·安全技术· 文章编号：1000-3428(2016)07-0139-07 文献标志码：A 中图分类号：TP393

基于定向虚拟骨干网的 WSN 移动代理迁移协议

齐迎春[1]，朱 海[2]

（1. 周口师范学院 计算机科学与技术学院，河南 周口 466001；2 西安电子科技大学 计算机学院，西安 710071）

摘 要： 在无线传感器网络（WSN）中，基于静态路径的代理迁移协议能耗较大，存在较多恶意节点。为此，在能量模型和定向虚拟骨干网的基础上，提出一种定向虚拟骨干网的移动代理迁移（DVB-MAM）协议。该协议利用静态路径计算代理迁移，基于能量模型和定向虚拟骨干网得到代理迁移的下一个节点，使用代理克隆功能减少代理的路径长度。在数据聚合过程中使用信任评价框架检测恶意节点，能够在早期发现恶意节点。实验结果表明，与基于树的路线设计算法相比，提出的协议能耗减少了约 26% 。当存在恶意节点时，与其他协议相比，该协议的平均投递率最多可提高 26% ，能够有效预防节点故障和防御恶意节点攻击。

关键词： 无线传感器网络；代理迁移协议；恶意节点检测；能量模型；定向虚拟骨干网

中文引用格式： 齐迎春，朱 海. 基于定向虚拟骨干网的 WSN 移动代理迁移协议[J]. 计算机工程，2016，42(7)：139-145.

英文引用格式： Qi Yingchun，Zhu Hai. Mobile Agent Migration Protocol Based on Directional Virtual Backbone in WSN[J]. Computer Engineering，2016，42(7)：139-145.

Mobile Agent Migration Protocol Based on Directional Virtual Backbone in WSN

QI Yingchun[1]，ZHU Hai[2]

（1. School of Computer Science and Technology，Zhoukou Normal University，Zhoukou，Henan 466001，China；
2. School of Computer Science and Technology，Xidian University，Xi’an 710071，China）

【Abstract】 In the Wireless Sensor Network（WSN），the Agent migration prococol based on the static path has high energy comsumption，and there are many malicious nodes. To solve these problems，a Directional Virtual Backbone-Mobile Agent Migration（DVB-MAM） protocol is proposed based on energy model and directional virtual backbone network. The protocol uses the static path to calculate Agent migration and determines the next node of Agent migration based on energy model and directional virtual backbone. In addition，cloning features are used to reduce the route length of the Agent. In the process of data aggregation，a trust evaluation framework is used to detect malicious nodes. And malicious nodes can be found at an early stage. Experimental results show that the energy consumption of the proposed protocol is decreased by about 26% compared with that of Tree Based Itineraries Design（TBID）. When malicious nodes exist，compared with other existing protocols，the highest average delivery rate of the proposed protocol can be increased by 26% ，which can effectively prevent node failures and the attacks of malicious nodes.

【Key words】 Wireless Sensor Network（WSN）；Agent migration protocol；malicious node detecting；energy model；directional virtual backbone

DOI： 10.3969/j.issn.1000-3428.2016.07.024

1 概述

近年来，无线传感器网络[1]（Wireless Sensor Network，WSN）发展迅速，已经广泛应用于环境监控、移动通信、人体健康和地下矿山等领域[2]。然而，限制 WSN 发展主要是传感器节点的有限能源和一些恶意节点的攻击。因此，如何减少平均能耗和恶意节点攻击以最大化网络寿命是 WSN 中最具挑战性的问题之一[3]。

已经有很多研究者进行该方面的相关研究，其中，移动代理计算模式一直是 WSN 中的研究热点，相关技术层出不穷。如文献[4]提出了一个基于树

基金项目： 国家自然科学基金资助项目（61103143）；河南省软科学研究计划基金资助项目（142400411133）；海南省科技攻关计划基金资助项目（152102210367）。

作者简介： 齐迎春（1963－），男，副教授、硕士，主研方向为网络安全、云计算；朱 海，副教授、博士。

收稿日期： 2015-05-29 **修回日期：** 2015-07-22 **E-mail：** wyemail_c@126.com

的路线设计(Tree Based Itineraries Design,TBID)算法。TBID 在一个接收器节点中执行集中式算法,并且收集移动代理的数目用于数据聚合和路线规划。在理想情况下性能不错,然而,前提是汇聚节点知道所有传感器节点的地理位置,路线是静态的。文献[5]提出了本地最近优先算法,也是接收器节点中执行集中式算法,本地节点优先执行。然而,该算法的前提是路线静态,需优先知道传感器的地理位置,与之类似的还有全局最近优先算法[6]。文献[7]也提出了一个集中式算法,即基于多代理行程规划的定向源分组计划。然而,该算法需调用 2 个或者2 个以上的移动代理系统,一定程度上增加了系统的通信开销。

现存多数算法通过接收节点执行集中式的方法得到静态路线,有 3 个限制:(1)在给移动代理设计行程路线时,获取全局最新的网络拓扑信息会产生额外的通信开销。(2)移动代理可能因为节点或链路故障,而不会沿着规划好的路线运行[8]。(3)没有考虑安全防护问题,从而产生拒绝请求端的服务或终止该代理的情况[9-10]。为了解决这些问题,本文提出基于能量模型和定向虚拟骨干网的移动代理迁移协议,作为一种动态的、分布式协议,能在早期检测到恶意节点。

2 网络与能量模型

2.1 网络模型

本文使用与文献[11]类似的无线传感器网络模型,由大量的低成本传感器节点组成,均匀分布在半径 R 的监测场上,如图 1 所示。

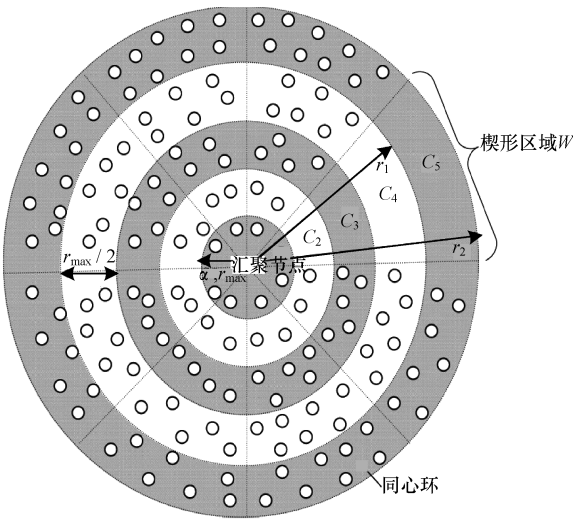


图 1 分为同心环(C_i)和楔形(W_i)的监测场

所有传感器节点都是静态的,具有相同的计算、通信、传感功能,只有一个放置在监测中心区域的汇聚节点,每个传感器节点都有低功率 GPS 设备。假设汇聚节点是一个强大、可信的数据收集装置,每一个传感器节点都配备有防篡改信任管理器组件,用来存储节点的信任值。

2.2 能量模型

节点发送 K 比特数据包到 CH 所消耗的能量与 d^2 成正比,即:

$$ET_c = K \times E_e + \begin{cases} K \times E_S d^2 & d \leqslant d_0 \\ K \times E_1 d^4 & d \geqslant d_0 \end{cases} \tag{1}$$

其中,E_s和 E_1分别表示节点将数据包传输到 CH 和汇聚节点所消耗的能量,即节点到 CH(d^2)和汇聚节点(d^4)的距离。阈值距离 d_0 是一个功放能量函数。

$$ER_c = K \times (E_e + E_{DA}) \tag{2}$$

其中,E_{DA}表示 CH 进行数据包聚合所消耗的能量。在节点随机分布的情况下,每个簇类含有 N/n 个节点,则 CH 消耗能量用 E_{CH}表示:

$$E_{CH} = K \times (E_e + E_S d^2) + ((N/n) - 1) \times K \times (E_e + E_{DA}) \tag{3}$$

式(3)的第 1 部分表示在簇类内部 CH 传输广播信息所消耗的能量;第 2 部分表示在簇类内部接收{(N/n) -1}个节点发出的数据包所消耗的能量。因此,式(3)也可改写为:

$$E_{CH} = K \times E_e(N/n) + K \times E_S d^2 + ((N/n) - 1) \times K \times E_{DA} \tag{4}$$

每个相关节点向 CH 发送数据包,根据聚合函数将这些数据聚合,然后通过形成的群组 m 进行通信。在该条件下,一个含有大量残余能量并靠近汇聚节点的 CH 将聚合数据由群组传输到其他的非相关 CH。因此,CH 传输每帧数据到汇聚节点所消耗的能量 E_{CHF}为:

$$\begin{aligned} E_{CHF} &= K \times (E_e + E_1 d^4) + [((N/n) - m + 1) \times K \times (E_e + E_{DA})] \\ &= K \times E_1 d^4 + K \times E_e((N/n) - m + 2) \\ &\quad + K \times E_{DA}((N/n) - m + 1) \end{aligned} \tag{5}$$

随机分布的节点为 N/n,每个簇头一次迭代传输的数据帧为 N_f/n,这里 N_f 表示一次迭代中的数据帧,数据传输过程中的能量消耗为:

$$E_{CHD} = N_f \times F_1 \times E_{CHF} \tag{6}$$

其中,$F_1 = (1/K)((N/n) - m + 2)$,每次迭代循环中的能量消耗为:

$$E_{Round} = (E_{CH/IT})/m = (E_{CH} + E_{CHD})/m \tag{7}$$

异构节点的能量消耗是根据每个簇类尺寸和相关节点的个数获取的,即网络中初始能量总和为:

$$E_i = N(\alpha E_n + \beta E_a + \gamma E_s) \tag{8}$$

3 移动代理迁移协议

本文提出一种动态的、分布式的移动代理迁移

协议,即能量模型的定向虚拟骨干网的移动代理迁移(Directional Virtual Backbone-Mobile Agent Migration,DVB-MAM)协议。DVB-MAM 协议的基本思想是在移动代理迁移过程中识别并绕过故障节点和恶意节点。

3.1　初始化

初始化阶段进一步分为 3 个子阶段:创建同心环,创建楔形区域和发现邻居节点。创建同心环阶段,汇聚节点将整个圆形监测区域划分为同心环。第一同心环的宽度为 $\alpha . r_{max}$,其中,α 在范围(0,1]中;r_{max}是传感器节点的最大发射范围。所有其他同心环的宽度为 $r_{max}/2$。其结果是在同心环 C_i 上放置的每个节点只能与上个 C_{i-1}和下个 C_{i+1}同心环上的节点进行通信。算法 1 给出同心环创建阶段的伪代码,其中,*RingCreationPkt*(*sinkID*, *ringNo*)是同心环创建函数,*sinkID* 是环 ID,*ringNo* 不仅是该函数的参数(环号),同时也是函数循环中起判断作用的变量。

算法 1　同心环创建算法

```
//对于汇聚节点
1. 初始 ringNo = 1;
2. 调整传输功率范围
3. 当 R > 0 时,广播 RingCreationPkt(sinkID,ringNo)消息,并转到步骤 4;否则,end。
4. if(ringNo = = 1) R = R-a * r_max;ringNo + +;转到步骤 3;
if(ringNo > 1) R = R-r_max/2;ringNo + +,转到步骤 3。
//对任意传感器节点
if(接收到 RingCreationPkt 消息 m,并且 x. ringNo = 0);
x. ringNo = m. ringNo;
end
```

楔形创建阶段,汇聚节点将整个圆形监视区域划分为楔形角度区域。算法 2 给出楔形创建阶段的伪代码。*wedgeCreationPkt*(*sinkID*, *sink_loc*, *wedgeNo*)为楔形创建函数,*wedgeNo* 表示楔形号,是 *wedgeCreationPkt* 的参数,同时还是该函数循环的变量。

算法 2　楔形创建算法

```
//对于汇聚节点
1. k:环 C1 中节点的数量;
2. wedgeNo = 1;
3.  θ = 2π/k;      //设置定向天线的角度
4. if(θ≤2π)  那么
5. 调整定向天线的角度为 θ;
6. 广播 wedgeCreationPkt(sinkID, sink_loc, wedgeNo)消息
7. θ = θ + 2π/k;
8. wedgeNo = wedgeNo + 1;
9. 等待时间 v1,v2,v3,...,vp;
10. end
//对于任意传感器节点
//开始时设置所有节点 wedgeNo = 0
11. if(接收到 wedgeCreationPkt 消息 p 并且 x. ringNo = 0)
12. x. ringNo = p. ringNo;
13. end;
```

发现邻居和边界节点阶段,每个节点在它的一跳邻居节点中广播 HELLO 数据包。在此阶段结束时,每个节点都知道其广播区域中的所有邻居节点的节点 ID、边界状态、环号、楔形号、剩余能量和极坐标。算法 3 给出邻居节点发现阶段的伪代码。其中,*boundaryState* 代表边界状态值,为 bool 类型值,*outerBoundaryNode* 代表是否是边界外的节点,也是 bool 类型值,*h* 代表数据包。

算法 3　邻居节点和边界节点发现算法

```
//对于汇聚节点
1. 在一跳邻居节点中广播 HELLO 数据包
2. if(接收到 HELLO 数据包)
3.   更新邻居表 PN(u)
4. end if
//对于任意传感器节点 x
//初始时,timeOn 为假;boundaryState 为假;
//outerBoundaryNode 为真
5. if(节点 x 接收到 HELLO 数据包 h)
6.   if(x. ringNo = = h. ringNo)
7.     更新邻表;
8.   else
9.       x. boundaryState 为真;
10.  end if
11.  if(x. ringNo < h. ringNo)
12.      x. outerBoundaryNode 为假;
13.  end if
14. end if
15. if(timeOn 为假)
16.   timeOn 为真;
17.   广播 HELLO 数据包
18. end if
```

3.2　数据聚合

在代理迁移阶段,汇聚节点并行地把移动代理调度到每个楔形区域 u 的汇聚节点上。其中,$i = 1, 2, \cdots, k$,用于数据收集。汇聚节点是最里面同心圆环的节点,k 是楔形区域的数量。移动代理分组的结构如图 2 所示。

包头	移动代理检测	数据聚合处理编码	数据空间

图 2　移动代理数据包结构

为了路由数据到汇聚节点,在汇聚节点构建 CH 的定向虚拟骨干网(Directional Virtual Backbone,DVB)。在 DVB 中,CH 可能有多个父节点,因而到汇聚节点有多条路径,令 $v_1, v_2, \cdots, v_p$ 为属于集合 $PN(u)$的 CHs 集合,如图 3 所示。

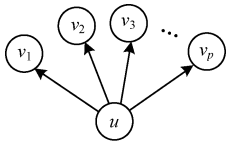


图 3 DVB 中 CH 具有多个父节点的情况

发送数据包之前,节点 u 利用式(9)计算 CH 的平均剩余能量,称为 $\eta(u)$:

$$\eta(u)=\frac{\sum_{i=1}^{p}E_{\gamma}(v_i)}{p} \tag{9}$$

令 $W=\{w_1,w_2,\cdots,w_m\}$为剩余能量大于或等于 $S_{i,j}$的 CH,节点分配所有传入的数据包,包括其自身,按以下比例:

$$E_r(w_1):\ E_r(w_2):\ \cdots:\ E_r(w_m) \tag{10}$$

并将它们发送到相应的 CH,用于数据发送和时间表的接受,路由算法的伪代码如算法 4 所示。

算法 4 路由算法

//定向虚拟骨干网形成

1. 初始化,汇聚节点在 2R 范围内广播 RREQ 消息
2. l_d 初始化为 0
3. for 每个 CHρ
4. if (t_{proc}) then
5. $E_{average_energy_consumption}=\frac{(\sum_{i=1}^{k}\sum_{j=1}^{N/K}E_{i,j})}{N}$;
6. $E_{i,j}$;
7. end if
8. end for
9. 递归地,节点 $T_{threshold}$ 在 3R 范围内广播 RREQ 消息
10. if (节点 v 接收到消息且 L(v) > L(u)) then
11. PN(v) = u;
12. L(v) > L(u) + 1;
13. end if
14. 递归地,步骤 8 ~ 步骤 14 一直进行,直到所有 CHs 分配有各种级别

//数据路由

15. for
16. sum = 0;
17. for 每个属于 PN(u)的 CHv
18. sum = sum + E_r(k);//初始化 sum = 0
19. end for
20. η(u) = sum/|PN(u)|;
21. for 每个属于 PN(u)的 CHv
22. if $E_r(v)\geqslant\eta(\mu)$ then
23. W = union(W,v);//初始化 W
24. end if
25. end for
26. for 每个属于 W 的 CHk
27. if (MAX > E_r(k)) then
28. MAX > E_r(k);
29. P = k;
30. end if
31. end for
32. for 每个属于 W 的 CHk
33. Nop(k) = E_r(k)/E_r(P);
//Nop(k) = 发送给 CHk 的数据包数量;
34. 节点 u 发送 Nop(k)个数据包给节点 k;
35. end for
36. end for

在基于 WSN 的移动代理中,每个节点都配备了移动代理中间件[1]来给移动代理提供不同的执行环境,执行不同的特定任务。当一个移动代理到达任何用于数据融合/汇聚的传感器节点时,把不同的服务请求送到中间件,从而完成任务。这些服务由中间件系统提供给移动代理。每个代理都有一个传感器节点执行以下 4 种基本的本地操作:迁移,克隆,更新代理公文包和聚合数据[12-13]。当一个代理访问传感器节点时,结合代理本身携带的数据对节点的监测数据进行数据聚合。数据汇聚后,系统调用更新代理公文包的函数,使用汇总数据更新代理的数据区。然后,代理启用转移函数找到下一个继续前进的邻居节点。

为了识别和绕过恶意或损害的节点,本文使用信任评价框架[14]。每个节点 x 保持一个信任管理器组件(Trust Manager Component,TMC)来评估本地邻节点 y 的信任值。TMC 维护 5 个属性表:邻居节点标识符(节点 ID)、S_{CPF}、U_{IPF};直接信任值(T_{direct});间接信任值($T_{indirect}$);最终信任值(T_{final})和时间戳(T_s)。S_{CPF}和 U_{IPF}是无符号整型变量,分别存储一个时间间隔内代理数据包成功和不成功的转发的数目。T_{direct}是用节点 x 计算出的邻节点 y 的信任值(即直接信任)。$T_{indirect}$是节点 y 基于节点 x 邻居节点建议的信任值(即间接信任)。时间戳(T_s)用于检查 T_{final}的间隔长短。图 4 给出了信任评估框架,用来评估基于传感器节点通信行为的邻居节点的信任值。直接信任值取决于本地邻节点的行为,如删除、误传、迟报、回放或修改报文的监测结果。

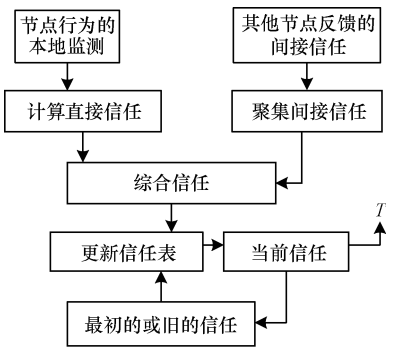


图 4 信任评价方法

图 5 的流程图描述了节点如何给边界节点转发代理包,以及在每个扇区 $S_{i,j}$中迁移数据包时如何从邻表中选出下个节点。该方法的主要限制是,每个楔形扇区中必须有一个节点。

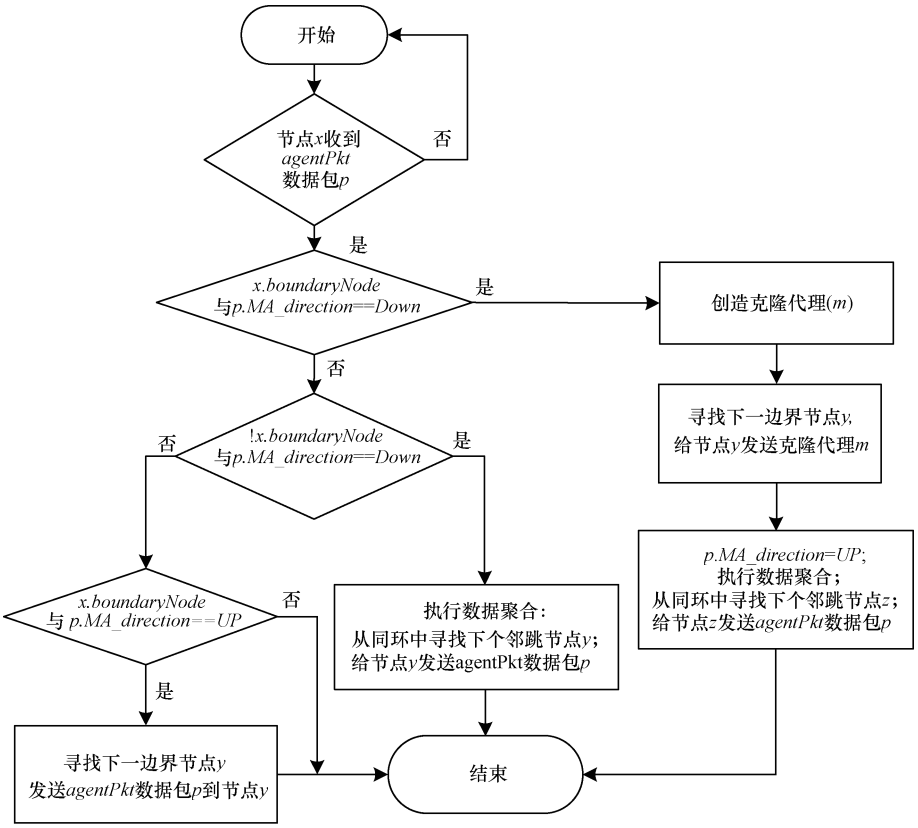


图 5　代理迁移过程

4　实验与结果分析

4.1　模拟参数设置

仿真设置中的传感器节点均匀分布在圆形监控区域内。汇聚节点是静态的,放置在监测场的中心,恶意节点也均匀地分布在该区域。传感器节点的通信范围固定在 25 m。所有传感器节点具有相同的初始电量 1 8720 J(相当于 2AA 电池)。整个仿真实验中使用的模拟参数如表 1 所示。

表 1　仿真参数

参数	内容
监测区域	半径为 200 m 的圆
节点数量	100 ~ 500
传输半径/m	25
模拟时间/s	500 ~ 3 000
初始能量/J	18 720
数据聚合过程代码量/Byte	1 000
监测数据 l_d 的大小/Byte	200
数据聚集率 ρ	0.75
以毫秒观察每个传感器上代理的执行时间 t_{proc}	50
代理实例延迟/ms	10
MAC 协议	IEEE 802.15.4
无线模型	CC2420
传输能量/mW	67.5
接收能量/mW	62
包生成速率/(Kb · s^{-1})	0.02 ~ 0.2
包尺寸/Byte	64

4.2　每轮平均能耗比较及网络寿命

每轮平均能耗的定义为节点完成一轮数据汇总和收集任务后的能量消耗[15]。

$$E_{\text{average_energy_consumption}}=\frac{(\sum_{i=1}^{k}\sum_{j=1}^{N/K}E_{i,j})}{N} \tag{11}$$

其中,$E_{i,j}$是第 j 个节点在第 i 个移动代理中迁移所消耗的能量;k 是已部署的移动代理的总数;N 是网络中的节点的总数。如图 6 所示,在节点数目不同时,DVB-MAM 和其他现有协议在每轮平均能耗方面上的性能比较。

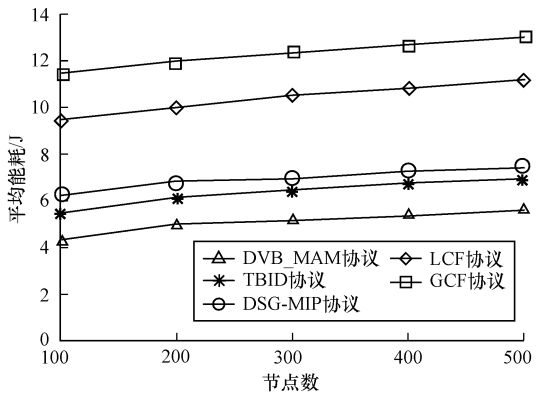


图 6　各协议在平均能耗方面的比较

结果表明,随着节点数量的增加,每轮的平均能耗也随之增加。这是由于代理节点的路线长度和访

问的节点数目增加了。DVB-MAM 比 TBID 少消耗约 26% 的能量。这是因为 DVB-MAM 在每个主节点上动态地计算代理的路线,并使用了代理克隆的概念。该概念并行分派出去多个代理,分别对应不同楔形区域内的环来访问其中一组节点。因此,代理的负荷没有超载,降低了能耗。

从图 6 可以看出,除了 DVB-MAM,TBID 平均能耗最低,从图 7 可以看出,在相同和不同包生成率情况下,利用第 1 个死亡节点计算网络的网络寿命,DVB-MAM 与 TBID 相比拥有更长的寿命。

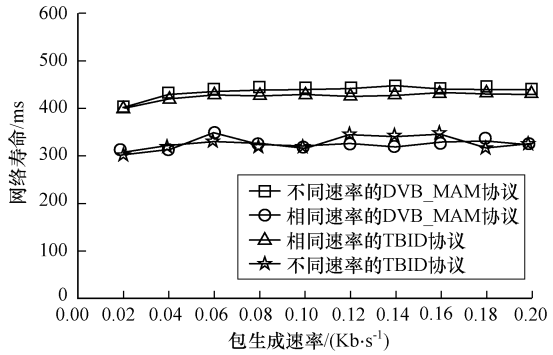


图 7 网络寿命比较

4.3 恶意或损坏节点的影响比较

圆形传感器场的半径固定为 200 m,里面部署了 300 个节点。恶意或损坏的节点在 2% ~10% 之间变化。该实验的目的是为了观察恶意或损害的节点对移动代理迁移成功率的影响。图 8 显示出恶意节点对代理路径成功率的影响。

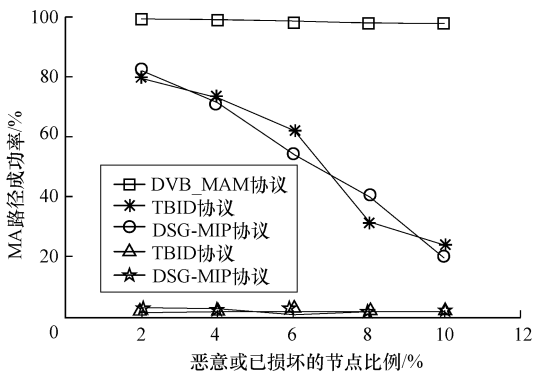


图 8 恶意节点对 MA 路径成功率的影响

可以看出,在网络中有恶意或损害节点的存在下,DVB-MAM 比其他协议的性能更好。这是因为,在代理迁移中,DVB-MAM 利用下一跳节点的能源和信任值来决定下一跳节点。如果下一跳节点的信任值低于阈值 $T_{threshold}$,协议就不选择它作为下一跳节点,从而修改了代理路线。这样 DVB-MAM 就避开了恶意节点,它的代理路线成功率在所有协议中是最高的。其他协议在有恶意节点存在的情况下效果均不是很好,因为它们是基于静态路线的协议。这些协议中的代理遵循固定的路线,如果路线上有恶意节点的话,就不能完成既定行程。图 9 显示出存在恶意节点时,本文代理迁移算法在有信任管理和没有信任管理的情况下性能的变化。恶意节点可以进行选择性转发或灰洞攻击,它们把经过的数据包丢弃大约 85% 。

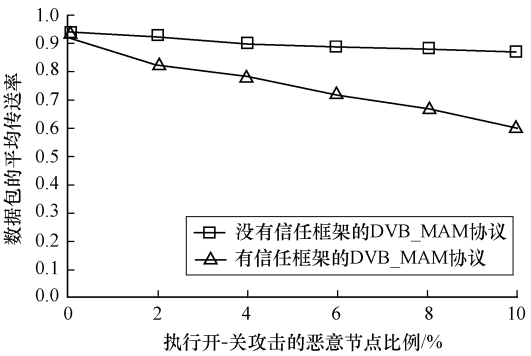


图 9 不同恶意节点数目下数据包的传送率

从图 9 可以看出,在没有信任管理的情况下,恶意节点可以显著降低 DVB-MAM 的平均数据包投递率。采用基于信任的代理迁移后,平均投递率最高可以提高 26% ,因为它避免了选择恶意节点来转发移动代理的数据包。

图 10 显示出具有不同的节点数量时,DVB-MAM 与其他现有的协议在平均分组传送率方面的性能比较。

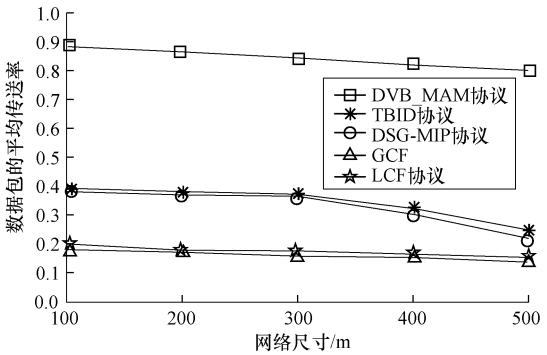


图 10 不同传感器节点密度下数据包传送率

实验中节点的数量在 100 ~500 间变化,监测区域的半径固定为 200 m。数量为 10% 的恶意节点均匀分布于监视场内。可以看出,DVB-MAM 的平均分组传送率大约为 88% 。结果表明,与其他协议相比,DVB-MAM 在平均包投递率方面的性能更好。这是因为 DVB-MAM 利用传感器节点的可信度来避免选择恶意节点作为转发代理包的下一个节点。然而,其他协议没有使用任何机制来避免恶意节点。

图 11 显示出在不同网络规模下,DVB-MAM 与

其他现有的协议在平均分组传送率方面的性能比较。节点密度固定为每平方米 0.006 36 个节点,网络中包含 10% 的恶意节点。可以观察到,在有恶意节点存在时,DVB-MAM 的平均分组传送率比其他协议都要更好。这是因为 DVB-MAM 基于能源和相邻节点的信任值,采取动态行程来确定代理使用的路线。这种方式使 DVB-MAM 避免了恶意节点,从而提高了分组递送率。然而,其他协议都基于静态行程规划,其中代理遵循预先确定的行程传递。

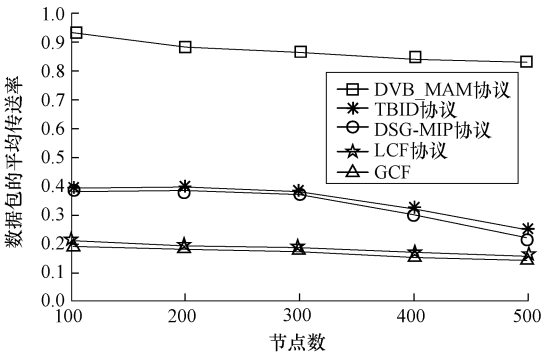


图 11　不同网络大小下数据包的传送率

5　结束语

本文提出一种基于能量模型和定向虚拟骨干网的 WSN 移动代理迁移协议 DVB-MAM,综合考虑能量和信任值决定代理迁移的下一个节点,同时,使用代理克隆功能减少代理的路线长度。仿真结果表明,DVB-MAM 在能耗、网络寿命和在恶意或损坏节点环境下的性能都有较好的表现,在平均能耗方面,DVB-MAM 比 TBID 减少约 26% ,存在恶意节点时,DVB-MAM 与其他现有的协议相比具有更加显著的优越性。下一步工作是研究三维 WSN 中的 DVB-MAM 和节点移动对代理迁移性能的影响。

参考文献

[1] 向亦宏,朱燕民. 无线传感器网络中高效建立干扰模型的研究[J]. 计算机工程,2014,40(8):1-5.

[2] 李晓诚. 基于小世界模型的无线传感器网络路由算法的研究[D]. 南京:南京邮电大学,2012.

[3] Kuila P, Gupta S K, Jana P K. A Novel Evolutionary Approach for Load Balanced Clustering Problem for Wireless Sensor Networks[J]. Swarm and Evolutionary Computation, 2013, 24(12): 48-56.

[4] Konstantopoulos C, Mpitziopoulos A, Gavalas D, et al. Effective Determination of Mobile Agent Itineraries for Data Aggregation on Sensor Networks [J]. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 2010, 22(12): 1679-1693.

[5] 王涛春,秦小麟,刘　亮,等. 无线传感器网络中安全高效的空间数据聚集算法[J]. 软件学报, 2014, 17(8): 1671-1684.

[6] Alassem A. 基于无线传感器网络路由协议的能量感知聚集类[D]. 长沙:中南大学,2014.

[7] Wang Xiaofei, Chen M, Kwon T, et al. Multiple Mobile Agents' Itinerary Planning in Wireless Sensor Networks: Survey and Evaluation[J]. IET Communications, 2011, 5(12): 1769-1776.

[8] 刘辉亚,徐建波. 无线传感器网络节点定位的移动信标节点路径规划[J]. 传感技术学报, 2010, 23(6): 873-877.

[9] Lin Ching, Varadharajan V. Mobile Trust: A Trust Enhanced Security Architecture for Mobile Agent Systems [J]. International Journal of Information Security, 2010, 9(3): 153-178.

[10] 陈雪寒,陈志刚,曾　锋,等. WSN 中一种基于时空相关性的网内数据聚合路由协议[J]. 计算机工程与科学,2015,37(1):48-55.

[11] Rachuri K, Murthy C. Energy Efficient and Low Latency Biased Walk Techniques for Search in Wireless Sensor Networks [J]. Journal of Parallel and Distributed Computing, 2011, 71(3): 512-522.

[12] 黄　刚,王汝传,唐　晨. 基于移动 Agent 中间件的 WSN 数据聚集算法[J]. 传感技术学报, 2009, 22(12): 1834-1838.

[13] Mercadal E, Robles S, Martí R, et al. Double Multiagent Architecture for Dynamic Triage of Victims in Emergency Scenarios [J]. Progress in Artificial Intelligence, 2012, 1(2): 183-191.

[14] 王海涛,朱世才,陈　晖,等. 应急通信中基于 ANP 的 WSN 可生存性评价指标体系研究[J]. 传感技术学报,2014,27(4):557-563.

[15] 彭　煜. 基于最小能耗树的无线传感器网络路由协议研究[D]. 济南:山东大学,2010.

编辑　顾逸斐