

非均匀数据产生率的传感器网络的节能算法

宋 超¹, 刘 明¹, 陈贵海², 龚海刚¹

(1. 电子科技大学计算机科学与工程学院, 四川成都 610054;

2. 南京大学计算机软件与新技术国家重点实验室, 江苏南京 210093)

摘 要: 无线传感器网络中的能量洞问题是影响网络寿命的关键因素之一. 在基于环模型的多跳传感器网络中, 通过优化所有环的传输距离可以有效地延长网络寿命. 针对非均匀数据产生率的传感器网络, 用建立环关系表的方式以搜索近似最优的传输距离从而延长网络寿命, 在降低搜索(算法)复杂度的同时得到与最优解近似的结果. 模拟实验证明了采用此节能算法的网络寿命逼近于理想最优序列下的网络生命时间, 并且与已有的文献算法相比, 可以延长网络寿命.

关键词: 无线传感器网络; “能量洞”问题; 多目标优化问题

中图分类号: TP393 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2011) 04-0791-05

Energy-Efficient Algorithm in Sensor Networks with Non-Uniform Data Generating Rate

SONG Chao¹, LIU Ming¹, CHEN Gui-hai², GONG Hai-Gang¹

(1. School of Computer Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China;

2. State Key Laboratory for Novel Software Technology, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210093, China)

Abstract: In wireless sensor networks (WSNs), energy hole problem is a key factor for affecting the lifetime of networks. In a circular multi-hop sensor network (modeled as concentric coronas), the optimal transmission ranges of all coronas can effectively improve system lifetime. For the WSN with non-uniform data generating rate, an energy-efficient algorithm for non-uniform data generating rate (EANR) can search approximate optimal transmission ranges of all coronas in order to prolong network lifetime by constructing coronas relationship table. EANR can reduce the searching complexity and get results approximated to the optimal solution. The simulation results indicate that the lifetime got from EANR approximates to the lifetime from the optimal list. Compared with the algorithms in other literatures, EANR can prolong the network lifetime.

Key words: wireless sensor network (WSN); energy hole problem; multi-objective optimization problem (MOP)

1 引言

传感技术、无线通信技术和计算机技术(包括硬件、软件和相应算法)等技术的进步, 推动了无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN)的快速发展. 传感器网络的应用前景非常广泛, 例如山崩预测^[1]、目标定位^[2]、监视^[3,4]等等. 然而, 由于传感器体积很小, 所携带的电池也就非常有限, 且网络部署的地区, 往往都是难以更换电池或者充电, 如火山口、雨林深处、深海区域、太空等等. 因此, 有限能量是传感器网络的最重要的特点, 高

效利用能量以延长网络寿命是它面临的重要挑战, 很多研究^[5~7]提出了各种节能的算法. 当前的传感器网络的路由算法在节能方面仍存在着尚未解决的问题.

通常, 传感器网络与外界的接口是一个或多个汇聚节点(sink node), 传感器节点将感应的数据收集起来以多跳的方式传输给最近的汇聚节点. 然而, 最近的研究^[8~13]发现, 离汇聚节点越近的传感器节点传输的数据量就越大, 消耗能量也就越快, 这种现象被称为在汇聚节点周围形成的能量洞(Energy hole). 当汇聚节点周围出现能量洞时, 能量洞外围的传感器将不能够传输

任何数据到汇聚节点.故网络中会有大量的剩余能量被浪费,而网络寿命也会过早地被终结.文[9]中的实验结果显示,当一个传感器网络寿命结束时,所有节点的总能量剩余会超过 90%.因此,如何更有效地提高能量利用率,如何延长网络寿命,成为了值得关注的內容.

现在关于能量洞问题的研究几乎都是假设所有传感器节点均产生相同频率和相同大小的 CBR(constant bit rate)数据,然而,在很多应用中,不同区域内的传感器节点产生的 CBR 数据可能是不相同的.如图 1(a)所示的监控区域内,中心点是汇聚节点,越靠近汇聚节点的区域被认为是越危险地区域,因此这些区域内的传感器节点采集数据的质量就要求越高,因此单位时间内产生的 CBR 数据量就越大.所以,整个范围内不同区域内的传感器节点的数据产生率是不相同的.另外,还有一些场景,例如环境监测等,如图 1(b)所示,会在不同的区域监测不同类型的数据,包括温度、湿度、光强度、风向等等,因为这些数据的类型和需求不同,所以这些区域收集数据的频率和大小都是不同的,收集的数据会以多跳的形式在传感器网络中向汇聚节点传递.因此,本文针对这种非均匀数据产生率的传感器网络进行了研究,分析这种环境下的能量洞问题,并提出相应的节能算法.

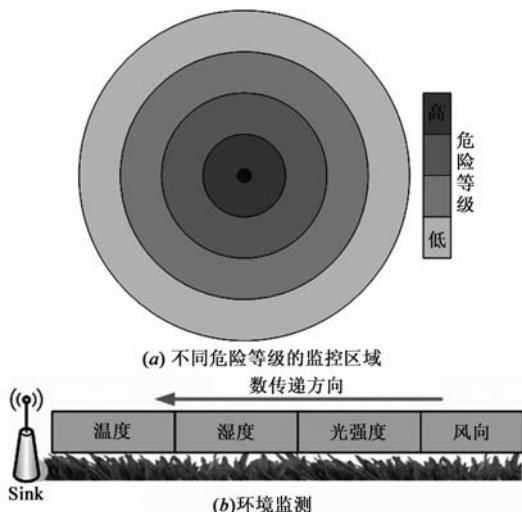


图1 非均匀数据产生率的传感器网络

在前面的工作^[14]中,我们研究了可以通过最优传输距离序列来延长网络寿命,并证明了搜索最优传输距离序列的问题是一个多目标问题(MOP).本文我们基于各环采用不同传输距离下环之间的关系建立了表格,从而提出一种针对非均匀数据产生率的节能算法(Energy-efficient algorithm for non-uniform data generating rate, EANR).仿真实验显示在非均匀数据产生率的网络下,该算法有效地利用了剩余能量,延长了传感器网络的寿命,并且接近理想最优情况下的性能.

2 相关工作

为了能够平衡所有环的能量消耗,Olariu 和 Stojmenović 在文献[8]中描述了计算各环大小的迭代算法过程.虽然平衡各环的能量消耗能够减轻能量洞问题,但最优化网络寿命对于无线传感器网络会更有价值.得出结论,为了能够最小化从环中传感器到汇聚节点的路由路径上的能量消耗,所有环的宽度必须相同.

Wu 和 Chen 在文献[15]中提出了一种非均匀的节点分布策略用于实现网络中的次平衡能量消耗(sub-balanced energy depletion),即从外环 C_{R-1} 到内环 C_1 中的节点数按照比率为 $q > 1$ 的几何级增长,并且在最外环 C_R 中有 $N_{R-1}/(q-1)$ 个节点,从而实现了网络的次平衡能量消耗,其中 R 为总环数, N_i 是指环 C_i 中的节点数.但是这种非均匀的节点分布策略在实际中较难实现,因为大多数情况下节点的部署都是随机的,局部区域的节点密度难以控制.

Jary 和 Leone 等人^[16]提出了一种混合式策略用于平衡各区域的能量消耗以延长网络寿命,即通过算法分配环内一部分节点直接发送数据到汇聚节点,而另一部分节点则通过多跳的方式接力传递到汇聚节点,两部分比例是根据算法调节的.但作者提出的算法仅用于所有传感器都能直接传递数据到汇聚节点的情况,即任何一个传感器到汇聚节点的距离均小于其最大传输距离,对于网络区域半径大于传感器最大传输距离的情况就不适合了.

3 网络模型与问题分析

本节将介绍采用的网络模型,在已有的环模型基础上引入分级思想,用于分析各环内节点采用不同的传输距离的情况.并在该模型下分析非均匀数据产生率的传感器网络下的能量洞现象,寻找解决能量洞问题的有效方法.

3.1 网络模型

与文献[14]相同的是,在本文的传感器网络中,所有传感器节点均静止不动,各传感器初始能量均为 $\epsilon > 0$ 且不能补充,每个传感器的最大传输距离均为 t_x . Li 和 Mohapatra 在文献[17]中给出了系统寿命的定义,即从开始直到一部分传感器节点死去的时间,我们定义网络中一个环的传感器寿命结束是指当该环不能够转发任何数据或发送其自己的数据的时候,本文定义的网络寿命是指从开始直到第一个环的传感器寿命结束.另外,所有传感器都按照一个特定的频率发送它们感应的数据,不同区域里的节点采用不同的频率.

本文采用的能量模型与文献[14, 17]相同,能量消耗公式如下:

$$E_{trans} = (\beta_1 + \beta_2 d^\alpha) l \quad (1)$$

$$E_{rec} = \beta_3 l \quad (2)$$

其中 E_{trans} 表示节点发送数据消耗的能量, E_{rec} 表示节点接收数据消耗的能量, l 表示每个传感器节点产生和发送数据的频率, α 取值 2 或 4, d^α 部分是路径消耗所导致的, 即发送距离越远, 能量消耗就越大. 根据文献[17], 本文采用如下参数值的设定:

$$\beta_1 = 45 \times 10^{-9} \text{ J/bit},$$

$$\beta_2 = 10 \times 10^{-12} \text{ J/bit/m}^2 \text{ (当 } \alpha = 2 \text{)},$$

$$\text{或 } \beta_2 = 0.001 \times 10^{-12} \text{ J/bit/m}^4 \text{ (当 } \alpha = 4 \text{)},$$

$$\beta_3 = 135 \times 10^{-9} \text{ J/bit}.$$

3.2 问题分析

为了节省能量, 传感器能够使用不同的传输距离 (如图 2 所示). 为了简化问题, 我们将最大传输距离 t_x 分成 k 个等级, 即每个传感器都有 k 种传输距离可以选择, 其中单位传输距离用 d 表示, 则有:

$$d = t_x / k \quad (3)$$

将整个半径为 R 的区域分成 m 个相邻的同心环 (如图 3 所示), 训练方法参考文献[13]. 每个环的宽度为 d . 第 i 个环用 C_i 表示, 环 C_i 是包括到汇聚的距离在 $(i-1)$ 至 i 个单位传输距离之间的节点. 因此有:

$$m = R / d \quad (4)$$

假设同一环内的所有节点采用相同的传输距离, 称为该环的传输距离, 而不同环的节点可以采用不同的传输距离. 因此当一个环的传输距离是 i 个单位传输距离时, 其传感器的传输距离为:

$$i \times d = i \times (t_x / k) \quad (5)$$

x_i 表示环 C_i 中节点的传输距离, 以 d 为单位, 令 N_i 表示环 C_i 中的节点个数, S_i 表示直接发送数据到环 C_i 的所有环的序号组成的集合, 即,

$$S_i = \{k | k - x_k = i, k = 1, 2, \dots, m\} \quad (6)$$

每个环除了要传输自己环内产生的数据, 还要转发外环生成的数据, D_{reci} 表示单位时间内环 C_i 中的节点接收外环的数据, 因此,

$$D_{reci}(\vec{x}) = \begin{cases} \sum_{j \in S_i} (N_j L_j + D_{recj}), & \text{if } S_i \neq \phi \\ 0, & \text{if } S_i = \phi \end{cases} \quad (7)$$

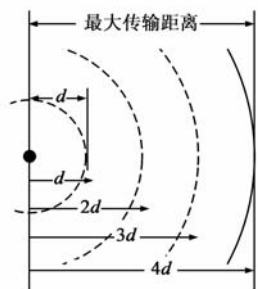


图2 可调的传输距离

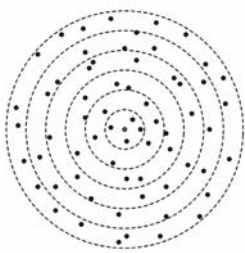


图3 同心环

与前面工作^[14]不同的是, 为了研究非均匀数据产生率的传感器网络, 假设环 C_i 内传感器节点在单位时间内生成并发送 L_i bits 的数据. 那么, 根据 3.1 节的能量公式, 环 C_i 传输自己产生的数据所消耗的能量是:

$$E_{transi}(\vec{x}) = N_i L_i [\beta_1 + \beta_2 (x_i d)^\alpha] \quad (8)$$

环 C_i 转发外环的数据消耗的能量包括两部分, 即接收数据消耗的能量和发送数据消耗的能量. 根据 3.1 节的能量公式, 环 C_i 中转发外环生成的数据时所消耗的总能量是:

$$E_{forwardi}(\vec{x}) = D_{reci}(\vec{x}) [\beta_1 + \beta_2 (x_i d)^\alpha + \beta_3] \quad (9)$$

E_i 表示单位时间里环 C_i 消耗的总能量, 包括了发送自己产生的数据消耗的能量和转发外环数据消耗的能量, 因此有:

$$E_i(\vec{x}) = E_{transi}(\vec{x}) + E_{forwardi}(\vec{x}) \quad (10)$$

代入公式(8)、(9), 有:

$$E_i(\vec{x}) = N_i L_i [\beta_1 + \beta_2 (x_i d)^\alpha] + D_{reci}(\vec{x}) [\beta_1 + \beta_2 (x_i d)^\alpha + \beta_3] \quad (11)$$

$$T_i \text{ 表示环 } C_i \text{ 的寿命, 因此有: } T_i(\vec{x}) = \frac{\epsilon N_i}{E_i(\vec{x})} \quad (12)$$

然而在各环采用不同数据产生率的网络下, 该公式就要改写为:

$$T_i(\vec{x}) = \frac{\epsilon N_i}{N_i L_i [\beta_1 + \beta_2 (x_i d)^\alpha] + D_{reci}(\vec{x}) [\beta_1 + \beta_2 (x_i d)^\alpha + \beta_3]} \quad (13)$$

因此, 我们可以看到影响网络寿命有四个因素, 分别是各环的传输距离、节点数、数据产生率以及接收数据量, 然而其中各环接收的数据量是由其外环的传输距离、节点数和数据产生率所决定的. 因此, 我们通过调整各环内节点的传输距离来延长网络的寿命, 而各环内节点的传输距离组成的序列称为传输距离序列.

4 非均匀数据产生率的传感器网络的节能算法

本节我们讨论如何通过搜索传输距离序列来延长网络寿命. 我们提出了一个针对非均匀数据产生率的节能算法 EANR (Energy-efficient algorithm for non-uniform data generating rate), 它是一种从内环向外环逐步搜索网络寿命局部最优的序列的算法. 因为在能量洞问题中, 环号小的内环会比环号大的外环有更短的生命时间. 因此, 算法 EANR 采取优先考虑内环的转发关系, 建立较好的序列, 逐步往外环推, 使得外环传输距离的选择要适应内环传输距离的分配情况. 在节点均匀分布或者非均匀决定性分布^[15]的情况下, 在节点部署前, 基于部署信息, 例如区域半径、节点密度、各环数据产生率等, 我们通过 EANR 算法获得传输距离序列. 部署后, 各

环内节点按照传输距离序列路由传输数据. 算法 EANR 中包含了一种集合 S_i , 它是由 i 个环的序列组成的集合, 其网络寿命接近于 i 个环的最优序列, 参数 $MAXCOUNT$ 表示集合 S 中序列数量的上限.

算法 EANR 的具体步骤如下:

(1) 为网络中所有环建立环关系表 (如图 4 所示). 清空每个集合 $S_i (1 \leq i \leq m)$. 添加环 C_0 到集合 S_0 中, 设 $i = 0$;

(2) $i = i + 1$. 添加环关系表中环 C_i 对应行里各下一跳环到集合 S_{i-1} 中的每条序列中组成临时序列. 不难看出, 若环 C_i 有 q 个环可作为下一跳, 集合 S_{i-1} 中有 p 条序列, 就会有 $q \times p$ 条临时序列. 计算所有生成的临时序列的网络寿命;

(3) 设 T_{\max} 为步骤 (2) 中得到的所有临时序列中的最长网络寿命. 添加网络寿命在从 T_{\max} 到 $T_{\max} \times (1 - TIMERANGE)$ 之间临时序列到集合 S_i 中. 其中, 参数 $TIMERANGE$ 表示 T_{\max} 的百分比, 用于决定选择添加到

	1d	2d	3d	4d
C_1	C_0			
C_2	C_1	C_0		
C_3	C_2	C_1	C_0	
C_4	C_3	C_2	C_1	C_0
C_5	C_4	C_3	C_2	C_1
C_6	C_5	C_4	C_3	C_2

图4 环关系表

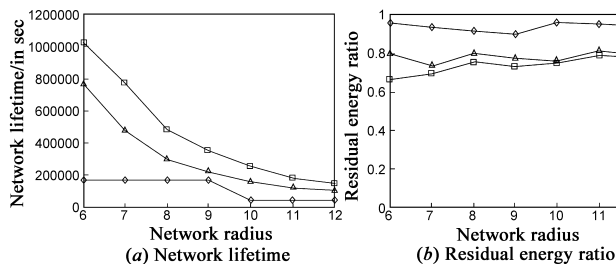


图5 数据产生率从内环向外逐渐增加

我们比较从内环向外环数据产生率逐渐增加的传感器网络, 环 C_1 每秒钟产生 100bits 数据, 其余外环每秒钟产生的数据量依次递增 20bits, 例如环 C_2 每秒钟产生 120bits 数据, 环 C_4 每秒钟产生 160bits 数据. 图 5 显示了这种网络在不同算法下的网络寿命和能量剩余率. 可以看出无论是网络寿命还是能量剩余率, 算法 EANR 都明显优于 T_x 算法, 并且接近理想最优的情况.

前面的实验是针对环数小于 12 的小规模网络, 然而在大规模的网络下难以穷举所有可能的传输距离序列, 因此只能将 EANR 算法与现有的算法进行比较. 在均匀节点分布情况下, 我们将 EANR 与 T_x 进行比较实验, 其中环 C_1 每秒钟产生 200bits 数据, 其余外环每秒钟产生的数据量依次递增 20bits. 图 6 显示了两种算法下的网络随着环数的增加其生命时间和平均能量剩余率的变化. 可以看出与图 5 相似, 在大规模的网络下 EANR 算法获得的网络寿命和平均能量剩余率都明显优于 T_x 算法.

集合 S_i 中的临时序列的范围. 如果被添加的临时序列的数量大于参数 $MAXCOUNT$ 时, 将它们按网络寿命大小排序, 仅选择寿命最大的 $MAXCOUNT$ 条临时序列到集合 S_i 中;

(4) 如果 i 等于总环数 m , 那么选择集合 S_m 中网络寿命最长的序列作为最终结果; 否则, 回到步骤 (2) 中进入下一个循环.

5 仿真实验

在仿真实验中, 每个传感器节点的初始能量 (ϵ) 为 50J, 传感器节点的最大传输距离 (t_x) 为 5m, 划分最大传输距离的等级数 (k) 为 4, 节点均匀分布, 密度为每平方米 5 个节点, 算法 EANR 中的参数 $MAXMINCOUNT$ 为 200, 参数 $MINRANGE$ 为 0.5, 在 3.1 节的能量公式中的参数 α 值为 4.

我们将 EANR 与另外两种不同算法比较, 分别是: Optimal, 通过枚举算法计算所有可能传输距离序列, 选择其中最优的序列; T_x , 文献 [8] 中提出的算法, 所有环中节点必须采用相同的传输距离, 即最大传输距离 T_x , 并且所有离汇聚节点距离小于的须直接发送数据到汇聚节点.

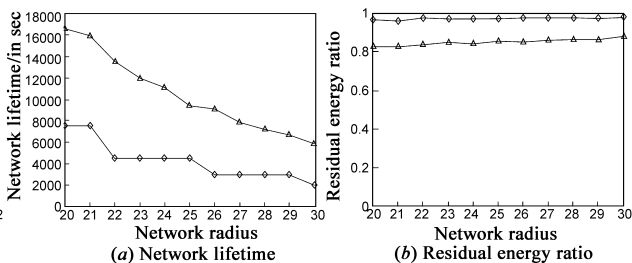


图6 20环以上网络

6 小结

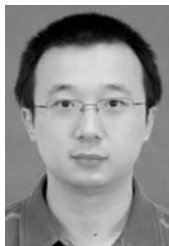
能量洞问题大大缩短了传感器网络的寿命, 并导致网络中大量能量剩余. 针对非均匀数据产生率的传感器网络, 分析影响网络寿命的因素, 提出一种节能算法 EANR, 用建立环关系表的方式以搜索具有较好网络寿命的序列. 通过仿真试验结果看到 EANR 算法能够较好地延长无线传感器网络的寿命, 与理想最优情况下的网络寿命很接近, 且优于已有文献获得的网络寿命.

参考文献

- [1] A Terzis, A Anandarajah, K Moore. Slip surface localization in wireless sensor networks for landslide prediction [A]. Proceedings of ACM/IEEE IPSN [C]. New York: ACM, 2006. 109 - 116.
- [2] M Li, Y Liu. Rendered path: Range-free localization in anisotropic sensor networks with holes [A]. Proceedings of

- ACM MobiCom[C]. New York: ACM, 2007. 51 – 62.
- [3] S Kumar, T H Lai, A Arora. Barrier coverage with wireless sensors[A]. Proceedings of ACM MobiCom[C]. New York: ACM, 2005. 284 – 298.
- [4] A Chen, S Kumar, T H Lai. Designing localized algorithms for barrier coverage[A]. Proceedings of ACM MobiCom[C]. New York: ACM, 2007. 63 – 74.
- [5] 周贤伟, 覃伯平. 基于能量优化的无线传感器网络安全路由算法[J]. 电子学报, 2007, 35(1): 54 – 57.
- [6] 刘亮, 秦小麟, 戴华, 严伟中, 潘锦基. 能量高效的无线传感器网络时空查询处理算法[J]. 电子学报, 2010, 38(1): 54 – 59.
- [7] 林恺, 赵海, 尹震宇, 罗玓玓. 一种基于能量预测的无线传感器网络分簇算法[J]. 电子学报, 2008, 36(4): 824 – 828.
- [8] S Olariu, I Stojmenovic. Design guidelines for maximizing lifetime and avoiding energy holes in sensor networks with uniform distribution and uniform reporting[A]. Proc. of IEEE INFOCOM[C]. New York: IEEE Communications Society, 2006. 1 – 12.
- [9] J Lian, K Naik, G Agnew. Data capacity improvement of wireless sensor networks using non-uniform sensor distribution[J]. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2006, 2(2): 121 – 145.
- [10] W Heinzelman, A Chandrakasan, H Balakrishnan. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2002, 1(4): 660 – 670.
- [11] F Ingelrest, D Simplot-Ryl, I Stojmenovic. Target transmission radius over LMST for energy-efficient broadcast protocol in ad hoc networks[A]. Proceedings of IEEE International Conference on Communications[C]. New York: IEEE Communications Society, 2004. 4044 – 4049.
- [12] V Mhatre, C Rosenberg. Design guidelines for wireless sensor networks: Communication, clustering and aggregation[J]. Ad Hoc Networks, 2004, 2(1): 45 – 63.
- [13] A Wadaa, S Olariu, L Wilson, K Jones, M Eltoweissy. Training a sensor networks[A]. Proceedings of MONET[C]. Hingham: Kluwer Academic Publishers, 2005. 151 – 168.
- [14] 宋超, 刘明, 龚海刚, 陈贵海, 王晓敏. 基于蚁群优化解决传感器网络中的能量洞问题[J]. 软件学报, 2009, 20(10): 2729 – 2743.
- [15] Xiaobing Wu, Guihai Chen. Avoiding energy holes in wireless sensor networks with nonuniform node distribution[J]. IEEE Trans. on Parallel and Distributed System, 2007, 19(5): 710 – 720.
- [16] A Jarry, P Leone, et al. An optimal data propagation algorithm for maximizing the lifespan of sensor networks[A]. Proceedings of Distributed Computing in Sensor Systems (DCOSS) [C]. Springer Berlin / Heidelberg, 2006. 405 – 421.
- [17] J Li, P Mohapatra. Analytical modeling and mitigation techniques for the energy hole problems in sensor networks[J]. Pervasive and Mobile Computing, 2007, 3(3): 233 – 254.

作者简介



宋 超 男, 1981 年出生于四川成都. 博士, 讲师, 主要研究领域为无线传感器网络、车载自组织网络.

E-mail: chaosong@uestc.edu.cn



刘 明 男. 1973 年出生于四川成都. 博士, 副教授, 主要研究领域为移动计算、传感器网络技术.

E-mail: csmliu@uestc.edu.cn



陈贵海 男, 教授, CCF 高级会员, 主要研究领域为分布式与并行计算.

E-mail: gchen@nju.edu.cn



龚海刚 男, 博士, 副教授, 主要研究领域为分布式计算、并行处理.

E-mail: hggong@uestc.edu.cn

