

无线传感器网络单跳扩展增强树型路由协议研究

杨桂松¹ 王中杰¹ 何杏宇²

(同济大学电子与信息工程学院 上海 201804)¹ (上海市工业自动化仪表研究所 上海 200233)²

摘要 增强树型路由协议是最近提出的无线传感器网络路由协议,除了使用父子链路,当前路由决策节点通过和其一跳邻居节点之间建立增强链路形成比树型路由更短的路由捷径。为了尽可能多地发掘出潜在的路由捷径,提出了单跳扩展增强树型路由协议,该协议在增强树型路由协议的基础上把当前路由决策节点的单跳父亲节点和儿子节点及它们的邻居节点也考虑进路由决策过程中,可选路由捷径范围不再局限于当前路由决策节点及其一跳邻居之间的增强链路,而是向上扩展到其父亲节点及其一跳邻居以及向下扩展到其儿子节点及其一跳邻居之间所形成的增强链路。该协议选择最短的路由捷径发送数据包。给出了单跳扩展增强树型路由协议的判定过程,并将该协议应用到 ZigBee 网络中。仿真结果显示,该协议在路由跳数和能量消耗这两项网络性能上比树型路由和增强树型路由均有提高。

关键词 无线传感器网络,增强树,单跳扩展,路由跳数,能量消耗

Research on One-hop Expansion Enhanced Tree Routing Protocol for Wireless Sensor Networks

YANG Gui-song¹ WANG Zhong-jie¹ HE Xing-yu²

(School of Electronics and Information Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)¹

(Shanghai Institute of Process Automation Instrumentation, Shanghai 200233, China)²

Abstract Enhanced tree routing (ETR) is a routing protocol proposed recently for wireless sensor networks, in addition to parent-child links, ETR also uses enhanced links to other one-hop neighbors if it is decided that this will lead to a shortcut path than Tree Routing (TR). In order to explore as much potential shortcut routes as possible, this research proposed a One-hop Expansion Enhanced Tree Routing (OEETR) protocol for wireless sensor networks. For a node that is making the routing decision, OEETR not only takes the enhanced links built with its one-hop neighbors but also takes the enhanced links built by its one-hop father and one-hop sons with their neighbors into account, to find a shortcut route for packet forwarding. So the scope of the optional shortcut routes is no longer limited to the enhanced links built between the node and its one-hop neighbors, but expands up to the enhanced links built by its father with its one-hop neighbors and down to the enhanced links built by its sons with their neighbors, and OEETR will choose the shortest shortcut route for packet forwarding. This research presented the decision process for OEETR, and applied this protocol to ZigBee network. Simulation results reveal that OEETR not only outperforms TR and ETR in terms of hop-counts, but also saves the energy consumption than that of TR and ETR.

Keywords Wireless sensor networks, Enhanced tree routing, One-hop expansion, Hop-counts, Energy consumption

1 引言

无线传感器网络(WSN, Wireless Sensor Networks)由于其高度的学科交叉性和广泛的应用前景受到世界各地学术界和工业界的高度关注,是新兴的前沿热点研究方向。对无线传感器网络的研究已成为当前 IT 领域最具有挑战性的课题之一^[1,2]。无线传感器网络被许多领域广泛用来处理敏感的信息,其应用场景包括军事、工业、家庭、医疗健康、环境监测等诸多领域。比如,无线传感器网络可以对建筑物内发生的火灾进行准确、及时的预报;当发生地震、水灾、强热带风暴或遭受其他灾难打击的应急场合,也需要无线传感器网络的不依赖于任何固定网络设施、能快速布设的自组织网络技术;在

地处偏远、动植物受到保护的自然保护区或湿地保护区,无法采用固定或预设的网络设施进行通信,而采用无线传感器网络来进行信号采集与处理毫无疑问是最佳的选择。

无线传感器网络一般是靠电池提供能量,因此,能量效率至关重要,数据包通过使用中间节点实现多跳通信可以消耗更少的能量,而传感器网络的部署一般具有区域面积大,节点比较多的特性,多跳通信是实现数据在网络中传输的最为现实的方法。路由协议主要负责提供网络层的关键服务,这正是实现多跳通信形成网络的关键,固化在传感器节点中的路由协议建立了网络中从源到目的节点之间的传输路径。在无线传感器网络的研究中,众多的路由协议被提出用于解决数据包转发中各式各样的问题^[3-7]。实际上,在很多使用无线传

到稿日期:2011-06-14 返修日期:2011-08-21 本文受国家自然科学基金项目(71071116),国家高技术研究发展计划(863)(2011AA040502),上海市科委基础研究重点项目(10JC1415300),青浦区·同济大学科技合作项目(2011)资助。

杨桂松(1982—),男,博士生,主要研究方向为无线传感器网络与普适计算、物联网与嵌入式系统设计等, E-mail:gs_yang@yahoo.cn。

传感器网络组网的工业现场都采用了依据节点父子关系形成链路的树型路由(TR, Tree Routing)协议,例如, ZigBee 协议明确指出把树型路由作为它可组网的主要路由协议之一,相比其它路径搜索协议,树型路由协议的一个主要缺点是随着加入网络的子孙节点的增多,其路由跳数的计算量增加很快。ZigBee 标准是基于 IEEE 802.15.4 的 Ad-hoc 网络工业标准^[8]。实际上,树型路由协议并没有完全利用存储在节点内的邻居表,邻居表在节点选择加入网络的过程中被创建,记录了每个节点在它通信范围内的节点信息,如父节点、子节点和一些邻居节点的信息。ZigBee 标准要求邻居表随时保持更新,这一般可以通过节点周期性地扫描自己的邻居关系来实现。

为了能充分利用邻居表信息,并发挥在一定节点地址分配机制下节点内在地址关系的优势,文献[9]提出了增强树型路由(ETR, Enhanced Tree Routing)协议。在传感器网络中,对于任意一对传输数据包的源和目的节点,除父子链路外,增强树型路由协议还可以通过使用邻居表来建立与一跳邻居的链路,产生比树型路由跳数更短的路由捷径,增强树型路由协议将选择该邻居节点作为下一跳节点,并通过该邻居节点转发数据包。显然,这将有效减少系统的存储和计算代价,在网络路由跳数和能量消耗两方面会更加优越。但是,ETR 协议在判定邻居链路以得到路由捷径的时候,当前路由决策节点只考虑在本地的潜在邻居节点中是否能够找到路由捷径,并不会考虑通过它单跳的父亲节点及其邻居和单跳的儿子节点及其邻居是否存在更短的路由捷径,实际上这大大限制了最佳路由捷径的发掘,尤其是在网络部署密度比较大的时候。为了最大化地找到潜在的路由捷径,使数据包的传输可以使用更短的路由跳数,以节省更多的能量消耗,本研究把路由捷径的选择范围扩展到当前路由决策节点的单跳父亲节点和儿子节点,综合考虑当前路由决策节点的单跳父亲节点和儿子节点及它们的邻居节点来计算最佳路由捷径,提出单跳扩展增强树型路由(OEETR, One-hop Expansion Enhanced Tree Routing)协议,同时在 ZigBee 网络中进行仿真来评估路由协议的性能。通过在路由跳数和能量消耗方面与 TR、ETR 协议的比较发现,OEETR 在这两方面的性能比它们均有明显减少,最后,文章给出了实验结果和结论。

2 树型网络拓扑和路由协议

2.1 树型拓扑结构

树型拓扑结构一般由根节点开始,其它节点逐渐加入网络,成为根节点的子孙节点,网络中与每个节点相关的一个重要参数就是网络深度。网络深度代表了网络中一个节点仅仅使用父子链路发送数据包所能到达根节点的最少跳数,根节点的网络深度为 0,其它非根节点的网络深度非 0,并且每个子节点的网络深度为父节点网络深度加 1,如图 1 所示,节点之间的链路代表父子关系,其中 N_R 是根节点,对应网络深度为 0; N_a , N_b 和 N_c 分别是 N_R 的子节点,对应网络深度为 1; N_d 和 N_e 是 N_a 的子节点,也是 N_R 的孙子节点,网络深度为 2; N_f 和 N_g 又是 N_e 的子节点,网络深度为 3。

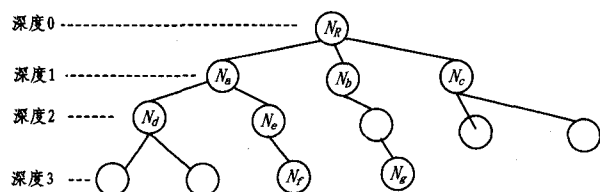


图 1 树型拓扑结构中的网络深度

2.2 树型路由协议

在树型路由协议中,如果需要从源节点向目的节点发送数据,数据包要么沿着树的路径向上传递到目的节点或者目的节点的子孙节点,并由该子孙节点继续转发到目的节点,要么向下传递到目的节点或者目的节点的祖先节点,并由该祖先节点继续转发到目的节点。树型路由协议如图 2 所示,这里 N_d 是目的节点, N_p 是当前路由决策节点的父节点, N_s 是当前路由决策节点的子节点, N_x 是当前路由决策节点的下一跳节点,当前路由决策节点根据数据分组的目的节点 N_d 的地址计算出数据转发路径的下一跳节点 N_x 的地址,并决定下一跳节点是谁。

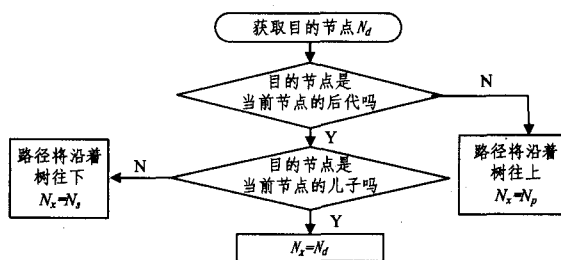


图 2 树型路由协议

3 单跳扩展增强树型路由协议

增强树路由使得网状拓扑结构中具有路由功能的节点之间只要在通信范围内都可以建立连接,并进行数据传输。所以,增强树路由算法突破了树型路由的路径单一且没有充分利用邻居表中相邻节点的缺陷。它不仅产生路由捷径从而减少能耗,而且,还意味着一旦某个路由路径出现了问题,数据包还可以自动地沿着其它的路由路径进行传输。

除了父子链路,增强树型路由还定义了增强链路,即当前节点与一跳邻居节点的链路,通过增强链路可以产生路由捷径。增强树型路由协议的核心是在树型路由协议的基础上对其邻居节点进行增强链路的判断和查找。如果增强链路存在,那么就将数据包发往引向增强链路的邻居节点,通过该邻居节点转发数据;如果增强链路不存在,就将数据包按照树型路由的计算结果发往下一跳。

在网络中,对要传输数据包的同一对源和目的节点来说,尽管使用增强树型路由比树型路由要好,但是,当考虑到全局网络时,增强树型路由协议在确定本地最优邻居节点以寻找路由捷径的时候,由于当前路由决策节点只是扫描自己的邻居节点,它仅仅知道自己的一跳邻居节点,并根据这些邻居节点的本地信息来做路由决策,因此即使可以通过当前路由决策节点的单跳父亲节点或者某个儿子节点及其邻居节点来实现更短的路由捷径,当前路由决策节点还是不会选择这条路由路径。

因此,为了进一步扩大增强树型路由协议的使用范围,尽可能地开发出所有潜在的路由捷径,本研究提出了单跳扩展增强树型路由协议。通过交换邻居表信息,该协议把当前路由决策节点的单跳父亲节点和儿子节点及它们的邻居节点也考虑进路由决策过程,也就是说,可选路由捷径范围不再局限于当前路由决策节点的一跳邻居,而是向上扩展到其父亲节点以及向下扩展到其儿子节点的一跳邻居。这样,具有更少路由跳数的、潜在的可用路由捷径将大大增加,这对于无线传感器网络来说,跳数的节省意味着能耗的减少,网络寿命也会

相应增加。实际上,在网络节点部署密度较大时,节点的邻居个数就越多,潜在的路由捷径数目也会增加,该路由协议的优势就会更加明显。

3.1 网络参数定义

单跳扩展增强树型路由协议的关键是找到相对于树型和增强树型路由来说更多的路由捷径来然后选择最短的路由捷径来发送数据包,在进行详细判定之前,为方便阐述,现给出以下几个定义:

- (1)对网络中任意2个节点 N_i 和 N_j , $N_{CA}(N_i, N_j)$ 为 N_i 和 N_j 所具有的最大网络深度的共同祖先节点;
- (2)当前路由决策节点 N_m 的目的节点为 N_d , 邻居节点为 N_n , 若数据包由 $N_m \rightarrow N_n \rightarrow N_d$ 所经过的最短路由跳数少于树型路由由 $N_m \rightarrow N_d$ 所经过的路由跳数,则 N_m 到 N_n 之间存在增强链路;
- (3)对当前路由决策节点 N_m 和它的目的节点 N_d , N_m 所对应的网络深度为 d_m , N_d 所对应的网络深度为 d_d , 邻居节点 N_n 对应的网络深度为 d_n , $N_{CA}(N_m, N_d)$ 对应的网络深度为 d_{md} 。

同时,一定的网络地址分配机制能够保证任意一个节点的网络地址能够决定它的网络深度,并且任意两个节点 N_i 和 N_j 的网络地址能够决定它们的 $N_{CA}(N_i, N_j)$ 节点的网络深度。

3.2 单跳扩展增强链路的判定

在找到的所有路由捷径中,OEETR 将会选择最短的那条路由捷径发送数据包,称这条链路为单跳扩展增强链路。

对于网络中任意一对源和目的节点来说,当前路由决策节点 N_m 首先计算出数据包经过 TR 到达目的节点 N_d 所需要的路由跳数为 H_{TR} :

$$H_{TR} = d_m - d_{md} + d_d - d_{md} \quad (1)$$

在使用邻居表的情况下, N_m 将计算出通过邻居 N_n 发送数据包到目的节点 N_d 所使用的增强链路,这也是 ETR 协议中的增强链路,所需要的最短路由跳数为 H_{ETR} :

$$H_{ETR} = 1 + d_n - d_{nd} + d_d - d_{nd} \quad (2)$$

那么,相对于 TR 来说,数据包通过该一跳邻居 N_n 形成的路由到达 N_d 所能节省的路由跳数为:

$$\Delta_{H1} = H_{TR} - H_{ETR} = d_m - d_n - 1 + 2(d_{nd} - d_{md}) \quad (3)$$

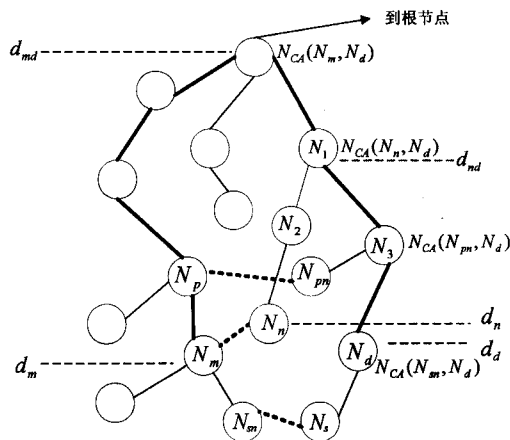


图3 单跳扩展增强链路的判定

如果 $\Delta_{H1} > 0$, 那么增强链路存在, 则路由的下一跳节点 N_x 是邻居节点 N_n , 反之如果 $\Delta_{H1} \leq 0$, 说明经过 N_n 并不能形成比 TR 更短的路由捷径, 数据包将沿着 TR 路径发送, 如图

3 所示, 其中 $N_m \rightarrow N_n$ 的红虚线表示待判定的邻居链路, 假如存在路由捷径, 则形成增强链路, 否则就抛弃。

在 OEETR 协议中, 对于任意一对源和目的节点来说, 为了找到更多的路由捷径, 当前路由决策节点 N_m 除了需要计算出通过它的一跳邻居节点 N_n 所使用的路由跳数, 还需要计算出单跳扩展后所经过的父亲节点和儿子节点及它们的一跳邻居节点所需要的路由跳数, 这里分为单跳扩展向上经过父亲节点及父亲节点的邻居进行数据传输和单跳扩展向下经过儿子节点及儿子节点的邻居进行数据传输。

(a) 单跳扩展向上, 即数据包通过 N_m 的父亲节点 N_p 及其邻居节点 N_{pn} 到达目的节点 N_d 所使用的最短路由跳数为 H_{OHUP} :

$$H_{OHUP} = 2 + d_{pn} - d_{pnd} + d_d - d_{pnd} \quad (4)$$

那么, 相对于 TR 来说, 数据包通过 N_p 及其邻居节点 N_{pn} 所形成的路由到达 N_d 所能节省的路由跳数为:

$$\Delta_{H2} = H_{TR} - H_{OHUP} = d_m - d_{pn} + 2(d_{pnd} - d_{md} - 1) \quad (5)$$

如果 $\Delta_{H2} > 0$, 说明单跳扩展向上经过 N_m 的父亲节点 N_p 及其邻居节点 N_{pn} 可以实现相对于 TR 更短的路由捷径; 反之如果 $\Delta_{H2} \leq 0$, 说明单跳扩展向上经过 N_m 的父亲节点 N_p 及其邻居节点 N_{pn} 并不能形成比 TR 更短的路由捷径。

(b) 单跳扩展向下, 即数据包通过 N_m 的儿子节点 N_s 及其邻居节点 N_{sn} 所使用的最短路由跳数。在树形拓扑结构的网络中, 每个节点有且只有一个父亲节点, 但是可以有多个儿子节点, 因此, 假设当前路由决策节点 N_m 有 l 个儿子节点, 那么, 数据包在通过这 l 个儿子节点及它们的邻居节点到达目的节点 N_d 所使用的最短路由跳数为 H_{OHDOWN} :

$$H_{OHDOWN} = \min\{H_{OHDOWN1}, H_{OHDOWN2}, \dots, H_{OHDOWNi}, \dots, H_{OHDOWNl}\} \quad (6)$$

其中,

$$H_{OHDOWNi} = 1 + d_{si} - d_{sid} + d_d - d_{sid} \quad (1 \leq i \leq l) \quad (7)$$

为数据包通过 N_m 的第 i 个儿子及其邻居到达目的节点 N_d 所使用的最短路由跳数。

那么, 相对于 TR 来说, 数据包通过 N_s 及其邻居节点 N_{sn} 所形成的路由到达 N_d 所能节省的路由跳数为:

$$\begin{aligned} \Delta_{H3} &= H_{TR} - H_{OHDOWN} \\ &= d_m + d_d - 2d_{md} - \min\{\dots, H_{OHDOWNi}, \dots\} \quad (1 \leq i \leq l) \end{aligned} \quad (8)$$

如果 $\Delta_{H3} > 0$, 说明单跳扩展向下经过 N_m 的儿子节点 N_s 及其邻居节点 N_{sn} 可以实现相对于 TR 更短的路由捷径; 反之如果 $\Delta_{H3} \leq 0$, 说明单跳扩展向下经过 N_m 的儿子节点 N_s 及其邻居节点 N_{sn} 并不能形成比 TR 更短的路由捷径。

从上可知, 通过单跳扩展之后, 相对于 TR 来说, 源和目的节点之间更多的路由捷径将被发掘, 路由捷径越短, 发送数据包到目的节点所需的跳数就越少, 能量消耗也就越低, 这些路由捷径所能节省的最大路由跳数为:

$$H_{OEETR} = \max\{\Delta_{H1}, \Delta_{H2}, \Delta_{H3}\} \quad (9)$$

那么, OEETR 将会根据式(9)判定出哪条路由捷径是最短的, 即节省的路由跳数最多, 并选择那条路由捷径来转发数据包, 而这条链路就是单跳扩展增强链路, 该链路可能是通过 N_m 的邻居节点产生, 也可能是通过 N_m 的父亲节点及其邻居节点产生, 或者是通过 N_m 的某个儿子节点及其邻居节点产生。一般情况下, 尤其是在网络分布密度比较大的时候,

$H_{OEETR} > 0$, 说明路由捷径是存在的。如果 $H_{OEETR} \leq 0$, 意味着在极端情况下, 根本不存在路由捷径, 数据包将按照树型路由转发。

如图 3 所示, 当前路由决策节点为 N_m , 虚线代表邻居增强链路而不是父子链路, 从节点 N_m 到节点 N_d 的树型路由路径为橙色粗实线所示, 共经历了 7 跳。对于普通 ETR 路由来说, N_m 将会根据式(3)来判定并选择自己的邻居节点 N_n 作为下一跳节点, 产生出路由捷径为 $N_m \rightarrow N_n \rightarrow N_2 \rightarrow N_1 \rightarrow N_3 \rightarrow N_d$, 路由跳数为 5 跳, 比树型路由节省了 2 跳。对于 OEETR 路由来说, 通过单跳扩展, 除了计算出普通 ETR 路由所能产生的路由捷径外, 还能根据式(5)计算出通过 N_m 的父亲节点及其邻居节点所能产生的路由捷径为 $N_m \rightarrow N_p \rightarrow N_m \rightarrow N_3 \rightarrow N_d$, 路由跳数为 4 跳, 比树型路由节省了 3 跳。同样, 根据式(8), 得到通过 N_m 的儿子节点及其邻居节点所能产生的路由捷径为 $N_m \rightarrow N_s \rightarrow N_m \rightarrow N_d$, 路由跳数为 3 跳, 比树型路由节省了 4 跳。那么, 根据式(9), OEETR 将会选择节省路由跳数最多的那条捷径转发数据包, 在这里即是路由捷径 $N_m \rightarrow N_s \rightarrow N_m \rightarrow N_d$, 也即是单跳扩展增强链路。

虽然上述判定方法可以快速地发现邻居节点, 但是为了减少判定次数以节省计算量, 研究发现该过程存在以下几种情况: 如果目的节点 N_d 是当前节点 N_m 的邻居节点, 则增强路径存在, 且下一跳节点 $N_x = N_d$; 如果目的节点 N_d 不是当前节点的邻居节点, 但它是当前节点的祖先节点, 那么下一跳节点为父节点 N_p , 即 $N_x = N_p$; 如果目的节点 N_d 既不是当前节点的邻居节点又不是其祖先节点, 但是它是当前节点的子孙节点, 那么下一跳节点为子节点 N_s , 即 $N_x = N_s$; 如果目的节点 N_d 既不是当前节点的邻居节点又不是其祖先节点, 也不是它的子孙节点, 而是邻居节点的父节点或子节点, 那么增强路径存在且下一跳节点为邻居节点 N_n , 即 $N_x = N_n$; 如果目的节点 N_d 既不是当前节点的邻居节点又不是其祖先节点, 也不是它的子孙节点, 更不是邻居节点的父节点或子节点, 那么对此节点进行单跳扩展增强路径判断, 若单跳扩展增强路径存在, 则下一跳节点为邻居节点 N_n 或者前节点的父节点 N_p , 若单跳扩展增强路径不存在, 则下一跳节点是当前节点的父节点 N_p 。单跳扩展增强树型路由协议的实现如图 4 所示。

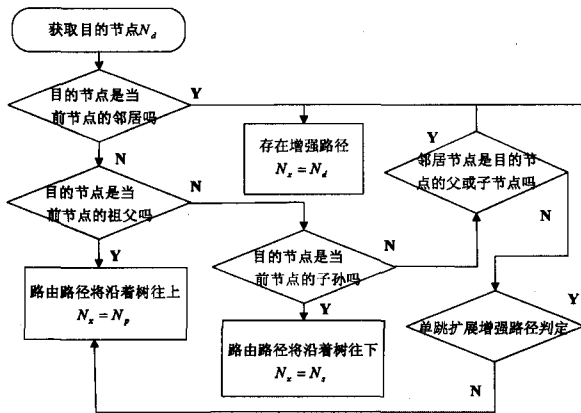


图 4 单跳扩展增强树型路由协议

4 单跳扩展增强树型路由协议性能评估

本研究根据 ZigBee 网络特殊的地址关系和地址分配机

制, 把 OEETR 协议应用到 ZigBee 网络中。ZigBee 网络所采用的地址分配机制能很好地适用于 OEETR 协议, 因为它实现了网络地址分配和网络深度计算的对应^[8]。本研究使用 OMNet++ 网络事件驱动仿真软件, 利用基于 IEEE802.15.4 模型的 ZigBee 网络对 TR, ETR 和 OEETR 协议分别进行仿真, 重点分析了 OEETR 协议在路由跳数和能量消耗方面的性能。网络建立过程和地址分配机制都遵循 ZigBee 标准。中心协调器节点启动网络, 其它所有节点搜索其邻近地区潜在的父节点并加入网络, 中心协调器节点为网络中其它节点提供管理和服务。另外, 802.15.4 模型定义了网络层数据包的随机流量发生器, 在仿真过程中, 每个事件被定义为在随机选择的源和目的节点之间所要发送的网络层数据包, 这些数据包将会沿着根据 TR, ETR 和 OEETR 协议确定好的路由路径转发。同时, 完成每个事件所用的跳数和每一跳的能量消耗信息被记录下来, 事件是有序产生的, 即当一个事件结束后另一个事件才产生, 因此, 可以假设在数据包的发送过程中没有数据包和信道方面的冲突和干扰, 这使得研究可以更加地关注于路由协议的性能。

本仿真场景为 N 个节点随机部署在一个 $500\text{m} \times 500\text{m}$ 的正方形区域内, 其中协调器位于正方形的中心, 每个节点的邻居表可以保存最多 9 个邻居节点的信息。针对每一种仿真场景, 随机产生 100 个传感器网络实例, 每个实例运行中数据包的发送次数为 $\text{TIMES} = 10000$, 每次运行都随机选择源和目的节点, 并记录下每次运行源和目的节点之间所经过的路由跳数和能量消耗信息。然后, 根据所有网络实例仿真结果, 利用如下公式平均化网络性能参数:

$$\text{AverageHops} = \frac{1}{100 \times \text{TIMES}} \sum_{i=1}^{100} \sum_{j=1}^{\text{TIMES}} h_{j,i} \quad (10)$$

$$\text{AverageEng} = \frac{1}{100 \times \text{TIMES}} \sum_{i=1}^{100} \sum_{j=1}^{\text{TIMES}} e_{j,i} \quad (11)$$

式中, AverageHops 为平均跳数, AverageEng 为平均能耗, $h_{j,i}$ 和 $e_{j,i}$ 分别代表第 i 个网络实例中第 j 次运行的跳数和能量消耗。根据文献[10]中的能量消耗模型, 单跳通信传输数据包所消耗的能量为:

$$\text{SingleEng} = 0.001 \times d^3 \quad (12)$$

式中, d 为任意两个节点之间的欧氏距离。为了实现上的方便, 本研究只考虑没有数据包丢失的情况。同时, 使用最大发射范围 T_r 去形成网络, 使用最低功率传输距离 $d \leq T_r$ 时的数据包。

首先, 本研究把节点最大发射范围设定为 $T_r = 150\text{m}$, 部署在网络中的节点数量 N 在 50 和 800 之间变化。处理仿真数据后得到的对比结果如图 5、图 6 所示。

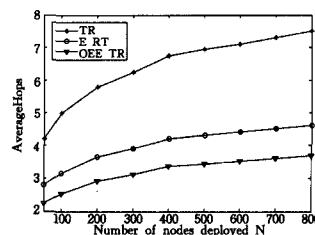


图 5 平均路由跳数

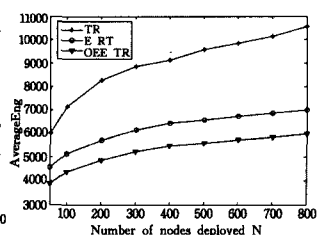


图 6 平均能量消耗

由图 5 可以看出, 对于 TR, ETR 和 OEETR 来说, 随着网络中部署节点数目的增加, 任意 2 个节点之间的平均跳数

(下转第 99 页)

- [6] Theologou O, Carlier J. Factoring and reductions for networks interests with imperfect vertices[J]. IEEE Trans. Reliability, 1991, 40(2): 210-217
- [7] Hardy G, Lucet C, Limnios N. K-terminal network reliability measures with binary decision diagrams[J]. IEEE Trans. Reliability, 2007, 56(3): 506-515
- [8] Ball M O. Computational complexity of network reliability analysis; An overview[J]. IEEE. Trans. Reliability, 1986, 35(3): 230-239
- [9] Reed D A, Lu C D, Mendes C L. Reliability challenges in large systems [J]. Future Generation Computer Systems, 2006, 22(3): 293-302
- [10] Hui K-P. Reliability Estimation [D]. Faculty of Engineering, Computer and Mathematical Sciences, University of Adelaide, 2005

- [11] Shpungin Y. Combinatorial Approach to Reliability Evaluation of Network with Unreliable Nodes and Unreliable Edges [J]. International Journal of Computer Science, 2006, 1(3): 177-183
- [12] Cancela H, Khadiri M E, Rubino G. Rare Event Analysis by Monte Carlo Techniques in Static Models [M]. Rare Event Simulation using Monte Carlo Methods, John Wiley & Sons Ltd., 2009: 145-170
- [13] Gebre B, Ramirez-Marquez J. Element substitution algorithm for general two-terminal network reliability analyses[J]. IIE Transactions, 2007, 39(3): 265-275
- [14] Dominiak S, Bayer N Dr, Habermann J. Reliability Analysis of IEEE 802. 16 Mesh Networks [C]// Broadband Convergence Networks, 2007. BcN '07. 2nd IEEE/IFIP International Workshop. Munich, May 2007: 1-12

(上接第 91 页)

也随之增加。这是因为网络节点数目越多会导致越深的网络拓扑结构,这就增加了网络中任意节点到协调器所使用的平均跳数。文章所提出的 OEETR 协议相对于 TR 和 ETR 协议能够缩减大概 55%和 15%的路由跳数,由于 OEETR 发掘了更多的路由捷径,使得 OEETR 比 ETR 在路由跳数上有明显减少。

同样由图 6 可以看出,随着网络中部署节点的增加,路由路径上所消耗的能量也随之增加。这是因为路由跳数的增加要比可能的单跳距离的减少对能耗的影响显得更加重要。在实际中,稠密部署网络节点并不是为了提高能量效率,确切地说是为了能够提供必需的测量密度或者所需的无线连通性冗余,以应对诸如节点失效或者通信衰竭等问题。在该仿真实例中,OEETR 显示出能够比 TR 和 ETR 缩减大概 40%和 10%的能量消耗,相对于 ETR 来说,OEETR 可以使用更短的路由捷径,路由跳数更少,能量消耗降低。

然后,本研究把部署在网络中的节点个数固定为 $N=200$,而节点的最大无线通信范围在 $T_r=50\text{m}$ 到 $T_r=400\text{m}$ 之间变化。处理仿真数据后得到的对比结果如图 7、图 8 所示。

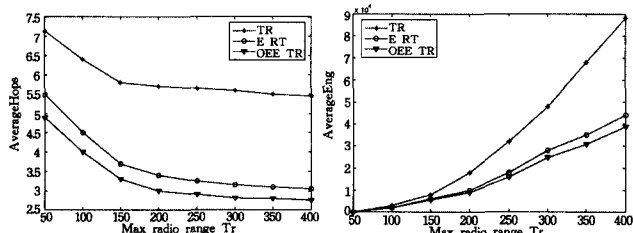


图 7 平均路由跳数

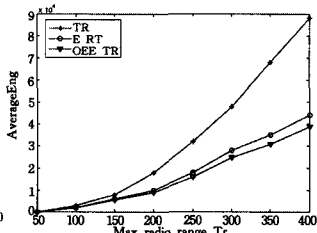


图 8 平均能量消耗

由图 7 可以看出,对于 TR, ETR 和 OEETR 来说,增加节点的最大无线通信范围 T_r 将会导致路由跳数的减少。这是因为越大的 T_r 将引起越稀疏的网络拓扑结构,这减少了网络中任意节点到协调器所使用的平均跳数。进一步说,对于所提出的 OEETR 协议, T_r 越大,意味着网络中一个节点所具有的潜在邻居节点个数越多,因此,也相对增加了找到更多路由捷径的机会。提出的 OEETR 协议显示出能够比 TR 和 ETR 协议缩减 45%和 12%的路由跳数。

根据图 8 可知,对于能量消耗来说,随着 T_r 的增大, TR, ETR 和 OEETR 协议的能量消耗也随之增加。这是因为 T_r 越大,节点通信的单跳最大距离越会增加,其对能量消耗的影响

显示出比对路由跳数的减少更加重要。在 T_r 的变化过程中, OEETR 协议显示出比 TR 和 ETR 具有更好的能量效率,能量消耗分别减少大概 25%和 10%。

结束语 本研究提出了无线传感器网络单跳扩展增强树型路由协议,它充分使用邻居表信息来弥补树形路由协议的不足,以增强树型路由协议为基础,把当前路由决策节点的单跳父亲节点和儿子节点及它们的邻居节点均考虑进路由决策过程,尽可能地发掘出更多潜在的路由捷径,并使用最短的路由捷径传输数据包。本研究给出了单跳扩展增强树型路由协议的判定方法,并应用到 ZigBee 无线传感器网络中。仿真结果显示了该协议的网络性能,单跳扩展增强树型路由协议较树型路由和增强树型路由协议更加节省路由跳数和能量消耗。

参考文献

- [1] Chong C, Kumar S P. Sensor networks: evolution, opportunities, and Changes[C]// Proceedings of the IEEE 91. 2003: 1247-1256
- [2] Zhao F, Guibas L. Wireless Sensor Networks: An Information Processing Approach[Z]. Elsevier-Morgan Kaufmann, Boston, 2004
- [3] Akkaya K, Younis M. A survey on routing protocols for wireless sensor networks[Z]. Ad Hoc Networks, Elsevier, March 2005: 325-349
- [4] Luo J, Xue L, Ye D X. Research on multicast routing protocols for mobile ad-hoc networks[Z]. Computer Networks, Elsevier, April 2008: 988-997
- [5] Yang G S, Wang Z J, He X Y, et al. An Improved ETR Protocol with Energy Awareness for Wireless Sensor Networks[C]// 2009 Fifth International Conference on Mobile Ad-hoc and Sensor Networks, 2009: 117-123
- [6] 尹安, 汪秉文, 胡晓娅, 等. MintRoute-HNLB: 一种支持负载均衡的无线传感器网络路由协议[J]. 计算机科学, 2010, 37(5): 77-80
- [7] 班艳丽, 柴乔林, 王琛. 基于能量均衡的 ZigBee 网络树路由算法[J]. 计算机应用, 2008, 28(11): 2791-2794
- [8] ZigBee Specification Version 1. 0[S]. ZigBee Alliance, 2005
- [9] Qiu W Z, Skafidas E, Hao P. Enhanced tree routing for wireless sensor networks[Z]. Ad Hoc Networks, Elsevier, May 2009: 638-650
- [10] Park J, Sahni S. An online heuristic for maximum lifetime routing in wireless sensor networks[J]. IEEE Transactions on Computers, 2006, 55(8): 1048-1056