

一种新型的 WSA 两层协作路由协议

王浩云 王兆敏 任守纲 方贺贺 徐焕良

(南京农业大学信息科技学院 南京 210095)

摘 要 在 WSN 网络中引入执行器节点构成 WSA 网络,并依据 WSA 网络特性提出一种新的协作路由协议——基于动态分簇的角度转发路由协议 AFRPDC(Angle Forwarding Routing Protocol base on Dynamic Clustering)。AFRPDC 协议由 2 部分算法组成:基于接收信号强度 RSSI(Received Signal Strength Indication)的动态分簇算法 BRCA(Based on RSSI Dynamic Clustering Algorithm)和角度转发路由协议 AFRP(Angle Forwarding Routing Protocol)。BRCA 算法保证传感器节点形成较为稳定的拓扑,实现传感器节点与簇头节点的协作;AFRP 协议利用簇头节点的角度信息转发事件报告,实现簇头节点与执行器节点的协作通信。仿真结果表明,AFRPDC 协议中节点分簇有较好的稳定性,同时 AFRPDC 较基于链路状态分簇的定向扩散协议 DDLSC 在降低平均时延和节点能耗方面有更好的表现,可满足 WSA 网络对实时性、可靠性和低能耗的要求。

关键词 无线传感器执行器网络,接收信号强度,动态分簇,角度转发,协作路由

中图法分类号 TP393 文献标识码 A

New Two-layer Cooperative Routing Protocol in WSA

WANG Hao-yun WANG Zhao-min REN Shou-gang FANG He-he XU Huan-liang

(School of Information Science & Technology, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract Wireless sensor and actor network (WSA) was derived from WSN by adding actor nodes which would make decisions and executive scheduled tasks, and a new cooperative routing protocol based on the characteristics of WSA network was proposed—the angle forwarding routing protocol based on dynamic clustering (AFRPDC), which consists of a RSSI-based dynamic clustering algorithm (BRCA) and an angle forwarding routing protocol (AFRP). The cluster-head election was improved and the stable topology was constructed in BRCA. Then, event data was transmitted directly to cluster-head nodes by sensor nodes using peer-to-peer communications, and was reported to actor nodes by cluster-head nodes with AFRP. Next-hop nodes were selected using angle informations and multi-path routings were found from source cluster-head nodes to actor nodes. The routing path with minimum delay was established when transferring event data. The simulation results show that the proposed cooperative routing protocol has better performance than the directed diffusion protocol based on link-state clustering (DDLSC) in reducing the latency and power consumption, and prove that the protocol could meet the requirements of real-time, reliability and low energy consumption in WSA.

Keywords WSA, RSSI, Dynamic clustering, Angle forwarding, Cooperative routing

1 引言

无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN)是将部署在监测区域内大量的廉价微型传感器节点,通过无线通信方式形成的一个多跳自组织的网络系统,其目的是协作地感知、采集和处理网络覆盖区域中感知对象的信息,并发送给观察者^[1]。但是 WSN 网络只能对感知对象进行简单的感知,而不能对感知的结果做出任何决策。随着自动控制技术

的发展,这种结果已经不能满足社会发展的需求。人们现在需要 WSN 网络能够在无人看守的环境中,对发生的事件自动做出决策,能够进行自动控制,而无需人为干预,成为一种具有智能控制的网络,为此提出了无线传感器执行器网络(Wireless Sensor and Actor Network, WSA)^[2]。

WSA 网络通过散布在空间各区域的传感器节点(sensor)监测、感知和采集监测对象的信息,并以自组多跳的方式传送到反应节点(actor)。actor 节点根据收集的监测信息做

到稿日期:2013-02-24 返修日期:2013-05-30 本文受国家科技部重大科技支撑计划(2011BAK21B05),国家农业科技成果转化基金项目(2011GB2C100001),江苏省科技支撑计划项目(BE2011398),江苏省科技支撑计划项目(BE2011339),南京农业大学青年科技创新基金项目(KJ2010022),中央高校基本科研业务费项目(Y0201100080),南京农业大学 2013 年国家大学生创新创业训练计划项目(201310307049)资助。

王浩云(1981—),男,博士,讲师,主要研究方向为 WSN、WSA、CPS 相关协议和机制优化设计等;王兆敏(1986—),男,硕士生,主要研究方向为 WSA 关键技术;任守纲(1977—),男,博士,副教授,主要研究方向为农业物联网应用技术;方贺贺(1994—),女,主要研究方向为 CPS 建模方法;徐焕良(1963—),男,博士,教授,主要研究方向为物联网关键技术, E-mail: huanliangxu@njau.edu.cn(通信作者)。

出决策并执行相关的操作,从而实现 sensor 节点、外部环境、actor 节点间实时动态的交互与协作。WSAN 中的路由协议是保证网络数据完整、实现精确控制的关键。由于 WSAN 网络特性^[3-5]以及 WSAN 网络路由协议具有很强的应用相关性^[6],目前还没有一种通用的路由协议适合于所有应用。因此需要根据 WSAN 网络的应用环境,对原有的 WSN 路由进行优化,研究适合 WSAN 网络的路由协议。

本文依据 WSAN 网络特性提出一种新的协作路由协议——基于动态分簇的角度转发路由协议 AFRPDC(Angle Forwarding Routing Protocol base on Dynamic Clustering)。AFRPDC 协议包含了 sensor 节点和 clh 节点间,以及 clh 节点和 actor 节点间 2 层面的协作关系,由 2 部分算法组成:基于接收信号强度 RSSI(Received Signal Strength Indication)的动态分簇算法 BRCA(Based on RSSI Dynamic Clustering Algorithm)和角度转发路由协议 AFRP(Angle Forwarding Routing Protocol)。

2 相关工作

现有的 WSN 平面路由协议如 Flooding^[7,8]、DD^[9,10](Directed Diffusion)、AODV^[11,12](Ad Hoc On-demand Distance Vector Routing)和 GEAR^[13,14](Geographical and Energy Aware Routing),在选择下一跳节点的时候需要转发大量的数据包,严重消耗了网络带宽,而且数据包到达的延时大,无法满足 WSAN 网络的低能耗和实时性要求。而 WSN 层次路由协议如 LEACH^[15,16](Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy)、TEEN^[18,19](Threshold Sensitive Energy Efficient Sensor Network)共同的缺点就是网络需要频繁地进行簇头重新选举,簇头 clh(Cluster-head)节点能量消耗过快,严重缩短了网络生存周期。LSCA^[17](Link-state Clustering Algorithm)是一个异步的、分布式的分簇算法,对于同构和异构的 WSN 网络都适用,而且由于网络中数据包的路由只发生在簇头之间,能耗较低。LSCA 算法进行簇头重新选举时,将选择具有最大随机数的节点作为簇头节点。但这种简单的以随机数作为簇头选取标准的方式,并不适用于大规模的 WSAN 网络。

sensor 节点将事件协作报告给 clh 节点后,clh 节点如何将事件报告给 actor 节点可以采用多种方式。文献[20]中提出了 DDLSC 协议(Directed Diffusion based on Link-stabilizing Clustering),但该方法需要通过洪泛的方式建立到 actor 节点的路径,同时需要周期性地对路径进行修复,因而对带宽等网络资源的需求较高,且传输延迟较大。文献[21]提出了协作路由(Cooperate Routing)的方法来实现网络通信。但是该方法需要 clh1 内的每个 sensor 节点知道自身到 clh2 节点的开销,然后通过多跳方式进行传输,这种假设在实际应用时并不现实,且延时较大。文献[22]使用基于地理位置(Location-aided)的方式,节点根据坐标选择距离目的节点最近的节点作为下一跳节点。该方法能够保证数据传输的实时性,但对坐标的计算较为复杂,无法满足 WSAN 网络对低能耗的要求。文献[23]中源节点在路由发现阶段借助角度信息和地理位置信息选择下一跳路由,能够在减少数据包洪泛的同时降低网络的时延。但该算法中的角度信息是通过人工指定的方式获得,缺少理论依据,且每次都选择距离 actor 节点最近的

节点进行转发,这会造成节点能耗的早衰问题。

AFRPDC 协议中的 BRCA 算法针对 LSCA 算法的不足之处进行了优化,引入了基于事件频率的休眠/唤醒机制,降低了节点能耗,延长了网络生存周期,满足 WSAN 网络对低能耗、实时性和健壮性的要求;同时,在簇头重新选举阶段采用多参数权衡的方法实现了簇头的最优选取。此外,BRCA 采取 RSSI 值替代 LSCA 算法中的链路状态值,简化了原算法的复杂度。而 AFRP 则利用角度信息实现 clh 节点与 actor 节点的通信。算法中,clh 节点将自身与 actor 节点之间的角度信息(A_s)和距离信息(D_s)以及剩余能量(E_s)作为选择下一跳 clh 节点的依据。而 A_s 和 D_s 可由 clh 节点上的天线阵列或者多个超声收发装置来获得。此外,AFRP 可以将节点转发的数据包控制在包含 actor 节点的小角度范围内,这样可以降低数据包到达 actor 节点的时延以满足实时性要求,减少网络内转发数据包的数量以降低能耗,同时可以建立 clh 节点到 actor 节点的多跳路径以满足可靠性要求。因此,AFRP 协议可以较好地实现簇头节点与 actor 节点之间的协作,满足 WSAN 网络性能的要求。

3 基于 RSSI 的动态分簇算法

设定 WSAN 网络中的节点具有 2 级发射功率: P_L 和 P_H 。其中, P_L 功率较小,可用于簇内通信;而 P_H 功率较大,可用于簇间通信。网络中的每个节点都具有一个全网唯一的标识号,该标识号可以采用 16 位或者 64 位地址格式,也可以人工指定一个随机数。BRCA 算法中,每个 sensor 节点都有一个邻居节点表 NT(Neighbor Table),用来记录节点周围的邻居节点的信息。如果一个节点被选为簇头节点,则该节点的标识号将成为簇的标识 CID(Cluster-ID)。邻居节点表 NT 的格式如图 1 所示。其中:ID 为邻居节点的标识号,RSSI 值为邻居节点的接收信号强度,CLH 是簇头节点的编号,Actor 是执行器节点的编号, A_s 是邻居节点的角度信息, E_s 是邻居节点的剩余能量,而 D_s 是邻居节点与 actor 节点之间的距离信息,Sleep 是休眠标记位, T_s 是休眠时间。

ID	RSSI	CLH	Actor	E_s	D_s	A_s	Sleep	T_s
----	------	-----	-------	-------	-------	-------	-------	-------

图 1 节点的邻居节点表

BRCA 算法中,sensor 节点之间根据 RSSI 值进行动态分簇。由于 actor 节点可在 WSAN 网络初始部署时利用泰森多边形划分感知区域,因此 sensor 节点可以通过 actor 节点的广播信息来获得自身与 actor 节点之间的角度信息 A_s 和距离信息 D_s 。同时,邻近的 sensor 节点将相互交换 NT 表中的信息。这样,在分簇完成后,clh 节点就能获取簇内所有 sensor 节点的相关信息。

为了降低节点能耗,延长网络生存周期,BRCA 算法中的簇内节点可采用基于事件频率的节点休眠/唤醒机制:每当网络中发生事件时,处于唤醒状态(Wake-up)的节点会将自身的休眠时间 T_s 延长 θ_s 秒,而休眠时间被修改的节点在每次唤醒时会将自己的休眠时间恢复到 T_s 。该机制有别于现有的通过对节点设定固定休眠定时器来实现节点休眠和唤醒状态切换的机制。 θ_s 可以在网络部署前通过仿真模拟当前网络环境来获取最优值。为了便于 clh 节点区分不同状态的节点,在 NT 表中引入休眠标记位(Sleep)和休眠时间 T_s 。当节点唤醒时,Sleep 标记为 1,而休眠时为 0,以保证 2 类节点正

常工作。

3.1 分簇形成阶段

BRCA 算法中, sensor 节点首先根据 RSSI 值动态分簇。图 2 为分簇形成阶段的流程图。

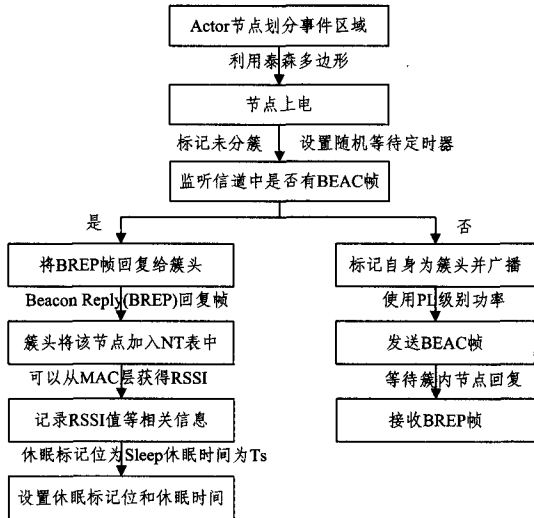


图 2 分簇形成阶段流程图

图 2 中, 节点上电后, 首先标记为未分簇, 同时设置一个随机等待定时器 T_w 。其中, $T_w > T_b$ 。 T_b 表示 BEAC 帧重新广播的间隔时间, 以便一个节点有更高的优先级成为簇头节点。之后, 节点开始监听通信信道中是否有 BEAC 帧。如果节点在 T_w 时间内没有收到 BEAC 帧, 则标记为簇头, 并使用 P_L 级别的功率广播 BEAC 帧。簇头通信范围内的所有节点都可以收到这个 BEAC 帧。对于收到 BEAC 帧的节点, 将回复簇头 BREP (Beacon Reply) 帧。簇头和节点更新自身的 NT 表, 并记录双方的 RSSI 值, 同时设置休眠标记位 Sleep 和休眠时间 T_s 。

3.2 簇内更新阶段

BRCA 算法中的簇头节点可根据 RSSI 值进行更新。图 3 为簇内更新阶段的流程图。图中, 若 $clh1$ 内的 sensor 节点收到来自 $clh2$ 节点的 BEAC 帧, 该 sensor 会比较 2 个簇头节点的 RSSI 值。若 $RSSI_{new} > RSSI_{old} + \Delta$, 则该节点会发送 BREP 包通知 $clh2$ 节点, 同时发送 SCAN (Slave Cancel) 包给 $clh1$ 节点。其中, $RSSI_{new}$ 为 $clh2$ 节点的 RSSI 值, $RSSI_{old}$ 为 $clh1$ 节点的 RSSI 值, Δ 为算法中设定的阈值。 Δ 值同样可以在网络部署前通过网络仿真来获取其最优值。 2 个簇头在分别收到通知包后会更新自己的 NT 表。

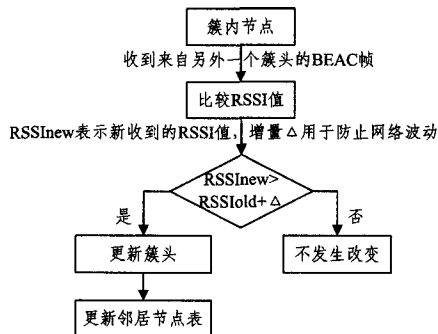


图 3 簇内更新阶段流程图

3.3 簇头重新选举阶段

WSAN 是以事件为中心的网络。有别于以数据为中心的 WSN 网络, WSAN 并不要求 sensor 节点不断地上报感知

到的数据, 当发生异常事件时才会触发节点的事件报告机制, 因而节点不需要采用时间片分配的方式更换簇头。 BRCA 算法采用阈值的方式, 当 clh 节点的剩余能量 E_s 小于阈值 E_n 时, clh 节点才会重新选举, 以最大化网络的生存周期。 本文将 E_n 值设定为 50%, 即当 $E_s < 50%$ 时才需要进行簇头重新选举。

此外, BRCA 算法对于簇头的重新选取采用多参数权衡的方法, 即在簇头重新选举阶段权衡簇内节点的 E_s 、 D_s 和 A_s , 这 3 个参量, 然后为各个参量赋予不同的权值 c_i 。 权值 c_i 在理论上可以通过启发式算法获得, 但计算方式较为复杂。 本文将在网络部署前通过网络仿真进行优化, 获得 3 个参量之间的定性关系。 然后, 通过调整权值来获得节点预算 δ 。 clh 节点根据簇内节点上报的节点预算 δ , 选择拥有最大节点预算 δ_{max} 的节点作为新簇头 clh_{new} , 并发送簇头移交报文 CHHO (Cluster-head Hand Off) 给该节点。 节点预算 δ 的计算方法如式(1)所示。 其中, 角度信息 A_s 以弧度来表示, 例如 $\pi/4$ 、 $\pi/6$ 等。

$$\delta = c_1 * E_s + c_2 * D_s + c_3 * A_s \quad (1)$$

收到通知的节点则会重新进入分簇阶段并广播 BEAC 帧。 为了保证网络的正常运行, BRCA 算法还采用了时间触发和事件驱动相结合的方法, 即每个 sensor 节点都设定了定时器 T , 当时间到达时, sensor 节点会主动采集数据, 而突然发生异常事件时, sensor 节点也可以立刻感知到发生的事件。 图 4 为簇头重新选举阶段的流程图。

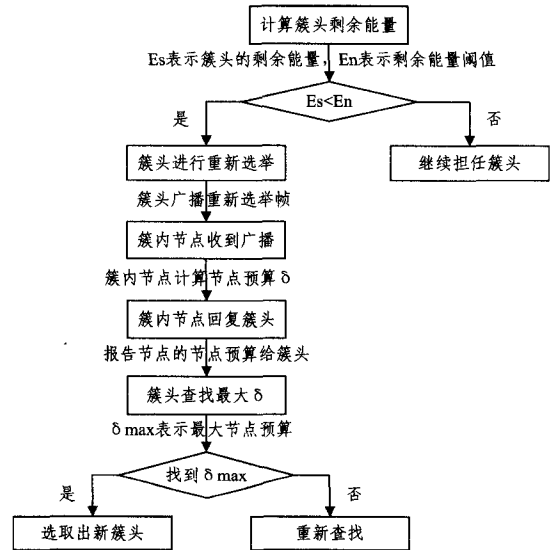


图 4 簇头重新选举阶段流程图

4 角度转发路由协议

actor 节点采用泰森多边形划分感知范围, 划分后在各自己的感知范围内广播, 在该范围内的 sensor 节点可以通过自身部署天线阵列或者多个超声收发装置来接收 actor 节点的广播并记录自身所属的 actor 节点。 节点在接收 actor 节点的广播后就可以获得自身与 actor 节点的角度 A_s 和距离 D_s 。 而且依据节点上部署天线的硬件结构, 可以得出距离 actor 节点越近的节点, 获得的角速度越大, 反之则会越小。 节点将自身获得的 E_s 和 A_s 以及 D_s 信息更新到邻居节点表 NT 后, clh 就可以实现在收到事件后, 使用 AFRP 协议向 actor 节点报告事件。 图 5 为 actor 节点利用泰森多边形划分感知范围的示意图。

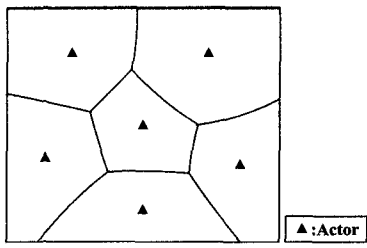


图5 Actor节点利用泰森多边形图划分感知范围

AFRP协议中的每个节点不必记录自身周围的所有邻居节点,只需记录自身角度范围内的邻居节点,所以这种方式降低了NT表对存储空间的占用。同时节点在选择下一跳时,可以根据下一跳节点选择标准进行选择,以实现节点快速将事件报告给目的节点,既可以降低对网络带宽的占用,降低网络能耗,又可以满足实时性要求,也可以选择多个下一跳节点来保证网络的稳定性,因而AFRP协议满足WSAN网络的要求。角度转发路由协议AFRP主要包括2个阶段:角度查询和数据转发。角度查询负责clh在自身的角度范围内查询邻居clh节点与actor的角度,选出下一跳clh节点并确定最短路径;而数据转发则负责将接收到的数据转发给下一跳clh节点直到actor节点。

4.1 角度查询阶段

在启动角度查询阶段之前,clh节点需要先判断自身能否将事件直接报告给actor节点。若clh的传输半径 R_c 大于 D_s ,则clh直接将事件报告给actor;否则,clh节点使用 P_H 级别的功率启动角度查询。clh节点在自身角度范围内广播角度查询报文AQP(Angle Query Packet),查询邻居clh节点的 E_s 、 A_s 和 D_s 信息。簇头节点收到该报文后,会发送角度查询回复报文AQRP(Angle Query Reply Packet),向clh节点报告自身相关信息。簇头节点将接收到的AQRP报文整理后存到自己的NT表中。

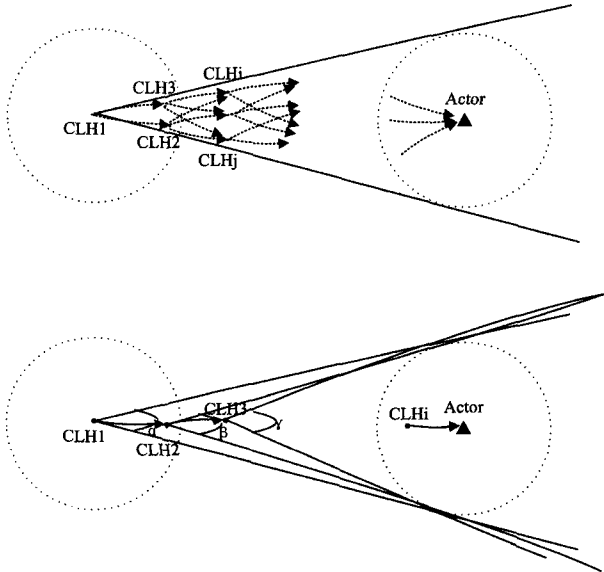


图6 角度转发路由协议示意图

为了满足WSAN网络的低能耗和实时性要求,需要选择距离actor节点最近的clh节点作为下一跳节点。如图6中所示,虚线圆代表节点的感知范围,从clh节点发出的射线代表clh节点的角度。clh节点距离actor节点越近,则角度越大,即 $\alpha < \beta < \gamma$ 。其中的 α 、 β 和 γ 分别是不同的clh节点与actor节点之间的角度值。

因而,在选择下一跳时要权衡clh节点与actor节点之间的角度 A_s 和距离 D_s 。当出现多个满足条件的clh节点时,为了平衡节点能耗,尽量选择 E_s 高的节点转发。在本阶段中,clh节点也将采用类似簇头重新选举阶段中的多参数权衡方法来计算角度范围内clh节点的优先级 P_{clh} ,而具有最大优先级 P_{max} 的clh节点将作为下一跳节点。下一跳clh节点会重复上述步骤,直到事件被报告给actor节点。

节点优先级 P_{clh} 可以根据式(2)来计算。式(2)中的权值在理论上依然可以使用启发式算法获得,但本文将在网络部署前通过网络仿真进行优化配置,并获得3个参量之间的定性关系。

$$P_{clh} = d_1 * A_s + d_2 * D_s + d_3 * E_s \quad (2)$$

由于BRCA算法中clh节点采用了基于能量阈值 E_n 的簇头重新选举策略,因此clh节点每次向actor节点报告事件时都需要发起角度查询过程。clh节点启动角度查询后会设定一个等待时间 T_Q 。若在 T_Q 内没有收到AQRP报文,则clh节点需要增大自身角度 $Q = Q + \Delta Q$,并重新开启角度查询。其中, ΔQ 为单位角度增量值。此外,为了满足WSAN网络的健壮性要求,当clh节点发现自身周围的邻居节点不多于2个的时候,也需要增大自身角度 $Q = Q + \Delta Q$,然后重新开启角度查询。本文设定 $\Delta Q = 5^\circ$ 。图7为角度查询阶段的流程图。

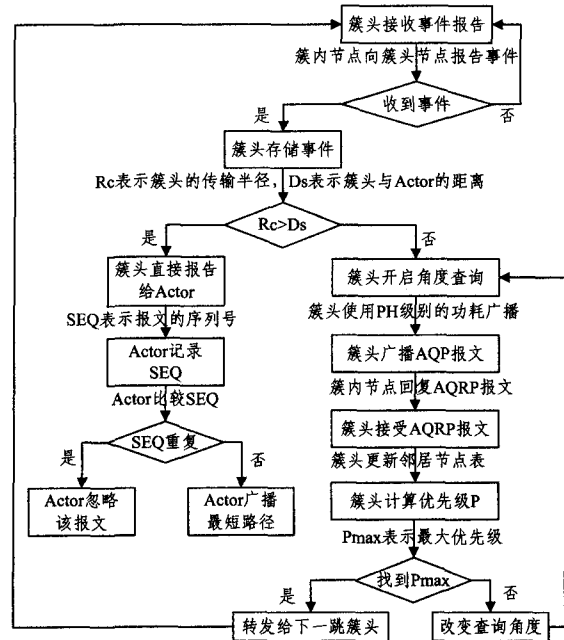


图7 角度查询阶段流程图

4.2 数据转发阶段

在角度查询阶段,源簇头节点通过广播AQP报文可以获得到达actor节点的多条路径。为了满足WSAN网络的实时性要求,actor节点可以选择AQP报文最先到达的路径作为源簇头节点的事件报告路径。actor节点作出选择后,会在自身范围内广播。源簇头节点以及中继节点收到广播后,会将该路径记录在邻居节点表NT中,然后使用该路径进行数据转发。

此外,为了确保事件顺利到达actor节点,AFRP协议可在源簇头和actor之间建立多条传输路径。每个收到AQP报文的下一跳节点都重复这个过程,直到AQP报文到达actor节点。采用多条传输路径的方法,可能会有多个AQP报

文报告给 actor 节点,可以让源簇头节点在发送 AQP 报文时,为每个 AQP 报文产生一个序列号 SEQ。该序列号在转发过程中不会发生改变。actor 节点收到同一个序列号的多个 AQP 报文时,只处理第一份报文,而忽略其他报文。这样既可以保证网络的实时性,又可以降低网络的能耗。图 8 为数据转发阶段的流程图。

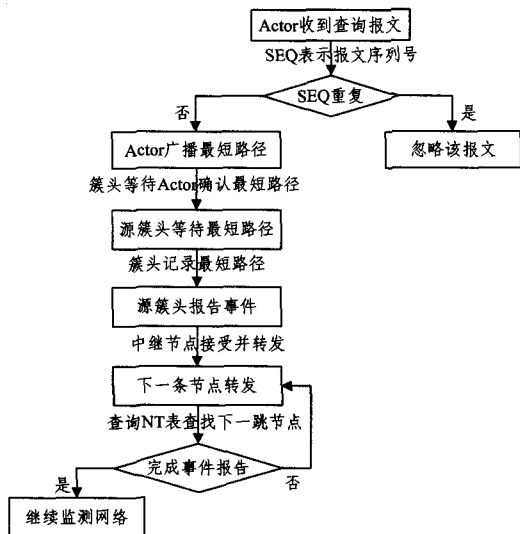


图 8 数据转发阶段流程图

5 仿真试验

5.1 仿真环境

本文采用 Java 语言编写代码实现 AFRPDC 协议。首先模拟了一个 $800\text{m} \times 800\text{m}$ 的监测区域,并在该区域中随机部署多种不同类型的 sensor 节点,用来监测该区域内不同的属性参数。当区域内的参数发生变化时, sensor 节点将此事件上报给 actor 节点。在试验中 sensor 节点数量从 150 到 350,每次增加 50 个节点, actor 节点数量为 4 个。簇内通信半径 R_i 为 100m,簇间通信半径 R_c 为 200m, actor 节点通信半径 R_a 为 400m。为了进一步分析 AFRPDC 协议的性能,本文同时实现了基于链路状态分簇的定向扩散协议 DDLSC,并与 AFRPDC 协议进行对比。DDLSC 协议首先利用 LSCA 算法实现 sensor 节点的分簇,在此基础上利用 DD 协议实现 clh 节点和 actor 节点的通信。本文首先评估了 AFRPDC 协议的网络稳定性,同时还对 AFRPDC 协议和 DDLSC 协议在平均延迟和节点能耗方面的性能进行了对比分析。

5.2 仿真结果

5.2.1 网络稳定性

为了实现对监测区域的精确监测,在仿真试验中,首先需要观察 AFRPDC 协议中节点分簇的稳定性。图 9 中, $800\text{m} \times 800\text{m}$ 的仿真区域中随机部署了 300 个 sensor 节点,虚线圆代表 sensor 的感知范围,连线代表 sensor 与 clh 间的链路。当网络中的节点部署完成,节点就会进入动态分簇阶段。当选举出簇头节点,所有簇内节点都会被相应的簇头节点所覆盖。当簇头节点的传输半径 R_c 为 200m 时,如图 10 所示,所有的簇头都能连接在一起,且网络中没有未分簇的节点,粉色连线代表 clh 间的链路。从图 9 和图 10 可以看出, BRCA 算法可以实现所部署的 sensor 节点平稳分簇,有助于 sensor 节点对事件区域的精确监测。

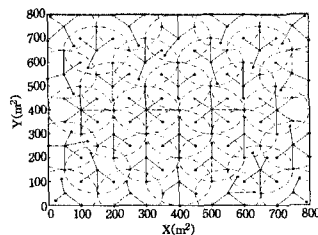


图 9 节点分簇

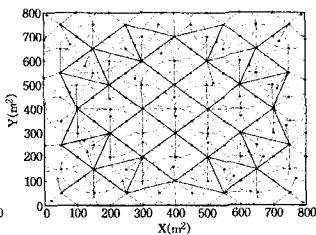


图 10 簇头连接

BRCA 算法在簇头重新选举阶段需要根据多参数的权衡选择新的簇头节点。而对于各个参数的权衡因子,本文将在仿真中比较多组参数,选择性能最优的一组参数作为最优参数。图 11 中显示了多组参数的仿真结果。从图中可以看出,第 1 组参数最优,即 $(c_1 = 2/5, c_2 = 2/5, c_3 = 1/5)$ 这组参数的波动最小,因而仿真试验将采用该组参数作为簇头重新选举阶段的权衡因子。图 12 显示了随机部署的 300 个 sensor 节点在仿真过程中,保持簇头和簇内节点的数量较为稳定。

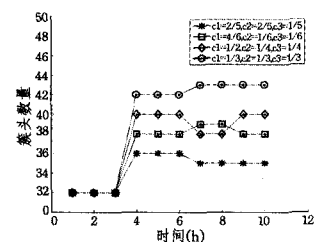


图 11 不同参数的簇头数量

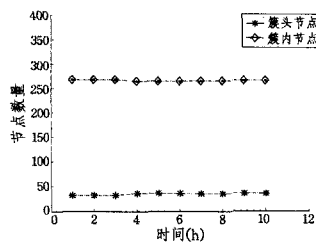


图 12 簇头和簇内节点数量

5.2.2 平均延迟

WSAN 监控应用对实时性有较高的要求。本仿真将对算法的平均延迟进行验证。在仿真中,设定多个簇内节点向相应的簇头节点报告事件,然后由簇头节点将事件报告给 actor 节点。actor 节点上设有定时器,用于记录 actor 节点接收簇内节点事件的延迟时间。整个网络的平均延迟等于总的延迟时间除以报告事件的数量。

AFRP 协议中,簇头节点在选择下一跳簇头节点时采用多参数权衡的方法,而对于各个参数的权衡因子,本文将通过仿真试验获得。图 13 中显示了多组参数的仿真结果。从图中可以看出,第 1 组参数最优,即 $(d_1 = 3/7, d_2 = 3/7, d_3 = 1/7)$ 这组参数的平均延迟最小。因此该组参数可作为仿真中簇头选择下一跳簇头节点的权衡因子。

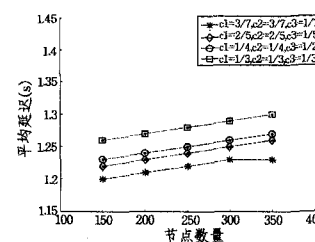


图 13 不同参数的平均延迟

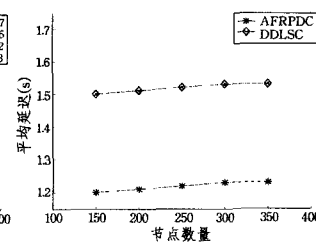


图 14 平均延迟

图 14 中分别显示了 AFRPDC 协议和 DDLSC 协议在不同节点数量下的平均延迟。从图中可以看出, AFRPDC 协议的平均延迟要小于 DDLSC 协议,这是由于 AFRPDC 协议中簇头仅在自身的角度范围内广播下一跳簇头查询报文,而不需要在全网内广播报文;其次, AFRPDC 协议不需要周期性广播路径巩固报文,且网络规模的变化对 AFRPDC 影响很小。图 14 表明 AFRPDC 协议可以满足 WSAN 实时监测的要求,

能保证 sensor 节点将检测到的事件及时报告给 actor 节点。

5.2.3 节点能耗

WSAN 应用对能耗也有较高的要求。节点的能耗越低,网络的生存寿命就越长。本仿真评估了 AFRPDC 协议和 DDLSC 协议中节点的平均能耗。节点的平均能耗是通过对比节点消耗的能量和节点的工作量得到的。如图 15 所示,随着节点数量的增加,AFRPDC 协议中节点的平均功耗并没有出现较大波动,且 AFRPDC 协议的平均能耗明显低于 DDLSC 协议。这表明 AFRPDC 协议的节能性能较优,能够降低 WSAN 实际应用的能耗开销。

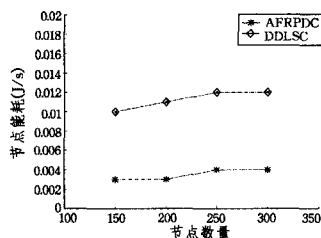


图 15 节点能耗

结束语 本文依据 WSAN 网络特性提出一种新的协作路由协议——基于动态分簇的角度转发路由协议 AFRPDC。该协议包含 2 个部分:基于 RSSI 的动态分簇算法将 WSAN 网络中的 sensor 节点分成簇头和簇内节点 2 层,为多跳通讯提供了支撑;基于角度信息的转发路由协议利用簇头节点的角度信息转发事件数据。本文对基于动态分簇的角度转发路由协议 AFRPDC 进行了描述,从节点分簇的稳定性、平均延迟和节点能耗等方面对 AFRPDC 协议进行了分析和仿真。仿真结果显示,在仿真条件下,AFRPDC 协议相比 DDLSC 协议在时延方面提升 25%,而能耗降低 75%。说明基于动态分簇的角度转发路由协议 AFRPDC 比基于链路状态分簇的定向扩散协议 DDLSC 在降低时延和低能耗上有更好的表现,可满足 WSAN 网络对实时性、可靠性和低能耗的要求。

WSAN 中,actor 节点收到所报告的事件后,可以采取相应的控制策略,且控制的方式可以采取集中式和分布式 2 种。在实际 WSAN 应用中采取何种控制方式能保证准确性、实时性和低能耗等性能最优需要进一步研究。WSAN 网络中如何通过捎带的方式,在实现路由过程的同时保证整网的时间同步,对于所提算法的实际应用是较为关键的问题。

参考文献

- [1] 孙利民,李建中,陈渝,等. 无线传感器网络[M]. 北京:清华大学出版社,2005:4-6
- [2] Akyildiz I F, Kasimoglu I H. Wireless sensor and actor networks: research challenges[J]. Ad Hoc Networks, 2004, 2(4): 351-367
- [3] Salarian H, Chin K W, Naghdy F. Coordination in wireless sensor-actuator network: a survey[J]. Journal of Parallel and Distributed Computing, 2012, 72(7): 856-867
- [4] 郎为民. 无线传感器与执行器网络(WSAN)研究[J]. 数据通信, 2011, 142(3): 9-13
- [5] 徐宏勤,洪承镐,王智. 家庭自动化无线传感器/执行器网络路由协议的设计[J]. 信息与控制, 2009, 38(5): 624-632
- [6] Srinivasara R D, Ramesh B B, Srikanth V. Energy efficient rou-

ting protocol for wireless sensor and actor networks[J]. Communications in Computer and Information Science, 2010, 90(1): 114-123

- [7] Senouci M R, Mellouk A, Senouci H, et al. Performance evaluation of network lifetime spatial-temporal distribution for WSN routing protocols[J]. Journal of Network and Computer Applications, 2012, 35(4): 1317-1328
- [8] 韦小铃,刘星毅. 无线传感器网络路由协议研究综述[J]. 微处理机, 2010, 31(1): 45-47, 50
- [9] Tang J H, Dai S S, Li J H, et al. Gossip-based scalable directed diffusion for wireless sensor networks[J]. International Journal of Communication System, 2011, 24(11): 1418-1430
- [10] 梁小宇,刘泉,刘新华. 一种基于分簇的优化定向扩散路由协议[J]. 武汉理工大学学报:信息与管理工程版, 2011, 33(4): 521-528
- [11] Tian F, Fan L L, Sun X P, et al. Research on AODV routing protocol optimization in wireless sensor network[C]// 2011 International Conference on Materials, Mechatronics and Automation. Switzerland: Trans Tech Publications Ltd, 2011: 325-330
- [12] 雷向东,阳文彬. 基于跳数计数的 AODV 路由协议优化[J]. 计算机工程, 2011, 37(5): 109-111
- [13] 夏娜,李敦,唐媚,等. 无线传感器网络中时效性优化的 GEAR 路由协议[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2010, 33(4): 519-523
- [14] 胡新和,杨博雄,陈瑛. 基于 Gear 算法的无线传感器网络路由协议研究[J]. 南京师范大学学报, 2010, 10(3): 60-63
- [15] 程英,高庆德,吴晓朝. 无线传感器网络节能路由协议的改进[J]. 计算机科学, 2012, 39(Z11): 93-95
- [16] 罗四维,侯孟书,周益民. 一种新的基于能量消耗速率模型的分簇路由协议[J]. 计算机科学, 2012, 39(6): 47-50
- [17] Chao G, Jantti R. Link-state clustering based on IEEE 802. 15. 4 MAC for wireless ad-hoc/sensor networks [C] // 2006 IEEE Wireless Communications and Networking Conference. USA: IEEE, 2006: 499-504
- [18] Baghyalakshmi D, Ebenezer J, Satyamurty S A V. Low latency and energy efficient routing protocols for wireless sensor networks[C]// 2010 International Conference on Wireless Communication and Sensor Computing. USA, IEEE, 2010: 1-6
- [19] 赵强利,蒋艳凤,徐明. 无线传感器网络路由协议的分析与比较[J]. 计算机科学, 2009, 36(2): 35-41
- [20] Zhou Z D, Xu W J, Li F M, et al. Directed diffusion based on link-stabilizing clustering for wireless sensor networks[J]. Lecture Notes in Computer Science, 2007, 4611: 485-494
- [21] Nieto A, Lopez J. Traffic classifier for heterogeneous and cooperative routing through wireless sensor networks[C] // 26th IEEE International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops. USA: IEEE Computer Society, 2012: 607-612
- [22] Gilg M, Lorenz P, Rodrigues J. Location-aided routing using image representation for wireless sensor networks[C] // 2011 IEEE International Conference on Communications. USA: IEEE, 2011: 1-5
- [23] 董芳,仇佩亮. 无线传感器网络角度随机路由协议[J]. 浙江大学学报:工学版, 2009, 43(4): 621-625