

基于能量优化的无线传感器网络任播路由算法



周文祥 乔学工

太原理工大学信息与计算机学院 太原 030024

(1292905740@qq.com)

摘要 路由算法是无线传感器网络的关键技术之一,而任播技术是 IPv6 的三大通信模式之一。任播技术在均衡网络和服务器负载等方面有着广泛的应用前景。为了延长网络生存期,文中提出一种基于能量优化的无线传感器网络任播路由算法。首先对网络所在区域进行分区,然后计算发送节点到各基站路径的路径权重,最后发送节点根据路径权重将数据分路传输。在权重计算中,加入了节点剩余能量作为条件,并添加了低能量阈值,以防止少量路径过度损耗;添加了当前网络的生存期,以调整网络运行前后期能量权重的比重;同时,引入了灰狼算法对路径权重进行优化,找出最优的权重调节参数,以进一步延长网络生存期。仿真结果表明,通过灰狼算法可以找到更好的权重调节参数,使得网络生存期延长;通过与已有无线传感器路由算法进行比较可知,所提算法可获得更长的网络生存期,节点能耗也更加均匀。

关键词: 无线传感器网络;灰狼算法;任播;路由;并行传输

中图分类号 TP393

Anycast Routing Algorithm for Wireless Sensor Networks Based on Energy Optimization

ZHOU Wen-xiang and QIAO Xue-gong

Institute of Information and Computer, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China

Abstract Routing algorithm is one of the key technologies in wireless sensor networks. Anycast is one of the three major communication modes of IPv6. Anycast has broad application prospects in balancing network and server load. In order to extend the life of the network, this paper proposed a new routing algorithm based on energy optimization. Firstly, this model divides the area where the network is located. Then, it calculates the weight of the path which from the sending nodes to the base stations. Finally, the sending nodes divide and transmit data by path weight. In the weight calculation, the residual energy of the node is added as a condition, a low energy threshold and the current network lifetime are added to prevent excessive loss of certain paths and adjust the proportion of the energy weight before and after the network operation. Meanwhile, it introduces gray wolf optimization (GWO) to optimize path weight and find out the optimal weight adjustment parameters to extend the lifetime of network. The simulation results show that GWO can find better weight adjustment parameters and make lifetime extended. And compared with the existing WSN routing algorithm, the proposed algorithm can achieve longer lifetime and node energy consumption is more uniform.

Keywords Wireless sensor network, Grey wolf algorithm, Anycast, Routing, Parallel transmission

1 引言

无线传感器网络(Wireless Sensor Networks, WSN)在微电子、计算技术、无线通信和嵌入式技术领域有着广阔的应用前景,是目前学术界研究的热点之一。WSN具有分布范围广、体积小等特点。由于WSN节点能量有限且难于更换电池,一旦有节点耗尽能量,就可能产生网络空洞,甚至网络失效,因此延长WSN的生存期成为了研究的热点。

任播(Anycast)又被称为选播,是IPv6定义的一种新型

通信服务,在众多网络应用中占据越来越重要的位置。任播与单播、组播共同构成IPv6的三大通信模式。在传统的任播路由算法中,发送节点发送数据到最优的单个基站^[1]。有学者利用路由权重随机选择策略(Weighted Random Selection, WRS)^[2]的任播技术设计任播路由算法,将数据分别传给多个基站。该策略缓解了单一路径的过度使用,对部分节点过早死亡的问题有所缓解。但是,该方法在选择最优路径或者计算路由权重时,只考虑了单一条件,如跳数、距离等。

目前,任播路由算法比较新颖,虽有一些研究成果,但是

到稿日期:2019-09-09 返修日期:2019-12-28 本文已加入开放科学计划(OSID),请扫描上方二维码获取补充信息。

基金项目:国家自然科学基金项目(51279122);山西省自然科学基金项目(2012011013-5);山西省软科学基金项目(2014041048-4)

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (51279122), Natural Science Foundation of Shanxi Province, China (2012011013-5) and Soft Science Foundation of Shanxi Province, China(2014041048-4).

通信作者:乔学工(qiaoxg1968@aliyun.com)

相关研究还较少。文献[3]中,每个基站建立自己的 Anycast 树,网络节点选择路径开销最小的邻居节点加入到对应基站的 Anycast 树中。该算法根据不同的时延需求设置不同的权重参数来选择最优路径。文献[4]中的权重计算考虑了路径跳数,以网络生存期和路由健壮性为优化目标,利用智能算法进行优化,并通过多目标进化算法寻找到两者的最佳适应值。文献[5]利用介于 Anycast 和 Multicast 之间的 K-Anycast,该模型采用多条较好路径取代单条最好路径进行数据传输,以提高数据传输的可靠性,避免部分节点过早死亡。文献[6]结合(Advanced Research Projects Agency, ARPA)网络分散路由思想,在按需多路径距离矢量路由协议(Ad hoc On-demand Multipath Distance Vector Routing, AOMDV)多路路由协议的基础上,提出了对数据包进行分片同时沿着不同路由发送出去的算法,证明了分路传输的可行性。文献[7]提出了灰狼优化算法(Grey Wolf Optimized, GWO),其求解精度和稳定性明显优于粒子群算法、差分进化算法和引力搜索算法。文献[8]提出改进灰狼算法,并将其用于无线传感器网络定位技术中,提高了定位精度。

已有研究只选择单一条件的“最优”来选择数据传输路径,其中选择最短距离或者跳数的居多,而且选择的数据传输路径往往只有一条,容易导致该路径上的节点能量过度消耗^[9-17]。本文综合路径跳数和节点剩余能量来选择数据传输路径,在数据传输时将数据分散到多条任播路径上;同时,加入了灰狼优化算法寻找最优权重调节参数。仿真实验结果表明,本文算法延长了网络生存期,有效均衡了网络能耗,分路传输也使得数据传输的安全性有所提高。

2 数据模型

2.1 网络模型

本文中,WSN 视为连通图 $G(V, E)$ 。其中, V 为传感器节点集合, E 为节点间的通信链路集合。本文标记 T 为任播地址, $G(T)$ 为任播地址集合(即基站集合); $G(A) \subseteq V$, N 为集合 V 的节点数目; M 为 $G(A)$ 中任播地址数目; S 为发送节点集合, K 为 S 中的节点数目。

在实际应用中,WSN 节点的能量有限且难以更换电池,一旦节点能量耗尽,则认为该节点死亡。本文主要针对无线传感器网络的均衡性进行优化,以延长网络生存期。规定网络生存期 g 为网络开始运行到网络中第一个节点的能量耗尽为止。

2.2 数据传输能耗模型

在分析 WSN 中传感器节点的能耗时,采用图 1 所示的无线传输能量消耗模型。节点接收 D bit 数据的耗能为 $E_T(d, D)$, 节点发送 D bit 数据的耗能为 $E_R(d, D)$, 如式(1)、式(2)所示:

$$E_T(d, D) = DE_{elec} + DE_{amp}d^n \quad (1)$$

$$E_R(d, D) = DE_{elec} \quad (2)$$

其中, E_{elec} 表示发送或接收单位数据电路的能耗;发送数据时,需要放大信号发送,能耗参数用 E_{amp} 表示; d 表示发送节点与接收节点间的距离; n 表示衰减系数,本文中设置为 2; R 表示通信半径,节点间距离小于或等于 R 时,才可以通信。

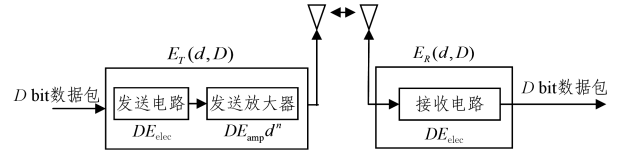


图 1 节点收发数据的能量模型

Fig. 1 Energy consumption model of sending and receiving data

3 AREO 算法

在基本任播路由算法中,发送节点根据到各基站的路由权重,将数据随机发送给相应基站。这种方式未对传输路径中节点的能量等进行监测,会导致部分节点能量损耗过快,从而缩短网络生存期。

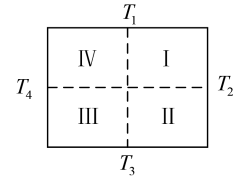


图 2 矩形区域分区图

Fig. 2 Rectangular area partition map

因此,本文提出基于能量优化的任播路由算法(Anycast Routing of Energy Optimization, AREO),将无线传感器节点随机布置在矩形区域中,如图 2 所示,基站数目为 4,且位于矩形每条边的中点位置,按顺时针依次编号为 T_1, T_2, T_3, T_4 。以基站 T_1, T_3 的连线以及 T_2, T_4 的连线将矩形区域划分为 4 个区域,分别标记为 I, II, III, IV。

通过发送节点的位置定位其所在区域。若发送节点位于 I 区,则发送节点数据传输的目的基站为 T_1, T_2 ;若发送节点位于 II 区,则发送节点数据传输的目的基站为 T_3, T_4 ,其他情况同理。具体传输方式如下:记录发送节点到目的基站的跳数以及传输路径的能量,通过计算得到路径权重;之后,将数据包根据路径权重通过分路传输的方式传输给各个基站,均衡网络负载,避免部分节点过快死亡,从而延长网络生存期。

3.1 权重计算方式

3.1.1 跳数权重

设发送节点 $s_i \in S (i=1, 2, \dots, L) (L \leq K)$ 至任一目的基站都至少有一条任播路径, s_i 到基站 T_j 的路径集合为 $R_{ij} = \{R_{ij1}, R_{ij2}, R_{ij3}, \dots, R_{ijx}, \dots, R_{ijX}\}$, 其中 $i=1, 2, 3, \dots, L, j=1, 2$ 。 X 为 s_i 到 T_j 路径的总数,将路径 R_{ijx} 的跳数标记为 r_{ijx} , 其跳数权重值 h_{ijx} 的计算式如式(3)所示:

$$h_{ijx} = \frac{1}{r_{ijx}} \quad (3)$$

3.1.2 能量权重

如图 3 所示,对于某一路径 R_{ijx} ,已知其跳数权重 h_{ijx} 、能量权重 e_{ijx} , R_{ijx} 的路径权重 ω_{ijx} 的计算式如式(4)所示:

$$\omega_{ijx} = \begin{cases} 0.01, & e_{ijx} \leq e' \\ ch_{ijx} + \frac{g'}{10} * (1-c)e_{ijx}, & e_{ijx} > e' \end{cases} \quad (4)$$

其中, g' 为当前网络的生存时间; c 为权重调节参数; e' 为低能量限制阈值, 此处设置为 0.05J 。式(4)中, 在能量权重 $e_{ijx} \leq e'$ 时, 路径权重 ω_{ijx} 置为 0.01 , 其目的是在分路传输时, 避免对某一路径上节点能量的过度损耗, 以进一步均衡能耗。同时, 加入 g' , 使得能量权重在网络运行的初始阶段和最后阶段有不同的比重。

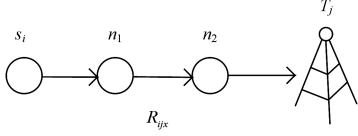


图3 路径模型图

Fig.3 Model of path

3.2 分路传输机制

以某一发送节点 s_i 为例, s_i 将数据传给基站 T_1, T_2 。 s_i 到两基站的路径集合分别为: $R_{i1} = \{R_{i11}, R_{i12}, R_{i13}, \dots, R_{i1y}, \dots, R_{i1Y}\}$ 和 $R_{i2} = \{R_{i21}, R_{i22}, R_{i23}, \dots, R_{i2z}, \dots, R_{i2Z}\}$, 其中 Y 和 Z 分别表示 s_i 到两个基站 T_1, T_2 的路径总数, 且到两个基站的路径和各路径的路径权重已知。

发送节点根据到不同基站路径的路径权重将数据分发给基站, 具体流程如下:

1) 在 R_{i1} 中选择路径权重最大的路径, 将其作为发送节点 s_i 到基站 T_1 的最优路径, 并将此路径标记为 R'_{i1} , 将此路径的路径权重标记为 ω_{i1} 。同理可得发送节点 s_i 到基站 T_2 的最优路径 R'_{i2} 及其路径权重 ω_{i2} 。

2) 将选择出的路径的路径权重做归一化处理, 如式(5)、式(6)所示:

$$\omega'_{i1} = \frac{\omega_{i1}}{\omega_{i1} + \omega_{i2}} \quad (5)$$

$$\omega'_{i2} = \frac{\omega_{i2}}{\omega_{i1} + \omega_{i2}} \quad (6)$$

3) 设发送节点 s_i 发送的数据总量为 D , 那么通过路径 R'_{i1} 发送的数据量大小为 $\omega'_{i1} \times D$, 通过 R'_{i2} 发送的数据量大小为 $\omega'_{i2} \times D$ 。 s_i 分发数据即可完成分路传输。

4 基于灰狼算法改进的 AREO 路由算法 (Grey Wolf Optimized Anycast Routing of Energy Optimization, GAREO)

4.1 灰狼优化算法

灰狼优化算法^[18]是一种模拟灰狼的社会等级和狩猎行为的新群体智能优化算法。该算法的优势在于结构简单、不考虑梯度信息、参数少、全局搜索能力强等, 在工程实践中有着广泛应用。在对 GWO 进行数学建模时, 将狼的社会等级由高到低设置为 $\alpha, \beta, \delta, \lambda$ 4 个等级。狼的狩猎行为的主要过程是: 跟踪接近猎物、追赶猎物、包围攻击猎物。

灰狼群狩猎跟踪接近猎物时, 包围步长和灰狼位置的计算方法如式(7)、式(8)所示:

$$D = |C \cdot X_p(t) - X(t)| \quad (7)$$

$$X(t+1) = X_p(t) - A \cdot D \quad (8)$$

其中, t 表示当前迭代次数; X_p 是猎物位置; $X(t)$ 是灰狼位置; D 表示包围步长; A 和 C 为系数向量, 如式(9)和式(10)所示:

$$A = 2a \cdot r_1 - a \quad (9)$$

$$C = 2 \cdot r_2 \quad (10)$$

其中, r_1 和 r_2 是 $[0, 1]$ 的随机向量; 收敛因子 a 是控制参数, 随迭代次数从 2 递减到 0。

在追赶猎物阶段, 由于算法定义种群最优解为 α 狼、次优解为 β 狼、次次优解为 δ 狼, 剩下的种群个体为 λ 狼。因此, λ 狼根据 α 狼的当前位置 X_α 、 β 狼的当前位置 X_β 、 δ 狼的当前位置 X_δ 来更新位置, 如式(11)和式(12)所示, 式(12)表示 λ 狼向 α, β, δ 狼前进的步长和方向。

$$\begin{cases} X_1 = X_\alpha(t) - A_1 \cdot |C_1 \cdot X_\alpha(t) - X(t)| \\ X_2 = X_\beta(t) - A_2 \cdot |C_2 \cdot X_\beta(t) - X(t)| \\ X_3 = X_\delta(t) - A_3 \cdot |C_3 \cdot X_\delta(t) - X(t)| \end{cases} \quad (11)$$

$$X(t+1) = (X_1 + X_2 + X_3) / 3 \quad (12)$$

在最后的包围攻击阶段, GWO 算法根据 A 和 C 的值控制探索和开发过程。

4.2 GAREO 算法的流程

对于 AREO 算法, 在同一网络拓扑环境下, 当式(4)中的权重调节参数 c 变化时, 会使得网络生存期 g 发生变化, 其中每个 c 对应的 g 通过仿真求得。利用灰狼算法寻找最优的权重调节参数 c , 可使网络生存期最长, 且相同环境下只进行一次 c 的优化。设置适应度函数如式(13)所示:

$$f(c) = \max(g) \quad (13)$$

GAREO 算法的具体流程如算法 1 所示。

算法 1 GAREO 算法

输入: 网络环境, 最大迭代次数

输出: c, g , 节点剩余能量

1. 初始化父代种群、突变种群、子代种群, 设置狼群规模、迭代次数、缩放因子上下界。
2. 适应度函数计算父代种群个体的适应度值, 并将适应度值按照从大到小的顺序排列, 将目标函数值最优、次优、次次优的个体位置标记为 $X_\alpha, X_\beta, X_\delta$ 。
3. 根据式(11)、式(12)计算其他搜索个体与 α 狼、 β 狼、 δ 狼之间的相对距离, 并由 α 狼、 β 狼、 δ 狼决定其下一步的移动方向, 确定新个体的位置, 生成新的父代种群, 然后计算个体适应度值。
4. 检查是否满足最大迭代次数或所有个体均已收敛, 若满足则终止, 否则执行步骤 3。
5. 根据 GWO 计算所得的最优 c 值, 运行 AREO 算法进行数据传输。

5 仿真模拟

5.1 仿真实验

计算机仿真环境为 MATLAB R2014b, 网络环境等参数如表 1 所列。

表 1 参数设置

Table 1 Parameter setting

参数	数值
仿真区域及原点位置	100 m × 100 m, 左下角
仿真区域坐标范围	(0, 0) - (100, 100)
基站位置	(0, 50), (50, 0), (100, 50), (50, 100)
总节点数目及位置	100, 随机
总节点中发送节点数	50
普通节点初始能量/J	0.5
发送节点初始能量/J	1.0
E_{elec}, E_{amp}	$50 \times 10^{-9}, 100 \times 10^{-12}$
R, D	14, 2000

仿真开始时,网络洪泛,各节点将自己的初始能量及位置信息传递给其他节点,各基站汇总所有节点的初始能量及位置信息。仿真实验中,默认基站对各节点位置已知,且各节点的初始能量设置为固定值。然后,按照 GAREO 算法的流程进行仿真。值得注意的是,传输路径计算、分路传输到各基站的数据包整合等工作均由基站完成,不耗费节点能量。基站计算好传输路径之后,广播发送给各节点,各节点负责接收即可。各节点将剩余能量信息在节点传送数据包时一同传回基站。节点接收基站发送的传输路径信息和将节点剩余能量传回基站的过程中产生的能耗忽略不计。

5.2 结果分析

5.2.1 不同 c 时 AREO 网络生存期的对比

从图 4 中可以看出,网络生存期的值随 c 值的增大先增大后减小,且 c 在 $[0.6, 0.8]$ 内有最优网络生存期,最终由 GWO 算法确定最优 c 值为 0.7。将此值代入 AREO 算法,完成灰狼算法改进的 AREO 路由算法的仿真。

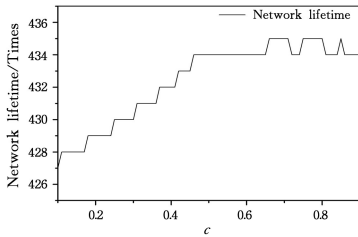


图 4 不同 c 值时的网络生存期

Fig. 4 Network lifetime with different c

5.2.2 AWRS 和 GAREO 网络生存期的对比

本文将基于最小跳数的 WRS 权重分路传送任播算法(即基本 Anycast 算法)作为对照算法,将此算法记为 AWRS 算法。上文所得最优权重调节参数 $c=0.7$,在当前仿真环境下,将本文算法 GAREO 与 AWRS 算法进行网络生存期的对比,其中网络生存期 g 设置为网络开始运行到出现任一节点能量为 0 时 WSN 收发数据的次数。

本文共进行 60 组对照实验,各组实验节点的分布情况相互独立,节点均为随机产生,实验结果如图 5 所示。同一组对照实验中,节点分布情况相同。对比两种算法的生存期可以看出,AWRS 和 GAREO 算法的网络生存期在不同节点分布情况下产生波动。AWRS 的平均网络生存期为 259,GAREO 的平均网络生存期为 405,因此 GAREO 算法的生存期优于 AWRS。

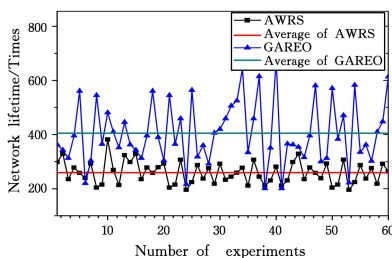


图 5 AWRS 与 GAREO 网络生存期的对比

Fig. 5 Comparison of network lifetime between AWRS and GAREO

5.2.3 相同生存期下 AWRS 和 GAREO 所有节点的剩余能量方差的对比

将网络生存期分别为 307 代的 AWRS 算法和 304 代的 GAREO 算法进行对比,结果如图 6 所示。可以看出,所有节点的剩余能量方差随网络生存期的增加而先减小后增大;除开始阶段外,GAREO 算法所有节点的剩余能量方差均小于 AWRS 算法。因此,当网络生存期相同时,GAREO 算法在能耗均衡方面具有优势。

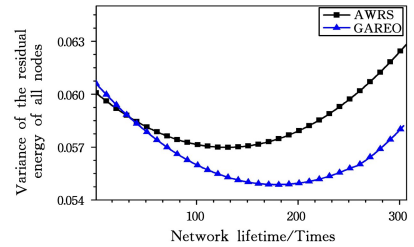


图 6 相同生存期下的所有节点剩余能量方差的对比

Fig. 6 Comparison of variance of all nodes' residual energy under the same network lifetime

5.2.4 不同生存期下 AWRS 和 GAREO 所有节点剩余能量方差的对比

本文共进行 60 组对照实验,各组实验节点的分布情况相互独立,节点均为随机产生,实验结果如图 7 所示。同一组对照实验中,节点的分布情况相同。当网络死亡时,AWRS 所有节点剩余能量方差的均值为 0.0651,GAREO 所有节点剩余能量的方差均值为 0.0631。因此,GAREO 算法的节点能量消耗更均衡。

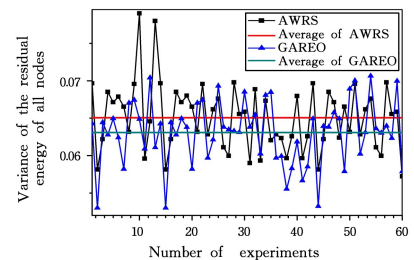


图 7 不同生存期下所有节点剩余能量方差的对比

Fig. 7 Comparison of variance of all nodes' residual energy under different network lifetime

5.2.5 AWRS 算法与 GAREO 算法的容错性对比

为了检验算法的容错性,将网络生存期 g 重新设置为网络开始至网络中任一发送节点在基站无连通路可传输时经历的迭代次数。所有节点的剩余能量方差的对比如图 8 所示。AWRS 在生存期为 191 处出现第一个死亡节点,随后所有节点的剩余能量方差迅速增加并保持稳定;GAREO 在生存期为 573 处出现第一个死亡节点,由于在开始阶段,算法偏向选择跳数最小的路径,使得剩余能量方差出现了先增加后减小的变化。总体来看,GAREO 的剩余能量方差一直低于 AWRS,说明在网络可能出现空洞时,GAREO 也有较好的性能,容错性优于 AWRS。

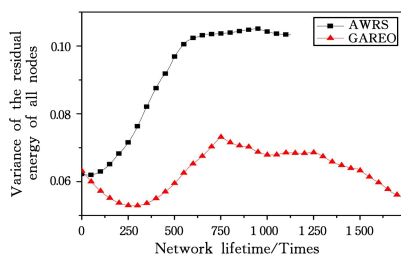


图8 新生存期下所有节点剩余能量方差的对比

Fig. 8 Comparison of variance of all nodes' residual energy in new definition of lifetime

结束语 本文提出了一种基于能量优化的无线传感器网络任播路由算法,在开始阶段,对网络所在区域进行分区,减小路径计算开销,舍去跳数过多的路径,避免过多的路径交叉;之后,利用灰狼算法进行优化,找出最优的权重调节参数,得到最大网络生存期;在最后阶段,利用加入能量的路径权重和分路传输机制发送数据。仿真实验结果表明,本文算法相比已有的路由算法,有效延长了网络生存期,网络能耗更加均衡,分路传输的使用也使得数据传输更加安全。但是,该算法还存在一些不足:1)在环境设定之后,利用灰狼算法查找最优权重调节参数时,需要对不同值进行多次仿真,虽然由基站完成此工作,但是存在计算量较大的问题;2)该算法只考虑了固定发送节点的情况,其是否适用于所有节点均参与收集、发送数据的情况,还有待进一步的研究;3)虽然算法根据节点分布已做出优化,但在极端情况下,基站附近节点的个数会较多或较少,存在网络生存期极值相差较大的情况,从而影响算法的稳定性,此问题还有待改进。

参考文献

- [1] LI J, LU S W. Research and Design of Routing Protocols for IPv6 Anycast Communication[J]. *Computer Systems & Applications*, 2007, 16(9): 26-30.
- [2] XUAN D, JIA W, ZHAO W, et al. A routing protocol for anycast messages[J]. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 2000, 11(6): 571-588.
- [3] LIN H F, LIU Y F. Routing Protocol Based on Anycast Scheme for Wireless Sensor Networks with Multiple Sinks[J]. *Journal of South-Central University for Nationalities (Natural Science Edition)*, 2018, 37(1): 120-124.
- [4] GU Y L, XU X, ZHANG Y J. Anycast Routing Algorithm Based on Evolutionary Algorithm for Wireless Sensor Networks [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2018, 31(3): 436-441.
- [5] GAO D M, QIAN H Y, YAN X Y, et al. k-Anycast Routing Protocol for Wireless Sensor Networks[J]. *Computer Science*, 2011, 38(8): 33-37.
- [6] GAO X L. Research on the Parallel Routing Mechanisms and Methods Based on AOMDV[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2017.
- [7] MIRJALILI S, MIRJALILI S M, LEWIS A. Grey Wolf Optimizer[J]. *Advances in Engineering Software*, 2014, 69(3): 46-61.
- [8] DUAN Y Q, WANG H Q, QIAO X G. Sensor Node Localization

Based on RSSI Ranging and Grey Wolf Optimizer Algorithm in Wireless Sensor Network[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2018, 31(12): 1894-1899.

- [9] HADI F, AHMED S, MINHAS A A, et al. Wireless-powered cooperative energy aware anycast routing in wireless sensor networks[J]. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2016, 12(11): 1-13.
- [10] GU Y, XU X, CHENG Y, et al. Anycast Routing Algorithm Based on Krill Herd Optimization for Wireless Sensor Networks [J]. *Journal of Information and Computing Science*, 2017, 12(3): 234-240.
- [11] KOSTIN A E, FANAEEAN Y, AL-WATTAR H. Anycast tree-based routing in mobile wireless sensor networks with multiple sinks[J]. *Wireless Networks*, 2016, 22(2): 579-598.
- [12] GAO D, LIN H, LIU X. Routing protocol for k-anycast communication in rechargeable wireless sensor networks[J]. *Computer Standards & Interfaces*, 2016, 43: 12-20.
- [13] KHAN Z A, AWAIS M, ALGHAMDI T A, et al. Region Aware Proactive Routing Approaches Exploiting Energy Efficient Paths for Void Hole Avoidance in Underwater WSNs[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 140703-140722.
- [14] KALEESWARI N, PRABU S S A J. Optimization Approach for Energy Consumption in Wireless Sensor Networks using Delay Aware Dynamic Routing Protocol[J]. *International Journal of Emerging Trends in Engineering and Development*, 2017, 2(7): 54-61.
- [15] THANGARAMYA K, KULOTHUNGAN K, LOGAMBIGAI R, et al. Energy aware cluster and neuro-fuzzy based routing algorithm for wireless sensor networks in IoT[J]. *Computer Networks*, 2019, 151: 211-223.
- [16] HOU Y T, SHI Y, SHERALI H D. Optimal base station selection for anycast routing in wireless sensor networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2006, 55(3): 813-821.
- [17] GU Y L, XU X, DU J. Prefix-based Anycast Routing Protocol for Wireless Sensor Networks [J]. *Computer Science*, 2018, 45(12): 81-85.
- [18] AJAY K, INDU S, DAYA G. A Grey Wolf Optimization Approach for Improving the Performance of Wireless Sensor Networks[J]. *Wireless Personal Communications*, 2019, 106(3): 1429-1449.



ZHOU Wen-xiang, born in 1993, postgraduate. His main research interests include wireless sensor network and so on.



QIAO Xue-gong, born in 1968, Ph.D., associate professor, postgraduate supervisor. Her main research interests include wireless sensor network and intelligent control.