  $\psi$  由  $m$  个三角形网格顶点  $p_1, p_2, \dots, p_m$  构成,即  $\psi = \{p_1, p_2, \dots, p_m\}$ , 而访问过的三角形网格顶点集合为  $\Phi = \{C_1, C_2, \dots, C_n\}$ , 则算法的搜索相关度 (Searched Related Extend, SRE) 定义为:

$$SRE = \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n \frac{\gamma}{[d(p_{\min}, C_i) + 1]^o} \quad (4)$$

其中  $p_{\min} = \{p_m \mid d(p_m, C_i) \leq d(p_j, C_i), p_m \in \psi, \forall p_j \in \psi\}$ 。 $\gamma, o$  为技术环境常量。

为了更进一步地验证算法的优越性,下面对区域中随机部署的传感器节点个数,传感半径变化的情形下,从  $p_s$  到  $p_D$  的反监控路径长度和搜索相关度 SRE 的变化情况进行了模拟实验。为了简化起见,区域  $F$  仍为长  $\times$  宽为  $600 \times 500$  的长方形区域,移动物体将从位置点  $p_s(20, 20)$  移动到位置点  $p_D(580, 480)$ , 划分因子  $\rho = 500$ , 式(1)和(2)中的参数取值  $\lambda = 0.05, \sigma = 1$ , 式(4)中的  $\gamma = 1, o = 1$ , 基于前面的分析,搜索算法的权重因子取  $\varepsilon = 1$  和  $\omega = 1$ , 且实验结果均取 50 次独立实验平均值。

图 7 ~ 8 显示了传感区域  $F$  内,随机分布着 60 个传感器节点,每个传感器节点的传感半径都为 30 和 100 个传感器节点,每个传感器节点的传感半径都为 20 的情况下,算法搜索反监控路径的结果。不难发现,算法仅仅搜索了很小的范围便生成了反监控路径。为了更具体地分析传感器的传感半径,传感器节点个数与搜索面积,路径长度, SRE 之间的关系,下面给出更多的实验结果和数据分析。

图 9(a)描述了传感器的节点个数和传感器的传感半径与搜索范围的关系,图 9(b)描述了传感器的节点个数和传感器的传感半径与生成的反监控路径长度的关系,图 9(c)描述了传感器的节点个数和传感器的传感半径与搜索相关度 SRE 的关系。

从图 9 可以看出,随着目标区域内分布的传感器节点个数

的增多和传感半径的扩大,算法需要访问更大面积的区域来获得较优的反监控路径,当目标区域的覆盖率很高时,法的搜索开销较大;而当目标区域内分布的传感器节点较为稀疏,或传感半径较小时,算法访问的网格顶点节点较少,其搜索相关度较高,移动物体只需要当前位置探测到的传感器节点的  $40 \times 33$  分布情况,便能很好地完成局部的反监控路径的生成。显然可知,当目标区域覆盖率较低的情况下,本算法可通过适当的变化应用于通过局部信息动态获得反监控路径的情况。

## 4 结语

基于三角形网格划分,利用  $A^*$  启发式路径搜索算法探索了传感环境下如何得到移动物体反监控穿行路径的问题,理论分析和实验数据表明,算法较以往的工作能够提高效率并能得到更优的反监控路径,保证了移动物体能以更安全更快速的方式通过传感区域。另外,本算法同样具有很好的扩展性来适应分布式的应用。

## 参考文献:

- [1] 林亚平,王雷,陈宇,等. 传感器网络中一种分布式数据汇聚层次路由算法[J]. 电子学报, 2004, 32(11): 1801 - 1805.
- [2] PHIPATANASUPHORN V, RAMANATHAN P. Vulnerability of sensor networks to unauthorized traversal and monitoring[J]. IEEE Transactions on Computers, 2004, 53(3): 364 - 369.
- [3] 姚焯善,王雷,汤念,等. 基于正三角形剖分的传感器网络快速 k-覆盖判定算法[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(10): 2366 - 2369.
- [4] MEGUERDICHIAN S, KOUHANFAR F, QU G, et al. Exposure in wireless Ad Hoc sensor networks[C]// Proceedings of the 7th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. New York: ACM Press, 2001: 139 - 150.
- [5] 张文哲,李明禄,伍民友. 一种基于局部 Voronoi 图的目标穿越算法[J]. 软件学报, 2007, 18(5): 1246 - 1253.
- [6] RAHMAN M M, HONG C S. Probabilistic exposure identification for wireless sensor network[C]// Proceedings of the 26th KIPS Fall Conference 2006. Cheongju, Korea: [s. n.], 2006: 1359 - 1362.
- [7] MEGUERDICHIAN S, KOUHANFAR F, POTKONJAK M, et al. Coverage problems in wireless Ad Hoc sensor networks[C]// Proceedings of Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies: INFOCOM 2001. New York: IEEE Press, 2001: 1380 - 1387.
- [8] VELTRI G, HUANG Q, QU G, et al. Minimal and maximal exposure path algorithms for wireless embedded sensor networks[C]// Proceedings of the 1st International Conference On Embedded Networked Sensor Systems. New York: ACM Press, 2003: 40 - 50.
- [9] TIAN D, GEORGANAS N. A coverage-preserving node scheduling scheme for large wireless sensor networks[C]// Proceedings of the 1st International Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications: WSNA 2002. Atlanta: ACM Press, 2002: 32 - 41.
- [10] NILSSON N J. Problem solving methods in artificial intelligence, artificial intelligence: A new synthesis[M]. San Francisco, CA, USA: Morgan Kaufmann Publishers Inc, 2000.

(上接第 2766 页)

- [5] YANG GUANG, WANG REN, SANADIDI M Y, et al. TCPW with bulk repeat in next generation wireless and satellite networks[C]// Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Communications. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2003: 674 - 678.
- [6] 彭华,邓亚平. 基于 TCP Westwood 的一种 TCP 增强算法[J]. 计算机应用, 2006, 26(6): 221 - 223.
- [7] BRAKMO L S, O'MALLY S W, PETERSON L L. TCP Vegas: New techniques for congestion detection and avoidance[C]// Proceedings of the 1994 Conference on Communications Architectures, Protocols And Applications. New York: ACM Press, 1994: 24 - 35.
- [8] 李士宁,方济平,覃征. 一种动态门限变速增加的 TCP 慢启动算法[J]. 西安电子科技大学学报: 自然科学版, 2006, 33(4): 640 - 645.
- [9] KLAZOVICH D, GRANELLI F, MIORANDI D. TCP westwood + enhancement in high-speed long-distance networks[C]// Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Communications. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2006: 710 - 715.
- [10] FU CHENG-PENG, LIEW S C. TCP Veno: TCP enhancement for transmission over wireless access networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2003, 21(2): 216 - 228.