

Underwater Wireless Sensor Game Routing Algorithm Based on Cooperative MIMO

Jiao Peng, Pingyuan Liang, Jie Li

Information Institute, Hunan University of Humanities, Science and Technology, Loudi Hunan
Email: 120106515@qq.com

Received: Feb. 8th, 2019; accepted: Feb. 20th, 2019; published: Feb. 27th, 2019

Abstract

The cooperative MIMO technology is introduced into the inter-domain communication of underwater wireless sensors. Considering the factors such as the communication hops, energy density, residual energy and inter-node communication distance of the optional node from the Sink node, a game routing algorithm with energy balance is proposed. A new benefit function is constructed, and the benefit function can be used to select the node with the greatest benefit as the data relay forwarding node. Through simulation experiments, it can be seen that the algorithm has a greater improvement in network lifetime, energy efficiency, and balanced network energy consumption than other algorithms.

Keywords

Underwater Wireless Sensor, Cooperative MIMO, Game Routing

基于协作MIMO的水下无线传感器 博弈路由算法

彭 娇, 梁平元, 李 杰

湖南人文科技学院信息学院, 湖南 娄底
Email: 120106515@qq.com

收稿日期: 2019年2月8日; 录用日期: 2019年2月20日; 发布日期: 2019年2月27日

摘 要

将协作MIMO技术引入到水下无线传感器域间通信, 综合考虑可选节点距离Sink节点通信跳数、能量密

度、剩余能量、节点间通信距离等因素,提出了能耗均衡的博弈路由算法。构造出一个新的效益函数,通过效益函数可以选择出受益最大的节点作为数据中继转发节点。通过仿真实验,可以看出该算法较其他算法在网络生存时间,能量效率,平衡网络能耗方面都有较大改善。

关键词

水下无线传感器, 协作MIMO, 博弈路由

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来,水下无线传感器逐渐成为无线传感器的一个热门应用领域[1]。水下传感器的节点分布在不同的平面上,应用场景恶劣,而且传感器电池的更换一直是一个难题。水下无线传感器的能量节省直接关系到网络的实际使用寿命。

LEACH算法和HEED算法是目前常用的两种水下无线传感器路由算法。LEACH算法采用随机方法选取网络中的域首节点,这类算法忽略了传感器节点周边的环节影响和传感器剩余能量,而且LEACH算法中的域首节点在网络中的分布不均衡,分布较为密集的区域节点能耗过快,当WSN的规模较大时采用LEACH算法不能达到预期的效果[2];不同于LEACH算法节点的计算方法,HEED算法引入了主、次两个参数,能达到较快的分域速度,且在网络中的分布较为均衡,然而HEED算法迭代过程造成了传送数据的大幅增加,节点选择的能耗比较大[3]。

本文针对水下无线传感器的环境特点,引入协作MIMO技术,设计了一种能耗均衡的水下无线传感器博弈路由算法。算法利用节点间最优化的路径来协作完成数据的传输,实验证明本文算法的能耗较低。算法通过博弈模型来平衡域间路由的网络能耗,可使网络在满足监测要求的前提下延长网络寿命。

2. 水下无线传感器协作MIMO系统模型

2.1. 水下无线传感器网络结构模型

目前采用较多的水下无线传感器网络结构模型一般都是如图1所示的三层模型。第一层作为模型的系统控制中心,主要负责收集下层传输上来的数据并进行处理;第二层主要是位于水面传感器节点层[4],这一层的节点在采集下层的数据后对这些收集上来的数据进行初步分析,把分析的结果利用多种通信手段比如短波、卫星等传到第一层的控制中心;第三层是水下传感器节点层[5],这一层的传感器节点包含了水底和水中的节点,节点的主要作用是收集水下的数据,并对其融合,并把结果转发至第二层,第三层节点的位置一般都固定不动,而且位于水下电池不方便更换,传输介质也只能采用水声进行通信。

数据传输包含两个阶段:域间和域内。当水下的某个域内节点需要将采集到的数据进行信息传输时,域内节点和域首节点采用TDMA(时分复用)的通信方式进行信息传输,然后对这些数据由域首节点进行融合,融合的数据发送给Sink节点,这个过程采用协作MIMO传输方式,由域首节点和域内协作节点共同完成[6]。基于协作MIMO的系统模型如图2所示:

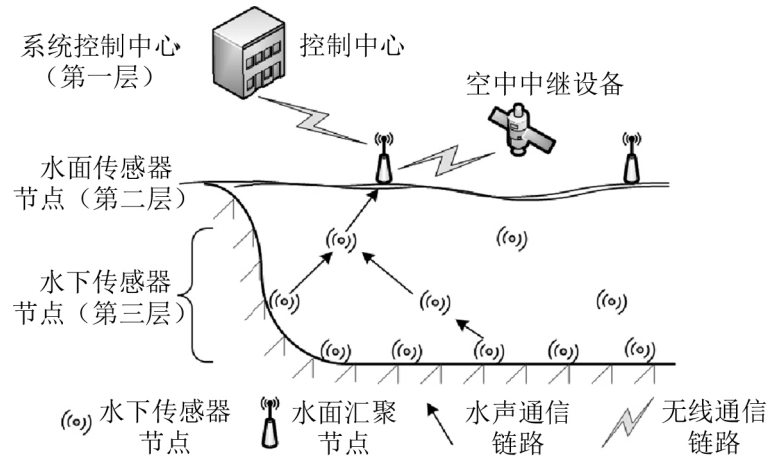


Figure 1. Underwater wireless sensor network structure model
图 1. 水下无线传感器网络结构模型

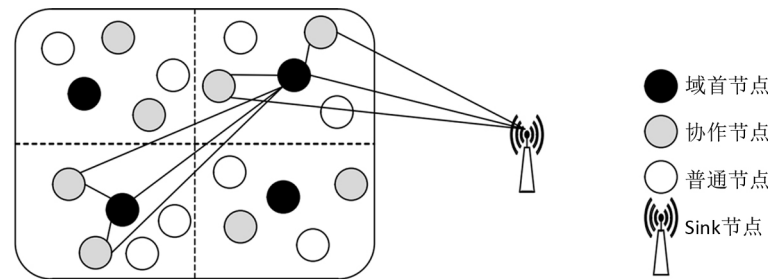


Figure 2. Model of underwater wireless sensor system based on cooperative MIMO
图 2. 基于协作 MIMO 的水下无线传感器系统模型

2.2. 能耗模型[7]

水下无线传感器节点之间的通信所消耗的能量主要分布在两大部分: 功率放大器能耗 P_{pa} 和电路模块能耗 P_c [8]。总功率如公式(1)所示。

$$P = P_{pa} + P_c \tag{1}$$

本文考虑的域内信道包含加性高斯白噪声, 域间信道为瑞利衰落信道, 采用多进制正交幅度调制 (MQAM) 的方式。其中, P_{pa} 取决于传感器节点发射功率 P_{out} , 如公式(2)所示。

$$\begin{aligned} P_{pa} &= (1 + \alpha) P_{out} \\ P_c &= P_{c-transmitter} + P_{c-receiver} \\ &= N_t (P_{DAC} + P_{mix} + P_{ffr}) + 2P_{syn} + (P_{LNA} + P_{mix} + P_{IFA} + P_{ffr} + P_{ADC}) \end{aligned} \tag{2}$$

其中, $\alpha = (\xi/\eta) - 1$, ξ 是峰值功率与平均功率之比, η 为射频功率放大器的效率; $P_{c-transmitter}$ 和 $P_{c-receiver}$ 分别为节点传输和接收功率。计算公式如(3)所示:

$$\begin{aligned} P_{c-transmitter} &= N_t (P_{DAC} + P_{mix} + P_{ffr}) \\ P_{c-receiver} &= 2P_{syn} + (P_{LNA} + P_{mix} + P_{IFA} + P_{ffr} + P_{ADC}) \end{aligned} \tag{3}$$

其中, P_{mix} 表示混频器的工作功率; P_{DAC} 和 P_{ADC} 分别表示数模、模数转换器的功率; P_{LNA} 表示低噪声放大器功率; P_{ffr} 和 P_{ffr} 分别表示发射、接收端滤波器功率; P_{syn} 表示频率合成器功率; P_{IFA} 表示中频放大

器功率。

根据式(1)、(2)和(3)可以计算出系统在固定误码率下传输一个比特的信息所消耗的能量如公式(4)所示:

$$E_{bt} = \frac{P_c + P_{pa}}{R_b} = \frac{P_c}{R_b} + \frac{2}{3} \frac{\xi}{\eta} \left(\frac{P_b}{4} \right)^{-\frac{1}{N_t}} \frac{2^b - 1}{b^{\frac{1}{N_t} + 1}} N_t N_0 \frac{4\pi^2 \bar{d}^k}{G_t G_r \lambda^2} M_t N_f \quad (4)$$

式中, \bar{d}^k 表示传输距离, R_b 为比特传输速率, N_t 表示发送端天线数, b 表示调制星座级数。

3. 能耗均衡的博弈路由算法

3.1. 博弈模型

路由的主要功能是对数据进行分组, 然后从所有网络的路径中选取最优的路径把数据发送到目的节点。其中域间路由算法主要用于对中继转发节点的优化选取, 以达到减小节点通信开销、降低能耗、延长网络工作时间的目的[8]。

数据在水下无线传感器节点间的传输过程为: 源节点 - 中继域首节点 - Sink 节点[9], 位于传输路径后面的节点能够获取前面节点的行为决策信息。目前传感器节点普遍存在着能量不充分、处理和通信能力弱的缺点, 节点获取的信息大多来自于最近的邻居节点[10]。我们把整个传感器的数据传输过程看作一个博弈过程, 传感器中的节点作为参与者, 在整个过程中参与者节点仅能够根据包含最近节点在内的少数参与者的信息进行行为决策, 对其他参与者节点的信息一无所知。本文分析了节点剩余能量、能量密度等因素对模型的影响[11], 在此基础上提出一种基于新的效益函数和动态路由博弈的博弈论模型, 域首节点最优化选择中继节点中受益最大的节点, 然后转发数据给目标节点。路由博弈模型如下所示:

1) 网络模型: 网络区域可以用图 $G(V, E)$ 表示, $V_i \in V$ 是表示网络中的每个节点, $l_{ij} = (V_i, V_j)$ 表示网络中的每个链路, 通信代价函数 $C_{ij} \in E$ 影响着链路的每个环节。假设博弈过程存在多个节点, 其中仅有一个为源节点一个为目的节点, 其他节点为源节点于目的节点之间的中继节点。

2) I 表示参与者集合。 $I = \{\text{水下无线传感器中的所有域首节点}\}$ 。

3) 模型中所有参与者的行动过程是一个迭代的过程:

Step 1: 源节点收集节点周围的数据信息;

Step 2: 根据效益函数选择中继转发节点;

Step 3: 数据信息传输给 Step 2 中选择出来的中继节点;

Step 4: 重复 Step 2 和 Step 3;

Step 5: 数据信息最终发送给目标节点。

在上述博弈过程中, 中继转发节点采用和源节点相同的方式最优化选择下一跳中继节点, 把信息从前面的参与者传输给后面的参与者。根据上述分析可知传感器节点存在着能量不足和处理能力弱的缺点, 因此每个参与者仅能根据就近原则获得邻居节点信息, 对其他节点的信息不能获取。

4) 用 A 表示所有参与者的策略集合。 $A = \{A_i | i \in I\}$, 其中 A_i 表示第 i 个参与者采取的所有策略: $A_i = \{A_{i1}, \dots, A_{i(i-1)}, A_{i(i+1)}, \dots, A_{im}\}, \forall A_{ij} \in \{0, 1\}$, m 表示模型中所有参与者可供策略集的数量, 在实际的传感器模型中可以看做是节点 i 的相邻节点个数。假设 V_i 的下一跳节点为 V_j , 则 V_j, V_i 满足 $A_{ij} = 1$ 。对于策略集合中的元素 V_i 有且仅存在一个 V_j 使得 $A_{ij} = 1$ 。如果所有的 V_j 计算出的 $A_{ij} = 0$, 则表明对于参与者 V_i 来说, 不存在下一个满足条件的中继节点, 数据转发发生中断。

5) U 表示参与者效益函数。效益函数作为博弈论中一个重要的概念, 参与者通过效益函数从几种可

选择的策略中选择让自己受益最大的策略,而采用不同的策略博弈最终结果也不相同[12],本文定义博弈模型参与者的效益函数为:

$$U = \{U_i | i \in I\}, U_i = B_i - C_{ij} \quad (5)$$

其中 B_i 表示第 i 个节点的收益函数。

本文用定价和支付模式来简单描述网络的结构。每个节点(包括源节点和目标节点)之间成功支付金额的条件为:下一节点成功接收到上一节点发送过来的数据包。假设 M 表示第一个中继节点向源节点支付的金额, Q 表示每个中继节点之间成功传送信息时下一个中继节点支付上一个中继节点的金额。本文将利润的概念引入博弈模型中,节点的利润表示为节点传输信息给下一个节点所获取的回报减去支付给上一个节点所支付的金额,假定每个节点的利润都为正数,则收益函数 B_i 定义为:

$$B_i = b_i \sum_{i=1}^h P_i \quad (6)$$

式中 h 表示中继转发节点的总数; P_i 表示节点 i 与节点 $i+1$ 之间成功传输数据的概率。其中源节点的 b_i 如(7)所示:

$$b_i = M - h \cdot Q \quad (7)$$

其他中继节点的 b_i 如(8)所示:

$$b_i = Q \quad (8)$$

3.2. 算法流程

用 V_i 表示数据转发整个过程中所有节点的源节点,本文提出的域间路由算法如下:

Step 1: 源节点 V_i 向周围所有 N 个临近节点传输测试信息,所有接收到消息的节点向 V_i 回复确认收到信息;

Step 2: if $N = 1$, 跳至 Step 7; or $N > 1$, 按照顺序继续执行下一步;

Step 3: 邻居节点将剩余能量、间隔距离、与 Sink 节点的跳数、能量密度等信息传输给源节点 V_i ;

Step 4: V_i 根据收到的所有相邻节点的信息构造效益函数;

Step 5: 通过构造的效益函数, V_i 以获益最大为目标条件最优化选择一个中继转发节点;

Step 6: 其他邻居节点进入等待,在传输下一个信息时,重新参与计算最优化中继节点;

Step 7: 重复 Step 1 至 Step 5,直到数据最终成功传输至 Sink 节点,从源节点开始包含所有最优化中继节点最后到 Sink 节点则为本算法的最佳路由;

Step 8: 结束。

3.3. 代价函数

影响 V_i 和 V_j 之间的通信代价函数 C_{ij} 的因素主要有四种:①节点 V_j 与 Sink 节点之间的中继节点数目 $H_c(v_j)$; ②节点 V_i 和 V_j 之间的距离 D_{ij} ; ③节点 V_j 的剩余能量 $E_{Residual}(v_j)$; ④节点 V_j 的能量密度 $E_{Density}(v_j)$ 。

根据上述分析,我们可以定义通信代价函数如式(9)所示:

$$C_{ij} = \frac{H_c(v_j) D_{ij}^2}{E_{Residual}(v_j) E_{Density}(v_j)} \quad (9)$$

数据传输消耗的能量与源节点到达 Sink 节点之间的跳数、节点之间的距离成正比。因此在相同的条件下,节点剩余的能量和所有节点能量的密度直接关系到数据能否正确传输至 Sink 节点[13]。根据式(3)~(5)可得出,源节点于 Sink 节点之间存在的中继节点越少、相邻节点之间的距离越短、节点剩余能量

越多、整个网络中节点的能量越密集,则完成通信的可能性越大,对网络中的每一个节点通过以上规则选择最优的节点最优下一个中继节点转发数据。

在式(9)中,节点 V_j 的能量密度 $E_{Density}(v_j)$ 的计算公式如(10)所示:

$$E_{Density}(v_j) = \sum \{E_{Residual}(v_k) | v_k \in Neighbor(v_j)\} + E_{Residual}(v_j) \quad (10)$$

其中, $E_{Residual}(v_j)$ 为节点 V_j 的邻居节点的剩余能量。

参与者节点的效益等于参与者节点获得的收益减去支付的代价[14]。定义本文模型的效益函数如(3-7)所示:

$$U_i = B_i - C_{ij} = b_i \sum_{i=1}^n p_i - \frac{H_c(v_j) D_{ij}^2}{E_{Residual}(v_j) E_{Density}(v_j)} \quad (11)$$

对于域首节点来说,收益最大的下一跳中继节点可以根据(11)式得到。博弈模型的基本原则是每个参与者都选取一个使得自己利益最大的决策,当所有参与者的决策达到博弈均衡时,传感器节点的能耗达到最低,数据传输网络的工作时间也能达到最长[15]。

4. 算法性能分析与仿真

本文采用 MATLAB 软件对提出的能耗均衡协作路由算法进行仿真测试。实验参数设置如下:传感器节点数目为 100,节点部署的水域范围为 $150 \text{ m} \times 150 \text{ m}$ 。

图 3 给出了不同通信方式下信噪比与误码率、信道容量三者的变化,(a)反映了不同天线数目条件下信噪比与误码率的关系。当接收信噪比增大时,系统出现的误码率能够得到明显的降低,由图中数据还可以看出在相同的条件下协作 MIMO 通信方式的误码率要明显低于直接通信的误码率。(b)反映了不同天线数目条件下信道容量与信噪比的关系。由图中数据可得,在相同的条件下协作 MIMO 通信方式的信道容量要明显高于直接通信的信道容量。

图 4 给出了三种不同算法随着网络生存时间的增加节点存活数口和传输能量消耗的变化。由图中的数据可得:当网络运行时间相同时,本文算法的节点存活数和网络传输能耗要优于其他两类算法。通过以上数据可知,本文的算法较 MIMO-LEACH 算法和 HEED 算法更能够提高节点能量的利用率,对网络生存时间的延长发挥了良好的效果。

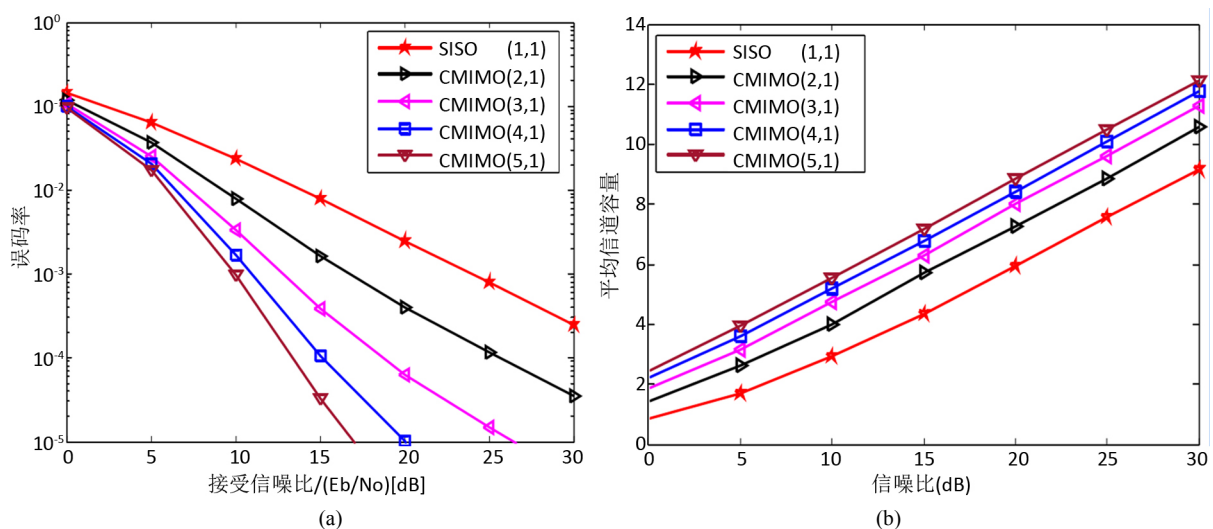


Figure 3. Bit error rate and channel capacity under different SNR

图 3. 不同信噪比下的误码率和信道容量

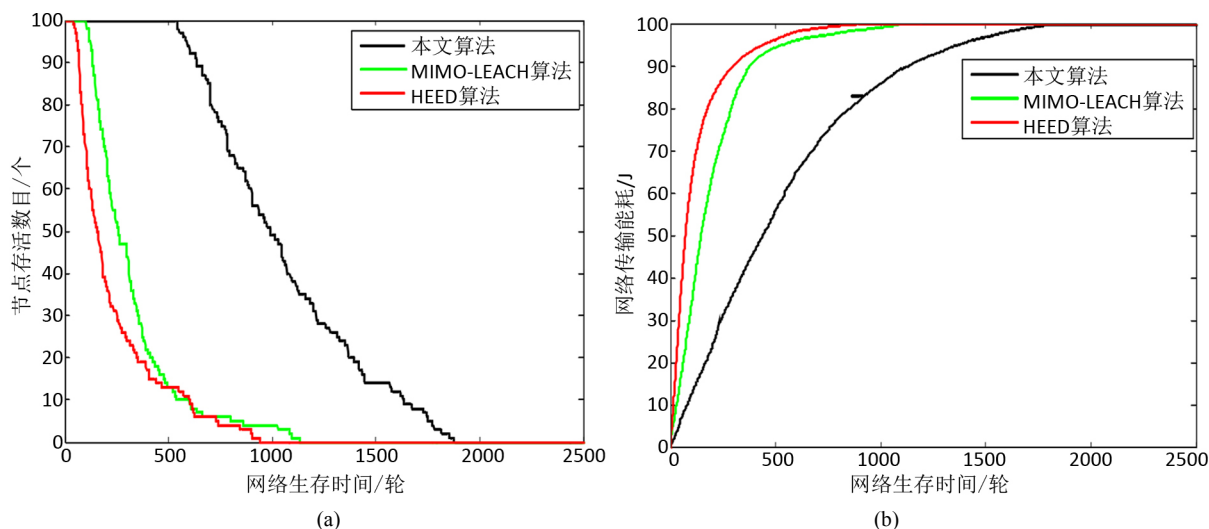


Figure 4. Number of nodes surviving and energy consumption under different network lifetimes

图 4. 不同网络生存时间下节点存活数目和能量消耗

5. 结论

本文提出了一种基于协作 MIMO 技术的水下无线传感器博弈路由算法, 通过对所有参与者节点的通信距离和跳数、剩余能量、能量密度等因素进行分析, 给出了一种能够保持能耗均衡的博弈域间路由算法, 算法根据收益最大原则通过给定的效益函数最优化选择中继转发节点传输数据。最后利用 MATLAB 软件对本文的算法进行仿真, 实验数据表明, 本文算法在能量效率、网络生存时间和平衡能耗等方面的表现要优于其他同类算法。

参考文献

- [1] Gong, X., Liu, X., Liang, P., *et al.* (2012) Dynamic Selection on the Number of Antennas for Cooperative MISO in WSNs. *International Conference on Wireless Communications & Signal Processing*, 1-4. <https://doi.org/10.1109/WCSP.2012.6542882>
- [2] Xu, H., Huang, L., Qiao, C., *et al.* (2015) Joint Virtual MIMO and Data Gathering for Wireless Sensor Networks. *IEEE Transactions on Parallel & Distributed Systems*, **26**, 1034-1048. <https://doi.org/10.1109/TPDS.2014.2316833>
- [3] Pandey, K.K., Jain, A.K. and Mehrotra, S. (2016) Performance Analysis of Cooperative Communication in Wireless Sensor Network. *International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics*, 2021-2026. <https://doi.org/10.1109/ICACCI.2016.7732348>
- [4] Minakov, I., Passerone, R., Rizzardi, A., *et al.* (2016) Routing Behavior across WSN Simulators: The AODV Case Study. 2016 *IEEE World Conference on Factory Communication Systems (WFCS)*, Aveiro, 3-6 May 2016, 1-8. <https://doi.org/10.1109/WFCS.2016.7496514>
- [5] 陈永锐, 易卫东. 最大网络生存期的无线传感网协作路由算法[J]. 软件学报, 2011, 22(1): 122-130.
- [6] Pandey, O.J., Kumar, A. and Hegde, R.M. (2016) Localization in Wireless Sensor Networks with Cognitive Small World Characteristics. *Twenty Second National Conference on Communication*, Guwahati, 4-6 March 2016, 1-6. <https://doi.org/10.1109/NCC.2016.7561180>
- [7] Devasenapathy, S.D., Kathiravan, K., Nivedha, D., *et al.* (2015) Energy Efficient Wireless Sensor Networks Using FAF and Dual Cluster Head Technique for Weed Detection. 2015 *IEEE Technological Innovation in ICT for Agriculture and Rural Development (TIAR)*, Chennai, 10-12 July 2015, 96-101. <https://doi.org/10.1109/TIAR.2015.7358538>
- [8] Khan, M.H.D. and Elmusrati, M.S. (2015) Performance Analysis of Power Allocation and Relay Location in a Cooperative Relay Network. 2015 *17th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT)*, Seoul, 1-3 July 2015, 444-449. <https://doi.org/10.1109/ICACT.2015.7224908>
- [9] Razali, S.M., Mamat, K., Abdul-Basit, K., *et al.* (2014) Performance Enhancement of Wireless Sensor Network (WSN) with the Implementation of Hybrid ARQ (HARQ) and Transmission Power Control (TPC). 2014 *IEEE Conference on*

-
- Wireless Sensors (ICWiSE)*, Subang, 26-28 October 2014, 36-40. <https://doi.org/10.1109/ICWISE.2014.7042658>
- [10] Castagnetti, A., Pegatoquet, A., Le, T.N., *et al.* (2014) A Joint Duty-Cycle and Transmission Power Management for Energy Harvesting WSN. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, **10**, 928-936. <https://doi.org/10.1109/TII.2014.2306327>
- [11] Ojo, M., Adami, D. and Giordano, S. (2016) Performance Evaluation of Energy Saving MAC protocols in WSN Operating Systems. *International Symposium on PERFORMANCE Evaluation of Computer and Telecommunication Systems*, Montreal, 24-27 July 2016, 1-7.
- [12] Zhang, D.G., Wang, X., Song, X.D., *et al.* (2015) A New Clustering Routing Method Based on PECE for WSN. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, **2015**, 162. <https://doi.org/10.1186/s13638-015-0399-x>
- [13] Pandey, K.K., Jain, A.K. and Mehrotra, S. (2016) Performance Analysis of Cooperative Communication in Wireless Sensor Network. *International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics*, Jaipur, 21-24 September 2016, 2021-2026. <https://doi.org/10.1109/ICACCI.2016.7732348>
- [14] 徐毅. 无线传感器网络低能耗路由协议研究[D]: [博士学位论文]. 济南: 山东大学, 2015.
- [15] Zhang, D.G., Wang, X., Song, X.D., *et al.* (2015) A New Clustering Routing Method Based on PECE for WSN. *EURASIP. Journal on Wireless Communications and Networking*, **2015**, 162. <https://doi.org/10.1186/s13638-015-0399-x>

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2161-8801, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: csa@hanspub.org