

文章编号: 2095-4980(2021)01-0112-05

UWSNs 中面向能耗和延时优化的移动数据收集

殷正坤¹, 李 鹏²

(1.长沙职业技术学院 经贸与信息技术学院, 湖南 长沙 410217; 2.湖南中医药大学 信息科学与工程学院, 湖南 长沙 410208)

摘要: 为了降低水下无线传感网(UWSN)中数据收集的能耗和保证实时性, 提出一种基于压缩感知的移动数据收集方案。以分布式能量均衡非均匀分簇(DEBUC)协议和压缩感知理论为基础, 簇内节点依据设计的稀疏测量矩阵决定是否参与压缩采样, 并将获得的测量值传输至簇头。然后, 通过自主式水下潜器(AUV)的移动来收集各个簇头上的数据到数据中心, 该问题被建模为基于信息质量最大化的旅行商问题(TSP), 并提出近似算法进行求解。仿真实验结果表明, 相比于已有的水下移动数据收集算法, 本文方案在保证数据收集可靠性的同时, 缩短了数据收集延时, 延长了网络寿命。

关键词: 水下无线传感网; 数据收集; 压缩感知; 测量矩阵; 旅行商问题; 能耗; 延时

中图分类号: TN919.72; TP393 **文献标志码:** A **doi:** 10.11805/TKYDA2019335

Mobile data gathering for energy consumption and delay optimization in Underwater Wireless Sensor Networks

YIN Zhengkun¹, LI Peng²

(1.College of Economics, Trade and Information Technology, Changsha Vocational and Technical College, Changsha Hunan 410217, China; 2.School of Information Science and Engineering, Hunan University of Chinese Medicine, Changsha Hunan 410208, China)

Abstract: A mobile data collection scheme based on compressive sensing is proposed in order to reduce the energy consumption and ensure real-time performance of data collection in Underwater Wireless Sensor Network(UWSN). Firstly, based on the Distributed Energy-Balanced Unequal Clustering (DEBUC) protocol and compressive sensing theory, cluster nodes decide whether to participate in compressive sampling according to the designed sparse measurement matrix, and transfer the obtained measurement results to the cluster head. Then, the data at cluster head is mobile collected by Autonomous Underwater Vehicle(AUV) to the data center. This problem is modeled as a Traveling Salesman Problem(TSP) based on the maximization of information quality, and an approximate algorithm is proposed to solve this problem. The simulation results show that, compared with the existing underwater data collection algorithms, the proposed scheme effectively reduces the data collection delay and prolongs the lifetime of network, with assuring the reliability of data collection.

Keywords: Underwater Wireless Sensor Networks; data gathering; compressive sensing; measurement matrix; Traveling Salesman Problem; energy consumption; delay

水下无线传感网(UWSNs)主要由众多具有水下声学通信属性和计算能力的传感器节点组成^[1], 对水下数据准确、可靠和高效收集是其应用的关键^[2]。水下数据收集研究^[3-7]中存在几个问题: 在对水下传感器节点进行部署时, 大多忽略了水下环境的特殊性对节点部署的影响, 只能应用在较为稳定的 UWSNs 中; 性能容易受网络节点初始分布的影响, 鲁棒性较差; 为了提高数据收集的可靠性, 在海洋环境中采取规则化的冗余部署方式, 但实现难度很大, 不具有实用性。针对这些问题, 基于压缩感知理论, 文中设计出一种高效的水下移动数据收集方案, 通过设计一种优化的局部测量矩阵来实现水下传感器节点的自适应数据收集, 将基于 AUV 的移动数据收集问题建模为旅行商问题(TSP), 有效地解决水下数据收集的能耗和延时问题。

收稿日期: 2019-09-10; 修回日期: 2019-10-21

基金项目: 湖南省自然科学基金青年项目资助(2019JJ50453)

作者简介: 殷正坤(1972-), 男, 硕士, 副教授, 主要研究方向为网络优化、大数据。email:2556229288@qq.com

1 系统模型和问题描述

为了对 UWSNs 中的高能耗数据收集问题进行研究, 先给出如下的合理假设: a) 传感器静止部署于海底, 传感器可以根据监测任务的不同要求对其传输功率进行动态调节。传感器使用内部集成的定位机制向周围环境广播自身地理位置, 并可感知其他节点位置。传感器能耗模型采用目前通用水下声学信道传播模型^[7]。b) 采用 AUV 来移动收集各个节点的数据, AUV 移动速度不变, 可长时间连续有效工作, 且可随时进行充电。研究的问题是: 如何对单个传感器节点上的数据进行高效且可靠的收集, 以及如何将各个传感器节点上已经收集好的数据及时上传到数据中心, 从而保证 UWSNs 在完成监测任务的前提下, 具有更长的网络寿命^[8]。

2 本文方案

2.1 总体思路

首先采用分布式能量均衡非均匀分簇(DEBUC)路由协议^[9]对网络进行分簇, 簇内节点依据设计的稀疏测量矩阵决定是否参与压缩采样, 并将获得的测量值发送至簇头; 然后, 以使 AUV 航行时间最小化且信息采集量最大化为目标, 为 AUV 寻找一条最优路径收集各个簇头的测量值, 并将其发往数据中心进行重构。

2.2 节点的数据采集

基于压缩感知^[10]进行数据收集的关键是测量矩阵的设计, 它直接影响到数据收集的可靠性以及网络的能耗大小。为此, 首先使用 DEBUC 协议对水下无线传感网监测区域进行分簇, 并基于最短路原则构建一棵以根节点为簇头的初始数据收集树, 然后对树中的节点分别进行不同的数据收集处理:

1) 对于属于树中叶子节点的那部分传感器, 采用直接收集的方式将位于其通信半径内的数据不经压缩地收集上来。这种方式等价于采用一个单位矩阵 I 来进行压缩数据收集^[11]。

2) 对于属于树中非叶子节点的那部分传感器, 则采用压缩数据收集方式。设传感器节点 i 和 j 间的距离为 $d_{ij}(i, j=1, 2, \dots, k)$, 则簇内所有传感器节点之间的距离可以用矩阵 D 表示。稀疏测量矩阵的设计思路为: 假设距离矩阵 D 已知, 将树中的任意一个传感器节点作为路径初始节点, 计算其他传感器节点可成为有效投影节点的概率大小。当节点 i 为路径初始节点时, 节点 j 可成为有效投影节点的概率采用式(1)进行计算:

$$p_{ij} = \begin{cases} 1, & i = j \\ \frac{\text{deg}_j}{d_{ij}}, & i \neq j \end{cases} \quad (1)$$

式中 deg_j 表示节点 j 的度。依次将树中属于非叶子节点的那部分传感器轮流作为路径初始节点, 则簇内所有传感器节点可成为有效投影节点的概率为:

$$P = \begin{bmatrix} 1 & p_{12} & \cdots & p_{1k} \\ p_{21} & 1 & \cdots & p_{2k} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{k1} & p_{k2} & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

已知矩阵 $\Phi' \in \mathbf{R}^{k \times k}$, Φ' 位于 (i, j) 处的元素为 ϕ_{ij} , 该元素以概率 p_{ij} 服从高斯分布, 即

$$\phi_{ij} = \begin{cases} N\left(0, \frac{1}{sk}\right), & p = p_{ij} \\ 0, & \text{other} \end{cases} \quad (3)$$

式中: s 表示 Φ' 中非零元素数目在总元素数目中的占比; k 表示矩阵 Φ' 的行数。为了实现压缩采样, 可从矩阵 Φ' 中随机抽取 m 行重新构成测量矩阵 Φ'' 。综上所述, 可得最终的测量矩阵为 $\Phi = [I | \Phi'']$ 。

按上述思路, 数据收集的主要过程是: DEBUC 协议对网络进行分簇, 每个传感器节点隶属于一个分簇; 在任意一个簇内, 以其叶子节点 i 为数据收集路径开启节点, 选择一条终点是簇头的路由 $\text{route}_i^{\text{CH}}$, 在 $\text{route}_i^{\text{CH}}$ 中, 每个节点将感知得到的数据乘以 ϕ_{ij} 后, 按照分配的时隙传输至簇头; 最后由 AUV 来收集各个簇头的的数据。

2.3 AUV 的路径规划

假设各个簇的簇头之间是连通的, 组成一个无向连通图 $G=(V, E)$, 其中簇头集合用 V 表示, $|V|=C$, 边集

用 E 表示。AUV 位置 $x_v \in \mathfrak{R}^{dm}$ ($dm \in 2,3$) 灵活可控并且拥有多个约束条件(如 AUV 动力学特征或者障碍物)。

设已知任一簇头 $c \in [C]$ 的位置 $x_c \in \mathfrak{R}^{dm}$, $IQ(Y_c)$ 表示位置 x_c 上数据的信息质量。设 $tc(x_1, x_2)$ 为点对 $x_1, x_2 \in \mathfrak{R}^{dm}$ 的路径遍历成本, 它主要由常见的路由测度如时间花费、跳数和传输延时等决定。此外, AUV 的通信质量与距离的长度成反比, 即有 $CM(x_v, x_c) = f(D(x_v, x_c))$, 其中 $D(x_v, x_c) = |x_c - x_v|$, f 是一个随着通信距离增加其取值反而降低的单调函数。

在各个簇内的传感器节点将其数据发送到所属簇头后, AUV 如何找到一条最短的访问路径来高效收集各个簇头数据是接下来要解决的关键问题。即如何合理规划 AUV 的巡游路径, 实现巡游时间最小化且信息采集量最大化。设 $P(x_v, x_c) \sim CM(x_v, x_c)$ 表示 x_v 处 AUV 接收到 x_c 处簇头测量值的概率, 即 AUV 与簇头之间成功通信且接收到完整的数据回应报文的概率。假设 AUV 不断地向各个簇头发送连接请求, 各个收到请求的簇头则将其数据发往 AUV。则 AUV 在点 x_v 处接收到的预期信息质量为:

$$R(x_v) = \sum_{C \in 2^K} P(x_v, C) IQ(Y_C) \quad (4)$$

式中: 2^K 表示数据未被采集的 K 个簇头的幂集; $IQ(Y_C)$ 表示 $C \in 2^K$ 个簇头的联合信息; $P(x_v, C)$ 表示 x_v 观测到 C 个簇头的概率。根据簇头的独立性假设, 式(4)可简化为:

$$R(x_v) = \sum_{c \in [C]} P(x_v, x_c) IQ(Y_c) \quad (5)$$

另外, 利用独立性假设还可以计算出路径 $P = [x_v(1), x_v(2), \dots, x_v(T)]$ 上预期接收到的信息:

$$R(P) = \sum_{c \in C} \left[1 - \prod_{t \in [T]} [1 - P(x_v(t), x_c)] \right] IQ(Y_c) \quad (6)$$

设 AUV 在进行数据收集时以恒定速度 V 移动, 在 D 秒内必须收集好簇头上的数据, 否则将出现信息丢失的情况。即已知通信模型为 CM , 信息质量为 IQ , 路径遍历成本为 tc , 信息质量阈值为 τ , 路径中最后位置的索引为 T , AUV 起始位置为 x_s 及一组可能的 AUV 路径 Ψ , 需要确定 P^* 。AUV 的路径规划问题可表述为:

$$\begin{cases} P^* = \arg \min_{P \in \Psi} \sum_{t \in [T]} tc[P(t-1), P(t)] \\ \text{s.t. } R(P) \geq \tau, |\Psi| \leq VD \end{cases} \quad (7)$$

2.3.1 近似解

问题(7)可被归结为一个马尔科夫决策过程(Markov Decision-making Process, MDP)^[12]。如果网络环境是离散环境, 则使用任意一种标准算法^[12]均可求解上述 MDP。然而在水下无线传感网中, MDP 的状态数量随着簇头数量的上升而呈指数上升, 难以获得最优解。因此提出问题(7)的近似求解算法。

为了求解式(7)问题, 首先生成各个簇头周围的等概率轮廓线, 然后将其认定为确定性邻域以供使用。对任一簇头 c , 其概率邻域定义为 γ_c , 对所有 $x_m \in \gamma_c$, 有:

$$P(x_m, x_c) > \alpha \quad (8)$$

式中 $\alpha \in (0,1)$, 表示概率邻域大小的动态因子。如果 AUV 位于簇头 c 的邻域内, 接收来自 c 的信息, 则 $\alpha \rightarrow 1$; 如果 AUV 在接收簇头 c 的信息前需对其进行多次查询, 则 $\alpha \rightarrow 0$ 。

2.3.2 巡游路径的策略

确定了概率邻域后, 提出如下 3 种不同的 AUV 巡游策略来规划簇头到数据中心的数据收集路径:

1) 就近策略(Nearest Strategy, NS): AUV 每次首先向其距离最近的簇头移动, 接收完该簇头的的数据后, 紧接着移至下一个最近的簇头。见图 1(a)。

2) 基于惩罚因子的改进型 TSP 算法(Improved TSP algorithm based on Penalty Factor, ITSP-PF): 为每个位置分配一个惩罚因子 ζ , 该分配原理依据各个簇头的信息量多少。AUV 只需支付部分位置所要求的惩罚, 就可选择忽略这些位置来进行巡航。因此, 巡航的总成本等于所有未被访问簇头 i 的 $\zeta(i)$ 加上移动成本。 $\zeta(i) = \omega IQ(Y_i)$, 其中 ω 为比例因子。此外, 采用原始/对偶算法^[13]来计算得到需要访问的簇头。使用 Concorde 求解程序^[14]来决定访问簇头的最优次序, 见图 1(b)。

3) 带邻域的改进型 TSP 算法(Improved TSP algorithm with Neighborhoods, ITSPN): 首先基于概率邻域来确定簇头的最大独立集(Maximum Independence Set, MIS)。然后采用原始/对偶算法来选择 AUV 必须访问的 MIS 子集, 最后使用 Concorde 求解程序来决定访问 MIS 子集的最优次序, 见图 1(c)。

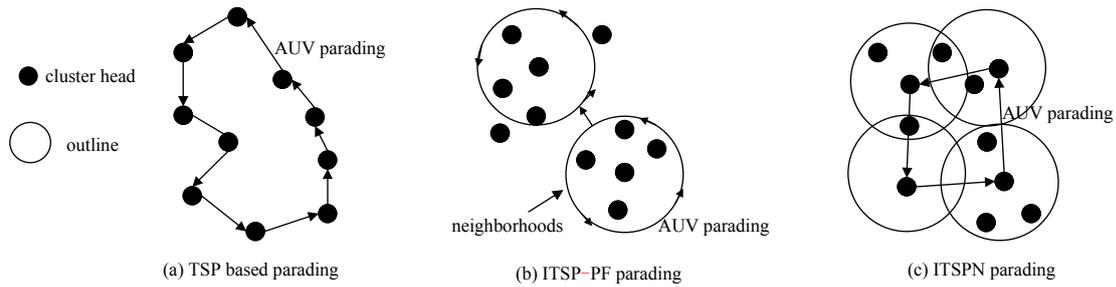


Fig.1 AUV parading example
图 1 AUV 巡游示例

综上所述，本文提出的水下移动数据收集算法主要步骤如下：

- 步骤 1 利用 DEBUC 协议对整个网络进行分簇，簇头依据 2.2 设计的稀疏测量矩阵 Φ 进行簇内数据采集；
- 步骤 2 AUV 使用 2.3.2 节提出的策略进行巡游，并动态地将各个簇头上收集的数据上传至数据中心；
- 步骤 3 在数据中心处，将数据重构问题建模为 l_1 范数最小化问题^[15]，并采用 OMP 算法求解。

3 仿真实验

为了验证本文方案(以下简称为 CS_MDC)的性能，本文进行了一系列仿真实验，实验数据集采用 NASA JPL 实验室中 ROMS 系统实测的海洋环境数据。实验中主要参数设定如表 1 所示。带宽、重构误差和能耗均可作为衡量指标。其中，信噪比(Signal to Noise Ratio, SNR)可用于衡量重构误差：

$$R_{SN} = 10 \lg \frac{\sum_{i=1}^N d_i^2}{\sum_{i=1}^N (d_i - \hat{d}_i)^2} \quad (9)$$

图 2 给出了在不同传输功率条件下，AUV 采用不同策略进行巡游的完成时间比较结果。其中，AUV 的速度设为 3 km/h。可以看到，随着传输功率的增加，无论采用哪种策略，AUV 的巡游完成时间都在缩短，即数据收集的延时缩短。其中，ITSPN 策略的延时最短，NS 策略的延时最长，但 3 种策略的完成时间差异越来越小。这是因为传输功率较低时(通信效果较差)，邻域的利用价值最小，此时问题转化为经典的 TSP。传输功率较大时(通信效果较好)，路径规划价值下降，就近策略的效果与非就近策略的效果更为接近。通信效果中等时，求解 TSP 的同时对邻域加以利用可以在一定程度上提升性能。由此可见，传输功率的控制对于数据收集的延时具有重要影响。

图 3 展示了 CS_MDC 方案与 PCDC 方案^[5]和 AURP 方案^[7]在数据收集能耗方面的对比结果。从图 3 不难发现，随着部署的传感器节点数量增多，3 种方案的数据收集能耗都在增加。具体来看，PCDC 方案的能耗最高，CS_MDC 方案的能耗最低。更为重要的是，随着传感器节点数据的增多，CS_MDC 方案在能耗方面的优势相对于其他两种方案更为明显。例如，当节点数目达到 1 000 个时，CS_MDC 方案的能耗相比 PCDC 方案和 AURP 方案，分别降低了约 65%和 39%。这是因为 AURP 方案使用多个 AUV 作为中继节点来转发数据，并通过控制 AUV 的移动来对节点的能耗进行优化，不需要预先获取通信节点间的地理位置，因此取得了比 PCDC 方案更好的节能效果。而本文方案则更进一步，它基于压缩感知理论设计了稀疏测量矩阵对网络内的数据进行自适应采集，避免了数据的冗余采集，实现了各个节

表 1 仿真实验的主要参数

parameter	value
package size/B	1 000
band width/kHz	5
transmission power	0.1 W-10 kW
length of downlink control information/B	2 000
energy required to send 1 bit of data/nJ	100
energy required to receive 1 bit of data/nJ	5
energy required for each data collection by a single node/nJ	1 000
down-link modulation	Time Division Duplexing(TDD)
TDD time guard period/ms	20

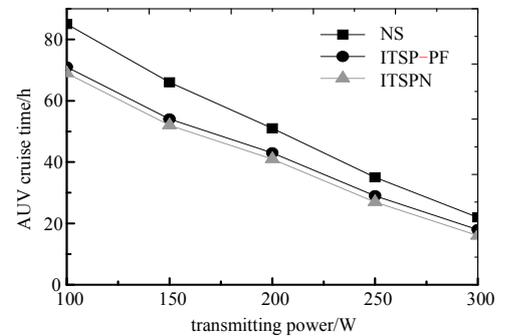


Fig.2 Comparison of AUV cruise time
图 2 AUV 巡游时间比较

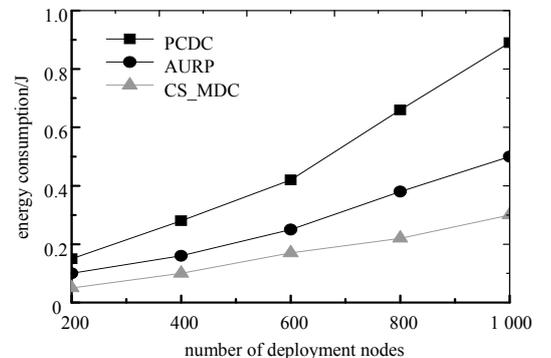


Fig.3 Energy consumption comparison of different schemes
图 3 不同方案的能耗比较

点的负载均衡。另外，它采用了 3 种策略来对 AUV 的巡游路径进行优化，减少了节点的数据传输开销，节省了能量，延长了网络寿命。

图 4 对 CS_MDC 方案与 PCDC 方案^[5]和 AURP 方案^[7]的数据收集延时进行了比较。随着部署在水下的传感器节点数目的增多，不同方案的数据收集延时也随之增加，这是由于各方案为了保证数据重构的精确度需要访问更多节点。但总体而言，CS_MDC 方案的数据收集延时始终要低于 AURP 方案和 PCDC 方案，且伴随着节点个数的增加，其优越性更加明显。这主要是因为 PCDC 方案容易受到网络初始拓扑以及节点数量多少的影响，它对于节点分布较为稠密的大规模网络环境适用性较差，因此当节点个数激增后，其数据收集延时明显增加。AURP 方案通过使用多个 AUV 作为中继来辅助数据传输，一定程度上解决了网络节点分布不均所导致的多跳数据传输问题，因此相比于 PCDC 方案而言，AURP 的数据收集延时更短。而 CS_MDC 方案通过将数据收集路径规划问题建模为一个马尔科夫决策问题，并提出采用基于概率邻域、最大邻域独立集等的 TSP 策略来求解该问题，实现了对 AUV 巡游路径合理规划，极大地提高了数据收集的效率。

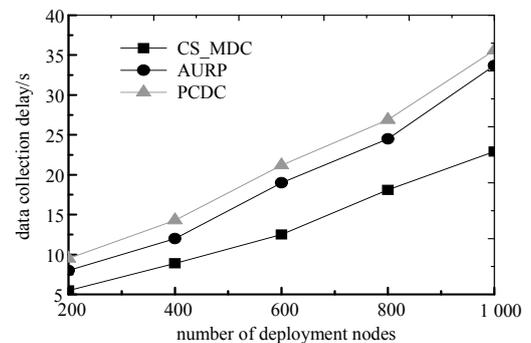


Fig.4 Data collection delay comparison of different schemes
图 4 不同方案的数据收集延时比较

4 结论

研究了基于压缩感知的水下移动数据收集问题：a) 先对整个网络监测区域进行分簇，然后进行水下传感器节点上的数据收集，设计了一种新颖的测量矩阵来实现传感器节点数据的采样，在保证数据收集质量的同时，显著降低了网络通信开销。b) 将通过 AUV 收集各个簇头的数据到数据中心的问题建模为基于信息质量最大化的旅行商问题，然后提出 3 种策略用于确定 AUV 的巡游路径，减少了 AUV 巡游时间。c) 采用 NASA JPL 实验室通过 ROMS 系统实测的海洋环境数据进行了仿真实验，结果表明，本文方法在保证数据收集可靠性的同时，减少了数据收集延时，延长了网络寿命。接下来，将进一步探讨水下无线传感网中的目标定位与跟踪问题，拟考虑海洋环境中洋流速度、海底地形以及海洋动物等因素对该问题的影响并建模，研究一种基于压缩感知的水下目标定位与跟踪方案。

参考文献：

- [1] 苏耀鑫,高秀峰. 基于矩阵的无线传感器网络 SNEP 改进[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2018,16(6):1072-1079. (SU Yaixin,GAO Xiufeng. Research on improvement of SNEP protocol based on matrix[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2018,16(6):1072-1079.)
- [2] HAN Guangjie,ZHANG Chenyu,LEI Shu,et al. Impacts of deployment strategies on localization performance in underwater acoustic sensor networks[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015,62(3):1725-1733.
- [3] HOLLINGER G A,CHOUDHARY S,QARABAQI P,et al. Underwater data collection using robotic sensor networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2012,30(5): 899-911.
- [4] SU Ruoyu,VENKATESAN R,LI Cheng. A new node coordination scheme for data gathering in underwater acoustic sensor networks using autonomous underwater vehicle[C]// IEEE Wireless Communications and Networking Conference(WCNC). Shanghai,China:IEEE, 2013:4370-4374.
- [5] JALAJA M J,LILLYKUTTY J. On-demand data collection in sparse underwater acoustic sensor networks using mobile elements[C]// International Conference on Wireless and Mobile Communications. Seville,Spain:IEEE, 2014:105-111.
- [6] YOON S,AZAD A K,OH H,et al. AURP: an AUV-aided underwater routing protocol for underwater acoustic sensor networks[J]. Sensors, 2012,12(2):1827-1845.
- [7] FAZEL F,FAZEL M,STOJANOVIC M. Compressed sensing in random access networks with applications to underwater monitoring[J]. Physical Communication, 2012,5(2):148-160.
- [8] UZUN E,SENEL F,AKKAYA K,et al. Distributed connectivity restoration in underwater acoustic sensor networks via depth adjustment[C]// IEEE International Conference on Communications. Rio de Janeiro,Brazil:IEEE, 2015:6357-6362.
- [9] 蒋畅江,石为人,唐贤伦,等. 能量均衡的无线传感器网络非均匀分簇路由协议[J]. 软件学报, 2012,23(5):1222-1232. (JIANG Changjiang,SHI Weiren,TANG Xianlun,et al. Energy-balanced unequal clustering routing protocol for wireless sensor networks[J]. Journal of Software, 2012,23(5):1222-1232.)

(下转第 131 页)