

无线 mesh 传感器网络跨层路由算法

李勇 郭墨飞 王平 夏青

(重庆邮电大学网络化控制与智能仪器仪表教育部重点实验室 重庆 400065)

摘要 针对无线 mesh 传感器网络的需求,提出一种综合量度的跨层路由协议 HLS。算法 HLS 利用底层的链路质量信息、MAC 层时隙分配信息,结合跳数对备选路径做出综合判断,避开质量较差的链路和负载较重的节点。路由发现过程中在中间节点设置链路质量和节点负载阈值,并根据相关信息进行延时转发操作,以减少不必要的路由开销。在路由维护阶段使用主动和被动相结合的方式全面检测路由路径。NS2 的仿真结果表明,HLS 协议在吞吐量、端到端时延以及网络生存时间上有更好的表现。

关键词 无线 mesh 传感器网络,负载均衡,混合路由量度,跨层设计

中图分类号 TP393 **文献标识码** A

Cross-layer Routing Metric for Wireless Mesh Sensor Network

LI Yong GUO Mo-fei WANG Ping XIA Qing

(Key Laboratory of Network Control & Intelligent Instrument, Chongqing University of Posts and Telecommunication, Chongqing 400065, China)

Abstract For the requirements of wireless mesh sensor network, a comprehensive measure of cross-layer routing protocol HLS was proposed. HLS algorithm uses the link quality information at the bottom, distribution information of MAC layer and combines with hop counts to make comprehensive judgment for the alternative route to avoid lower quality link and heavy load nodes. In the process of route founding, link quality and node load thresholds are set in the middle nodes and the delay forwarding operations are taken according to relevant information to reduce unnecessary routing overhead. In the routing maintenance phase, passive and active methods are used to detect the routing path comprehensively. Simulation results of NS2 show that HLS has better performance in throughput capacity, end-to-end delay and network life time.

Keywords Wireless mesh sensor network, Load balancing, Combined routing metric, Cross-layer design

无线传感器网络(Wireless Sensor Networks, WSN)中各节点靠电池供电,通信距离、处理能力以及能量资源都有限。同时,传感器网络的带宽狭窄、数据传输的可靠性不佳,存在着较高的丢包率和错误率。无线 mesh 网(WMN)是一种网状网络,也称为无线多跳网,具有自组织、自管理、自愈能力。mesh 网可以解除 Ad Hoc 网、无线局域网(WLANs)、无线个域网(WPANs)等传统无线网络的一些限制,并提高其性能。所以,将无线 mesh 与传感器网络相结合构成无线 mesh 传感器网络已成为大势所趋,同时也是 mesh 应用的一个重要方面。

目前大部分的 mesh 网络路由协议都是由 Ad Hoc 网络的路由协议扩展而成的,比如先验式路由协议中的 DSDV、WRP,以及按需路由协议中的 DSR、AODV 等。但是,如文献[4]所述,直接使用 Ad Hoc 路由的 mesh 网络性能表现不佳。此外,一些适用于 WMN 的新型路由协议还不太成熟,有待于进一步的改善。综上,结合 mesh 网络和传感器网络的特

点开发出适用于无线 mesh 传感器网络的路由协议是当前研究的热点问题。

本文首先通过实验验证了底层通信链路质量指示标志 LQI 与链路数据包接收率之间的关系,并证明了 LQI 的平均相关值可以准确反映通信链路质量;之后分析了几种典型的路由量度各自的优缺点;接着从实际测量的通信链路质量和每个节点的负载量着手,结合跳数、LQI 平均相关值和节点负载提出了一种新的路由算法 HLS。

1 几种典型的路由量度

在路由算法中路由量度是非常重要的,路由算法的好坏在很大程度上取决于路由量度。每一种路由量度都从不同的角度衡量了路由代价的开销,但是它们都存在各自的优缺点,这里做些简要介绍。

最小跳数量度(Hops)

Hops 量度选取从源节点到目的节点总跳数最小的路径。

到稿日期:2012-05-29 返修日期:2012-08-17 本文受重庆高校优秀成果转化资助项目(KJzb10207),重庆市工程技术研究中心建设项目(CSTC,2011pt-gc40006),重庆市科技攻关计划项目(CSTC,2011AB2096)资助。

李勇(1976-),男,博士,副教授,主要研究方向为工业无线通信技术,E-mail:023liyong@163.com;郭墨飞(1988-),男,硕士生,主要研究方向为工业无线通信技术;王平(1963-),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为工业以太网及网络控制技术、无线网络控制技术。

该量度所对应的链路质量是一个二态概念,只有存在与不存在。它的优点在于:1. 简单容易计算,开销小;2. 具有保序性,可以避免环路的存在。缺点在于:没有考虑到传输速率、丢包率、干扰和带宽等因素。它适用于节点状态类似、传输状况良好的情况。经典 AODV 路由协议就是采用的最小跳数量度。

累积链路质量量度(CLQR)

文献[6]提出了一种累积链路质量量度,CLQR 主要关注的是每条路由路径上 LQI 的和值。其优点在于:考虑到了通信的链路质量,能在一定程度上减少丢包率、增加吞吐量;其缺点在于:1. LQI 和值较大路径的跳数也可能很多,从而导致路由代价过大;2. 在选择的路径上可能存在链路质量很差的单跳而引发的瓶颈问题。

期望传输次数量度(ETX)

文献[7]提出了 ETX 路由算法。ETX 定义为 MAC 层通过一条无线链路成功地传输一个数据包所需期望传输次数,并通过发送广播包的方法对 ETX 进行估计。其优点在于:1. 以广播包代替了单播包,减小了网络开销;2. 捕捉到了链路丢失和非对称性的影响。缺点在于:没有考虑到链路负载、数据传输速率以及存在的干扰。

期望传输时间量度(ETT)

文献[8]提出了 ETT 路由算法。ETT 算法考虑到了传输速率的因素,是对 ETX 算法的改进。ETT 定义为 MAC 层通过一条无线链路成功传输一个数据包所期望的传输时间。ETT 与 ETX 的关系式如下:

$$ETT_j = ETX_j \frac{s}{b_j} \quad (1)$$

式中, b_j 是链路 j 上的传输速率; s 是数据包的大小。其优点在于:将传输速率引入路径权重,考虑到了路径性能的影响;缺点在于:1. 获得每条链路上传输速率的代价过高;2. 没有考虑到干扰问题。

由于无线传感器网络不仅是面向应用的,而且是以数据为中心的网络,因此上述的路由量度的优缺点在 WSN 网络中依然存在。针对于各自路由量度的优缺点,本文主要从以下两个方面做出改进:

(1)多准则:综合考虑多种因素对路由的影响,因地制宜,使得网络性能得到全面提高。但是,多准则绝不是将各种量度简单地堆叠在一起,尤其是对于无线网络而言,必须考虑时间复杂度以及能耗开销等问题。

(2)跨层路由:跨层协议主要是以全局的观点看待每一层的参数和信息,能够将分散在各层的网络信息融合在一起,最大程度地挖掘无线网络的优势,从而设计出更加可靠、高效的路由算法。

2 研究动机

2.1 链路质量的测量

目前大部分评估链路质量的方法是基于发送大量的探测包用统计的手段计算出包接收率 PRR (packet reception rate),包接收率能直观地反映出当前链路的通信质量。然而,获得尽可能准确的链路质量需要大量的探测包,这就会浪费大量的带宽,消耗大量的能量,这是传感网所不能允许的。另外,链路质量是随着环境、距离等因素不断变化的,而统计则需要一定的时间,这就导致这种方法的实时性较低。

随着芯片技术的不断革新,传感器节点芯片能够提供链路质量的硬件检查。如德州仪器出产的通信芯片 CC2530,它可以在硬件中直接提供两种能够指示链路质量的数据,即接收信号强度指示 RSSI 和链路质量指示 LQI。文献[5,7]的实验结果表明,LQI 比 RSSI 能够更加准确地反映出链路通信质量的好坏。对 LQI 而言,单个的数据是不能表明任何问题的,所以本文中采用 LQI 的相关平均值作为链路质量好坏的指示指标。根据 CC2530 的芯片手册得知,LQI 的相关平均值在[50,110]之间。

文献[9,11]的实验结果表明,PRR 和 LQI 具有非常紧密的关系,也都得到了相关的实验曲线。本文在它们的基础上也进行了实验测试,得到的 PRR 与 LQI 的关系曲线如图 1 所示。

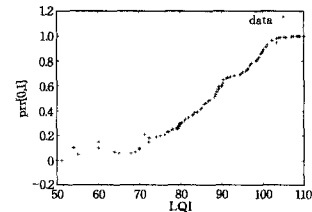


图1 LQI 均值与 PRR 之间的关系

根据曲线走势可以将该曲线分为 3 个区域,分别是:[50,75],[75,100],[100,110]。

①[50,75]定义为丢弃区域 AA(abandon area),在这个区域中 $PRR < 10\%$,链路质量很差,基本上不能用于通信,所以在这个区域内的链路直接丢弃。

②[75,100]定义为中间区域 MA(middle area),在这个区域中 $10\% < PRR < 90\%$,链路质量不太稳定,PRR 有较大的波动。

③[100,110]定义为优先区域 PA(prior area),在这个区域中 $PRR > 90\%$,链路质量很好,在建立路由过程中需要优先选择。

2.2 节点负载的评估

目前对于节点负载大小的判断主要是根据节点网络层发送缓存队列的长度以及传输速率做出评估,公式如下:

$$N_i = \frac{Q_i}{R_i} \quad (2)$$

式中, Q_i 表示节点队列的长度, R_i 表示节点的传输速率。在这种方法中,节点缓存队列长度只能表征当前时刻节点负载的大小,不具有一般性。为了改进这一问题,本文提出了一种新的节点负载评估方法,即用节点的时隙使用量 S 和时隙剩余量 Y 来表征节点负载。引入一个新的概念:时隙负载 C_i :

$$C_i = \frac{T_i}{P} \times \frac{L_i}{R_i} \quad (i \in S) \quad (3)$$

式中, T_i 表示在 P 个超帧周期内,时隙 i 被调用发送数据的次数。 L_i 表示节点使用时隙 i 在 P 个超帧周期内发送数据包长度的平均值。 R_i 表示节点的传输速率。所以节点 a 总的负载量为:

$$V_a = \prod_{i=1}^S C_i = \prod_{i=1}^S \frac{T_i L_i}{(P)^S R_i} \quad (4)$$

3 网络模型与问题描述

3.1 网络模型

无线 mesh 网络可以抽象为一个无向图 $G = \langle V_G, E_G \rangle$,其

中 V_G 为 G 中所有节点的集合且 $V_G = V_R \cup V_T$ 。每个节点 $u \in V_R$ 是 mesh 网络中的骨干节点,而骨干网是由接入点(access points, APs)组成的。每个节点 $u \in V_T$ 是 mesh 网络中除骨干节点之外的所有节点。两个节点之间的边 $E_G = E_F \cup E_A$ 表示两个节点之间有直接通信能力,并假定它们之间的通信能力是双向的。其中每条边 $e \in E_F$ 表示两个节点之间使用 CFP 阶段的时隙进行通信, $e \in E_A$ 表示两个节点之间使用 CAP 阶段的时隙进行通信。

3.2 问题描述

为了优化 mesh 网络性能,需要采用合理路由量度,设计出相应算法以提高所选路径的质量,如:提高吞吐量、降低丢包率、平衡负载等。但是,大部分路由算法只考虑到了个别参数所造成的影响,从而只能使路由算法在某一方面得到改善。另外,以往的路由算法更多地考虑从终端节点到接入点 APs 之间的路径,这种算法有一定的局限性,不能适用于网络中任意两个节点之间的可靠通信。因此,为了解决上述问题,要求综合考虑多种对路由质量有影响的重要因素,实现一种能够完成 mesh 网络中任意源节点 S 和目的节点 D 之间可靠通信的路由算法。

4 算法设计

本文中提出的全新路由算法 HLS 采用的是按需方式。在路由发现阶段通过对跨层信息的整合加入了部分节点延时操作,有效改善了一般洪泛机制所带来的信息“内爆”和“重叠”;在路径选择上是根据混合路由准则来决策的。在路由维护中加入一种主动路由维护机制。下面就这 3 方面进行简要描述。

4.1 路由发现

当源节点要和另一目标节点通信且没有到达目标节点的有效路由时,通过广播路由请求分组 RREQ 发起路由发现过程。

每个中间节点收到路由请求分组 RREQ 后,要进行如下的判断:

```
if( $L_i < \gamma$  or  $C_i > \delta$ )
    丢弃 RREQ 分组;
else
```

更新链路质量权重值和节点负载权重值,继续转发 RREQ 分组。

其中 L_i 表示到达节点 i 的链路的链路质量 LQI 值; C_i 表示某一路径中节点 i 的负载; γ 表示链路质量门限值; δ 表示节点负载门限值。经过这样一步判断就能够避免路径中由于个别链路或节点不合格而引发的瓶颈问题。

同时,为了改善洪泛法的相关缺陷并增加较好链路和节点被选中的概率,在路由发现中加入延时转发操作。具体的实现可以采用阶梯式的分区选择,如图 2 所示。

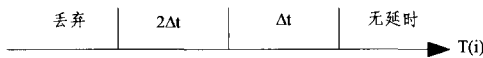


图 2 延时操作示意图

这里的延时判断量是链路质量和节点负载加权平均后的值:

$$T_i = aLQI_i + bS_i \quad (5)$$

为了避免路由发现的时延过长,这里直接使用节点的时

隙使用个数来表征节点负载的大小。所以,式(5)中的 S_i 表示节点 i 已经使用的时隙个数。 a, b 为权值系数,通过改变权值系数可以分配各个参数在延时判断中的比重,且 $a + b = 1$ 。

4.2 路由选择

路径的链路质量和节点负载是衡量路由质量的重要指标。链路质量越高,数据传输的可靠性越高;所选路径中的节点负载越小,网络的拥塞现象越少、负载越平衡、生存时间越长。另外,当路径质量良好时,跳数 n 则成为路径选择的关键指标。

目的节点收到 RREQ 之后,使用式(6)计算路径质量权重值。

$$W_k = \prod_i L_i + \prod_i H_i \quad (6)$$

式中, $\prod_i L_i$ 为路径 k 上各链路的权重值, $\prod_i H_i$ 为路径 k 上各节点负载的权重值。 W_k 表征了路径 k 的质量。 W_k 值越大,则路径质量越好。

L_i 可由式(7)得到:

$$L_i = \exp\left[\frac{LQI_i}{AverLQI}\right] \quad (7)$$

式中, $AverLQI$ 是某一备选路径 LQI 的平均值:

$$AverLQI = \frac{1}{n} \sum_{a=1}^n LQI_a \quad (8)$$

L_i 的值可以反映路径链路质量的好坏, L_i 值越大,说明路径质量越好。

H_i 可由式(9)得到:

$$H_i = \left(1 - \prod_{j \in S(p)} \frac{T_j}{(p)}\right) \times f(y_i) \quad (9)$$

式中, S 表示节点 i 自身已使用的时隙集合; y_i 表示节点 i 剩余可用的时隙数。

$$f(y_i) = \ln(1 + y_i) \quad (10)$$

式中, H_i 可以表征节点负载的大小。 H_i 的值越大,表明节点的负载量越小,那么该节点所在的路径的质量就越好。

路径质量权重值越大,表明路径质量越好。但是为了避免出现路径质量相差无几但是跳数却相差很大这种情况,需要引入一个路径质量权重门限值 β 。大于 β 的路径称为较好路径 PR(preferable route); 小于 β 的路径称为一般路径 CR(common route)。

混合度量的基本思想就是要综合考虑 W 和 Hops 之间的关系。即同属于 PR 的路径按照 Hops 量度选择最佳;同属于 CR 的路径以及分别属于 PR 和 CR 的路径按照路径质量 W 选择最佳。

综上可得,路由请求 RREQ 分组的报文格式如图 3 所示。

命令选项
路由请求标识符
目的地址
每跳节点负载量 H
每跳链路质量 LQI
路径链路质量和值 SumLQI
跳数 n

图 3 RREQ 分组报文格式

4.3 路由响应

在通过前面的方法选择到的路由路径中很有可能包含了

没有相互通信时隙的节点,这时就需要动态时隙分配,以确保所选路径畅通。并且,针对目前发送数据所需时隙只能是非竞争访问时段 CFP(contention free period)的固有思想,提出了可使用竞争访问时段 CAP(contention access period)发送数据的想法。具体过程如表 1 所列。

表 1 路由响应过程

编号	简要描述
(1)	在发送路由响应之前判断自身与下一跳节点之间是否有连接关系,若有转向(5),没有转向(2);
(2)	判断节点间是否有共同空闲的 CFP 时隙,有转向(3);没有转向(4);
(3)	选取共同空闲的 CFP 时隙中的一个,用来彼此收发数据,转向(5);
(4)	选用 CAP 用来彼此之间收发数据,转向(5);
(5)	继续路由响应的转发。

4.4 路由维护

HLS 的路由维护分为主动路由维护和被动路由维护两种。

主动路由维护主要是路由质量维护。在源节点使用源路由进行数据传输的同时,关注路由路径链路质量的变化。该过程可由滑动窗口完成,如图 4 所示。

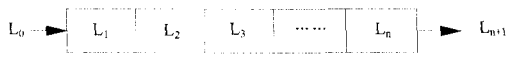


图 4 滑动窗口

滑动窗口的宽度为 n ,若节点在第 n 次接收到的数据包中的 W 的值大于设定的阈值,则 $L_n = 1$,低于设定的阈值则 $L_n = 0$ 。 L_1 是节点最新接收到的数据包中的 W 的转换值。当节点收到新的数据包时,滑动窗口中的数值均向右移一位,将原有的 L_n 值删除,新的 W 转换值填进 L_1 。当滑动窗口中 0 的个数多于所设定的阈值时,表示现在路径质量变差,需要进行主动路由维护,通知源节点发起新一轮的路由发现。

被动路由维护主要是路由断路维护。若传输源路由的中间节点发现链路下一跳断裂,则要进行路由断路维护,通知源节点发起新一轮的路由发现。

5 仿真测试

5.1 仿真参数设置

本文使用 Linux 下的 NS-2 进行仿真实验检验 HLS 路由算法的性能,并与经典的 AODV 协议和单独以链路质量作为量度的路由协议(这里称之为 LQI-AODV)进行分析比较。仿真场景设定 100 个节点随机地分配在 $100\text{m} \times 100\text{m}$ 的正方形区域内,仿真历时 200s,每一秒从源节点向目的节点发送 20 个数据包。主要参数如表 2 所列。

表 2 仿真主要参数设置

参数	参数设置
路由协议	AODV, LQI-AODV, HLS
MAC 协议	IEEE 802.15.4
节点分布	随机分布
LQI 随机值范围	[50, 110]
发送功率	0dBm
信道带宽	250kbps
仿真时间	200s

5.2 仿真结果分析

根据表 2 中的参数设置进行了多次仿真实验。测试指标

为端到端的吞吐量 $T(t)$ 、端到端时延以及网络的生存时间。其中参数 T 的定义如下:

$$T = \frac{\text{发送帧的数量} \times \text{帧长度(byte)} \times 8}{\text{测量时间} \times 1024} \quad (11)$$

式(11)中除以 1024 是为了将单位转化为 kbps。仿真结果与说明如下。

图 5 为网络平均吞吐量随时间变化的曲线。

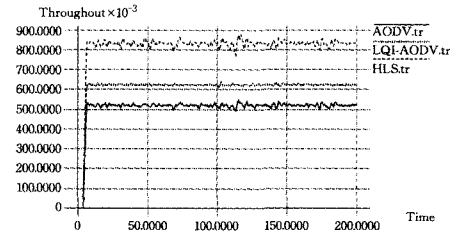


图 5 随着时间增加,吞吐量 T 的变化

由图 5 可见, HLS 协议的网络吞吐量明显高于另外两种协议。这是因为 HLS 协议不仅考虑了所选路径的链路质量,而且使用节点负载信息来限制 RREQ 分组的广播风暴并能成功避开负载量大容易产生拥塞的节点,能够均衡全网节点的利用率和全网能量,从而提高吞吐量。另外, LQI-AODV 选取了链路质量良好的路径,保证了数据传输的速率和可靠性,使其吞吐量比 AODV 要大。

图 6 显示的是随着 CBR 流的增加,3 种算法端到端时延的变化曲线。

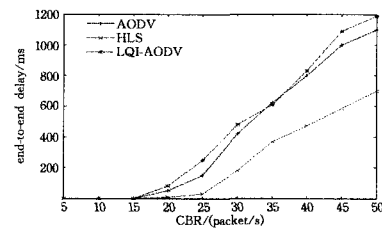


图 6 随着比特流的增加,端到端时延的变化

由图 6 可见,在比特流较小负载较轻时,3 种算法平均的端到端时延差别不大。但随着网络负载加重,数据冲突增加,开始出现拥塞,各节点状态也会有所差异,但是 LQI-AODV 和 AODV 算法不能有效地避开负载过重的节点,故时延增加较 HLS 算法快。比如, AODV 选取最短路径,过度使用一条路径会导致路径过早断裂,从而重新寻找路径使得等待时延大大增加。

图 7 显示的是随着 CBR 流的增加,3 种算法网络生存时间的变化曲线。

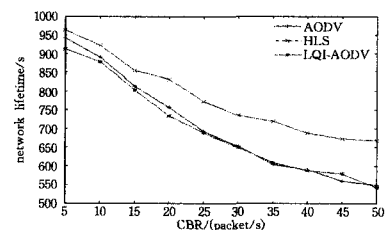


图 7 随着比特流的增加,网络生存时间的变化

由图 7 可见,随着比特流的增加,3 种算法的网络生存时间都在减少, HLS 协议的网络生存时间要长于另外两种。网络负载越重,这一现象越明显。这是由于算法 HLS 在选路阶

(下转第 186 页)

遗传算法进行对比,具体如图 3 所示。

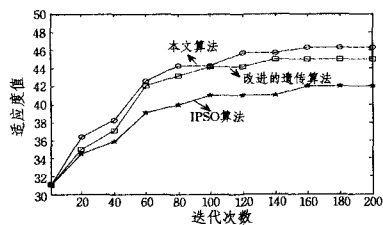


图 3 3 种算法迭代次数与适应值关系变化图

从图 3 可以看出,3 种算法在迭代计算 60 次时,集成网络系统的适应度值快速增加,当迭代 80 次后,适应度值增幅趋缓,并逐渐趋于一个稳定值。这主要是由于惯性系数对全局和局部搜索的权衡。本文算法最终收敛于 46.3,比最初的适应度值提高了 15.3,相对 IPSO 算法,本文算法的权系数经过粒距聚类度和粒子信息熵进行了修正,算法能够较快地到达收敛值附近,且适应度值有明显的提高,而改进的遗传算法在同等实验参数和环境下,选择交叉概率为 65%时,最优的搜索效果与本文算法的搜索趋势基本相同,但改进的遗传算法对于交叉率较敏感,交叉较小,变异较小,算法的搜索能力降低,而交叉率较大时又会陷入随机搜索,而本文算法在初始时由于权值调整更接近收敛值,且在收敛值附近搜索时增强了局部搜索能力,使得算法的最终收敛值要优于改进的遗传算法。

通过迭代优化,智能节点的最优位置如表 3 所列。

表 3 智能节点最优位置分析

(19.93,9.72)	(5.10,11.04)	(10.73,18.77)
(11.26,10.38)	(29.37,26.21)	(14.46,23.42)
(15.62,2.21)	(17.24,15.33)	(20.18,24.27)

(上接第 154 页)

段考虑避免使用能耗和负载瓶颈节点,综合链路质量选择路径,均衡了负载和网络能耗,缓解了拥塞的产生,延长了网络生存周期。而算法 LQI-AODV 和 AODV 都是单一的路由量度,只能改善单一方面的性能,不能很好地解决热点(HOT-POINT)问题,降低了链路质量好的节点被选入多条路由路径的概率。

结束语 本文提出了一种新的基于跨层信息综合量度的路由算法,使用该算法能够选择链路质量和节点状态相对较好的路径进行路由,可以保证高效可靠的传输数据以及延长网络生存时间。另外,在该算法中提出了两个节点之间使用 CAP 阶段相互发送数据的创新思想,避免了在大规模网络中时隙不够分配的现象。通过仿真验证了 HLS 路由算法在吞吐量、端到端时延以及网络生存时间等指标上有明显提高,可以应用在无线 mesh 传感网当中。

参考文献

[1] 王海峰,钱建生,孙彦景. WSN 中基于能量代价的能量优化路由算法[J]. 计算机科学,2012,39(1):73-76
 [2] 阔永红,耿春娜,陈建. 能量优化和负载均衡的 QoS 按需路由协议[J]. 应用科学学报,2012,30(1):26-29
 [3] Jiang Wen-bin, Li Zhao-jing. Loadbalancing routing algorithm

结束语 通过对集成网络系统的智能节点部署模型进行研究,在全向天线模式下对智能节点的覆盖范围和干扰函数进行分析,以提高智能节点的信号覆盖率,降低节点间的通信干扰;将集成网络系统智能节点的部署问题转化为迭代地在网络系统中寻找具有最优平衡能力的节点位置,然后利用改进粒子群迭代优化节点部署算法对网络系统中智能节点的最优位置进行搜索。最后通过对比仿真实验,验证了本文算法在网络系统适应度值求解时的快速收敛特性,并且可以获得较优的收敛值。

参考文献

[1] Zhang Yan, Yang Laurence T, Chen Ji-ming. RFID and sensor networks[M]. [S. L.]: Taylor and Francis, 2010
 [2] 林祝亮,冯远静. 基于粒子群算法的无线传感器网络覆盖优化策略[J]. 计算机仿真,2009,26(4):190-193
 [3] 赵祥,纪志成. 基于改进粒子群算法的集成网络节点部署优化[J]. 江南大学学报:自然科学版,2011,10(4):402-406
 [4] 纪志成,赵祥. 基于改进遗传算法的集成网络节点部署优化[J]. 控制工程,2012,19(2):270-273
 [5] Mitrokotsa A, Douligieris C. Integrated RFID and sensor networks[M]. Norway: Taylor and Francis, 2010
 [6] 黄泽霞,俞攸红,黄德才. 惯性权自适应调整的量子粒子群优化算法[J]. 上海交通大学学报,2012,2:228-232
 [7] Eberhart R. Fuzzy adaptive particle swarm optimization[C]// Proceedings of 2001 IEEE International Conference on Evolutionary Computation. San Francisco: IEEE Press, 2001:101-106
 [8] 阳春华,谷丽珊,桂卫华. 自适应变异的粒子群优化算法[J]. 计算机工程,2008,16:188-190
 [9] 顾晓燕,孙力娟,郭剑,等. 一种有向传感器网络改进粒子群覆盖增强算法[J]. 重庆邮电大学学报:自然科学版,2011,23(2):214-219
 [10] Rezgui J, Hafid A. Gendreau, Distributed admission control in wireless mesh networks: models, algorithms, and evaluation[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2010, 59(3):1459-1473
 [11] 孙佩刚,陈燕,王琳,等. 基于链路质量的无线传感器网络路由量度研究[J]. 系统仿真学报,2008,20(7):1938-1943
 for Ad hoc networks [C]// International Conference on Mobile Ad hoc Networks, 2009:334-339
 [4] 江涛,蔡海滨. 新型无线 mesh 网络的 QoS 路由判据与算法[J]. 计算机工程与设计,2009,30(11):2671-2674
 [5] Athanasiou G, Korakis T, Ercetin O, et al. A cross-layer framework for association control in wireless mesh networks[J]. IEEE Transaction on Mobile Computing, 2009, 8(1):65-80
 [6] 袁正午,梁均军. 累积链路质量无线传感器网络路由算法研究[J]. 计算机工程与应用,2011,47(14):66-69
 [7] Koksali C E, Balakrishnan H. Quality-aware routing metrics for time-varying wireless mesh networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2006, 24(11):1984-1994
 [8] Draves R, Padhye J, Zill B. Routing in multiradio, multi-hop wireless mesh network [C]// Proceedings of Tenth Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. Philadelphia, PA, USA, New York, NY, USA: ACM, 2004:114-12
 [9] 张希元,赵海,朱剑,等. 基于 LQI 量度的无线链路质量评估模型[J]. 2008,29(9):1263-1265
 [10] Rezgui J, Hafid A. Gendreau, Distributed admission control in wireless mesh networks: models, algorithms, and evaluation[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2010, 59(3):1459-1473
 [11] 孙佩刚,陈燕,王琳,等. 基于链路质量的无线传感器网络路由量度研究[J]. 系统仿真学报,2008,20(7):1938-1943