

基于虚拟网格的无线传感器网络高可靠性路由^{*}

闫 斌¹⁺, 周小佳¹, 王厚军¹, 郎方年², 李本亮¹

¹(电子科技大学 自动化工程学院, 四川 成都 610054)

²(重庆大学 计算机学院, 重庆 400044)

High Reliability Routing for Wireless Sensor Networks Based Virtual Grid

YAN Bin¹⁺, ZHOU Xiao-Jia¹, WANG Hou-Jun¹, LANG Fang-Nian², LI Ben-Liang¹

¹(College of Automation, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

²(College of Computer, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

+ Corresponding author: E-mail: uestyan@163.com

Yan B, Zhou XJ, Wang HJ, Lang FN, Li BL. High reliability routing for wireless sensor networks based virtual grid. *Journal of Software*, 2009,20(6):1591–1601. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3348.htm>

Abstract: In order to achieve an efficient and highly reliable data delivery channel, this paper present a grid-based high reliability routing (GHRR) after comparing some communication schemes and their reliability. GHRR assign a virtual ID for every grid and its cluster head. After that, the node selects its next hop nodes by itself according to the assigned virtual ID. Multiple copies of data are interleaved transmitted directly to sink. As a result, the reliability of data delivery is enhanced. The performances of GHRR has been evaluated through both analysis and extensive simulation. They show that GHRR yields an improvement in enhancing reliability and reducing time delay.

Key words: wireless sensor networks; virtual grid; routing; reliability; cluster

摘 要: 为了得到能量高效、具有高可靠性的数据通信链路,在比较几种不同通信方案的链路可靠性的基础上,提出了一种基于虚拟网格单元的高可靠性路由算法(grid-based high reliability routing,简称 GHRR).算法为每个网格及其簇头节点分配一个虚拟 ID,节点根据该 ID 自主选择其多个下一跳头节点,使数据的多个拷贝在朝向 sink 方向上交错传播,从而提高数据传输的可靠性.通过分析及仿真进一步表明,算法提高了路由的可靠性,并具有更小的时间延迟.

关键词: 无线传感器网络;虚拟网格;路由;可靠性;簇

中图法分类号: TP393

文献标识码: A

无线传感器网络是由数量众多的单个节点通过一定的机制组成协同工作的网络,共同完成监测区域的数据感知.为数据传输而设计的路由协议很多是在数据通信可靠的假设下设计的,但实际环境一般不能保证可靠通信,一些不确定因素比如节点能量耗尽、意外破坏等可能导致节点失效,噪声干扰、数据冲突等也增加了通信链路的错误率.在算法设计中,必须考虑在不可靠链路下如何实现可靠通信.现有的路由要么为单路径(single-path),要么为多路径(multi-path)方式.显然,在单路径方式下,路径上的任何一跳节点失效或者通信错误

* Received 2007-12-06; Revised 2008-02-01; Accepted 2008-03-31

都会导致数据不能到达 sink.为了提高数据传输的可靠性,学者们提出了多路径的通信方式,建立从源到目的节点的多条路径,数据的多个拷贝通过建立的多跳路径同时向目的节点发送.虽然多路径的通信方式在一定程度上提高了数据传输的可靠性,但整个系统能量消耗比较大,使得网络的生命周期减小.可见,能量的高效性、数据通信的可靠性是无线传感器网络路由设计中需要考虑的两个重要方面,两者往往相互制约.在设计路由算法时,需要考虑在提高链路可靠性的前提下减少能量消耗.

从基站的角度看,在无线传感器网络系统的很多应用中,基站是一个很特殊的装置,其性能往往高于普通传感器节点,而且一般不受能量限制,可以作为一个特殊的 sink 在算法设计中加以充分利用.在单 sink 的系统中,特别是对于大规模无线传感器网络系统,大量的数据都要通过指向该 sink 的特定路径来传输,一方面容易形成“网络热点”,使得 sink 周边节点因为进行大量数据转发而能耗过快;同时,多个数据通过狭窄且相对单一的路径传输,数据冲突加剧,延迟增加.而对于两个甚至多个 sink 节点的系统,数据可以通过多个 sink 节点同时进行收集,分担了单 sink 的负荷,也在一定程度上避免了网络热点的出现,并减小了数据延迟.比如在军事应用中,要监测前沿阵地敌方活动情况,可以通过在阵地上抛洒无线传感器网络节点形成自组织的网络,同时,在己方阵地两端部署两个高性能的 sink 负责收集各节点发来的数据.这种双 sink 的架构利用了基站的充足资源,有助于分担节点的负荷.

1 相关工作

传统无线传感器网络路由设计都采用了单 sink 的模式.如前所述,随着网络复杂度的增加,单 sink 的网络架构在很多方面已不能满足系统要求.Pink 等人在文献[1]中对单 sink 作了进一步的分析,指出随着多条路径都最终汇聚于单个 sink,中间转发节点的争抢将越来越激烈,数据冲突增加,而且越靠近 sink,这种现象越严重.此时通过提高节点竞争力已无法改善多路径模式下的数据传输效率,并提出一种基于多 sink 的数据传输策略,将多个 sink 节点部署于监测区域周边,节点采集的数据通过不同路径发送给就近的 sink 节点.此外,文献[2,3]等都采用了多 sink 的网络模型进行网络拓扑、最优路径等的设计.

为了解决不可靠链路下的通信可靠性问题,很多算法被提出,比较典型的如下:

文献[4,5]提出单路径路由修复技术,以最低能耗成本实现高可靠性的数据通信,但一般网络延迟比较大.Stann 等人提出 RMST^[6] 算法,通过探测失效链路并请求重传的方式提高路由可靠性.文献[7,8]基于端-端可靠性约束建立数据通信链路,将信息按重要程度期望的可靠性等级,并以单路径重传、多路径冗余等方式建立路由.Suman 等人在文献[9]中提出单跳距离最短路由并不能保证整个链路上的能耗最优,并分析了在多跳链路中跳数、错误率的变化对整个链路能耗的影响.在 Fan 等人所描述的 GRAB 算法^[10]中, Sink 首先通过泛洪的方式在网络中广播 ADV 信息包来建立数据传输的代价场,代价场暗示了一个指向 sink 的全局数据传输方向——梯度,这样,节点不必考虑其下一跳节点是谁,只需在其数据包中包含该节点的通信代价,只有通信代价更小的邻居节点才能继续转发该包,而通信代价相等或者更高的节点丢弃数据包,多个代价递减的路径交错形成一个数据转发的交错网.同时,源节点通过分配信用度的方式决定网络扩展的宽度,节点根据接收到的信用度份额来决定是否扩展网孔,从而限定数据传输的路径数,将路由限制在源节点到目的节点之间的一条狭长的地带内,避免无限宽度的交错路径网. GRAB 在一定程度上保证了数据传输的可靠性,不过,该算法本质上还是一个周期性的泛洪算法,因为每个节点代价值的取得需要一个完整的泛洪过程,能耗成本较高,时间延迟较大.

本文针对大规模无线传感器网络,并在 GRAB 算法思想的基础上提出一种基于虚拟网格的高可靠性路由算法(grid-based high reliability routing,简称 GHRR),采用双基站的网络架构,把构建梯度的任务由各个传感器节点转移到两个基站,避免了节点周期性的泛洪过程,从而减轻了传感器节点的路由建立和维护负担,降低了能耗. GHRR 为每个虚拟网格单元及其簇头节点分配了一个虚拟 ID,节点根据该 ID 自主选择其多个下一跳簇头节点,使数据的多个拷贝在朝向 sink 方向上交错传播,从而提高了数据传输的可靠性.

2 网络模型及问题陈述

2.1 虚拟网格的形成

在本算法中,设监测区域为边长 M 的正方形,两个高性能基站(base station,简称 BS)分别部署于监测区域同侧的两端,其能量不受限且功率等级大小可离散调节,最大功率等级设为 τ ,功率等级越高,其通信覆盖范围越广,反之越窄.基站相邻功率等级的覆盖范围形成一个环状区域,两个基站各自形成的环状区域相互交叉,将目标区域划分成一系列虚拟网格单元:

首先,两个基站(BS1,BS2)分别按从小到大的离散功率等级 $1 \sim \tau$ 广播初始化消息,初始化消息包含(当前基站编号(BS ID)、基站的功率等级编号(level))等信息.目标区域内的节点收到基站广播的初始化消息后,首先解析基站及功率等级编号,确定自己分别处于基站 1 和基站 2 的哪两个相邻功率等级形成的环内,节点的逻辑 ID 定义为两个基站相邻功率等级编号的组合,且基于 BS1 的两位等级编号在前,基于 BS2 的两位编号在后.例如,某节点分别收到来自 BS1 以功率等级 5(其相邻功率等级为 4)和来自 BS2 以功率等级 8(其相邻功率等级为 7)广播的初始化消息,则该节点的逻辑 ID 为 4578.为避免节点在收到新的初始化消息后逻辑 ID 被重新分配,则设定了逻辑 ID 的节点不再接收基站广播的其余初始化消息,除非基站发出系统重新初始化的指令.

另一方面,虚拟网格单元的逻辑ID分配方式与节点逻辑ID相同,即以两个基站的相邻功率等级编号作为本节点的逻辑ID.显然,在同一个虚拟网格单元内的所有节点逻辑ID是相同的,都等于该虚拟网格单元的逻辑ID.如图 1 中ID为 4578 的网格单元代表基站BS1 以相邻功率等级 4,5 广播形成的环 45,BS2 以相邻功率等级 7,8 广播所形成的环 78 的交叉区域.在基于自由空间模型 $E=c \cdot d^2$ 的假设下,调节基站功率等级以 τ^2 倍递增,可以得到均匀分布的虚拟网格单元(证明见第 2.3 节).

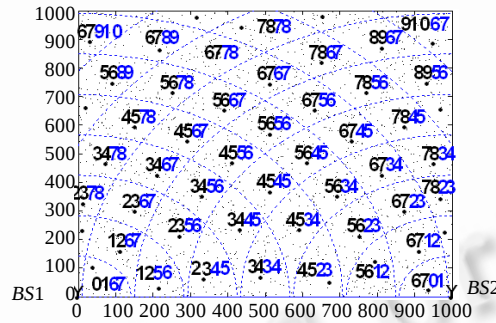


Fig.1 Virtual grid

图 1 虚拟网格

虚拟网格单元形成以后,每个网格单元中的所有节点形成一个簇,并选择一个簇头.簇头负责本区域内节点信息的收集.同时,所有簇头节点形成一个上层网络,负责以多跳方式向基站转发各个簇头的数据.本文研究各个簇头节点(以下简称节点)如何形成高可靠性的网络架构,底层数据的收集、簇头的选择方法不在本文描述范围之内,详见其他文献.

2.2 通信模型及半径的设定

设节点通信半径固定,且覆盖其邻居节点,考虑最坏情况,如图 2 所示,节点通信半径 d 满足:

$$2\sqrt{r^2 + r^2} \leq d \text{ 或者 } d \geq 2\sqrt{2}r \quad (1)$$

其中, r 为虚拟网格的边长.设每个基站以 τ 个功率等级广播信息将目标区域划分为 γ 个虚拟网格,则

$$\gamma \approx \frac{1}{2} \cdot \tau \cdot \frac{\tau}{2} \cdot 2 = \frac{\tau^2}{2} \quad (2)$$

显然,每个网格的边长为

$$r = \frac{\sqrt{2}M}{\tau} \quad (3)$$

由公式(1)~公式(3),节点通信半径固定为

$$d = 2\sqrt{2}r = \frac{4M}{\tau} \quad (4)$$

通信模型采用文献[11]所给出的自由空间模型,忽略节点接收、处理数据包的能耗,则节点 j 向节点 $j+1$ 的单次通信消耗表示为

$$E(j, j+1) = c \cdot d_{j,j+1}^\alpha = c \cdot d^\alpha = c \left(\frac{4M}{\tau} \right)^\alpha \quad (5)$$

其中, $d_{j,j+1}$ 为节点 j 和 $j+1$ 之间的距离, α 为常数,且 $2 < \alpha < 4$,在本模型中取 $\alpha=2$.

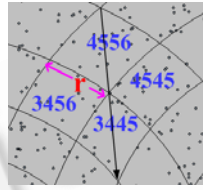


Fig.2 Communicationradius of CH

图 2 簇头通信半径

2.3 相关定义

定义 1. 节点 i 以及 i 所在的虚拟网格单元的逻辑ID表示为 (x_i, x_i+1, y_i, y_i+1) , 其中, (x_i, x_i+1) 以及 (y_i, y_i+1) 分别表示基站 $BS1$ 和 $BS2$ 的相邻功率广播等级.

定义 2. 节点 $i(x_i, x_i+1, y_i, y_i+1)$ 的近 $BS1$ 侧的左、中、右 3 个邻居节点构成其下一跳邻居节点集: $\psi_{BS1} = \{n_L(x_i-1, x_i, y_i+1, y_i+2), n_M(x_i-1, x_i, y_i, y_i+1), n_R(x_i-1, x_i, y_i-1, y_i)\}$, 近 $BS2$ 侧的下一跳邻居节点集为 $\psi_{BS2} = \{(x_i+1, x_i+2, y_i-1, y_i), (x_i, x_i+1, y_i-1, y_i), (x_i-1, x_i, y_i-1, y_i)\}$.

比如,节点 i 的逻辑 ID 为 5667, 则其近 $BS1$ 侧邻居节点有 3 个, 分别为 4578, 4567, 4556, 而 4556, 5656, 6756 为其近 $BS2$ 侧的邻居节点, 如图 1 所示.

定义 3. 链路负荷为从源到 sink 节点的多跳路径上成功传输一个数据包(忽略节点接收、处理数据包的能耗), 每一跳所需消耗能量的累积之和.

命题 1. 在自由空间模型 $E=c \cdot d^2$ 假设下, 基站广播的功率等级为 $1 \sim \tau$, 为得到均匀分布的覆盖半径, 基站的广播功率以第一级广播功率的 τ^2 倍递增.

证明: 设基站以功率等级 $1, 2, \dots, \tau$ 广播信息, 对应覆盖半径分别为 $R, 2R, \dots, \tau R$ 的均匀分布区域, 采用自由空间模型 $E=c \cdot d^2$, 则基站的广播功率分别为 $E_1=cR^2, E_2=c(2R)^2=2^2E_1, E_3=c(3R)^2=3^2E_1$. 当 τ 级能量广播时, $E_\tau=c(\tau R)^2=\tau^2E_1$, 即基站的广播功率为第 1 级广播功率的 τ^2 倍递增. $\square$

命题 2. 设节点通信的下一跳节点总是为其近基站侧的某邻居节点, 对于源节点 $S(x_s, x_s+1, y_s, y_s+1)$, 如果节点逻辑ID的第 2 位小于第 4 位, 即 $(x_s+1) < (y_s+1)$, 则在同等通信条件下(链路丢包率、节点失效率等相同), 数据以 $BS1$ 为汇聚节点(sink)的链路负荷较以 $BS2$ 为汇聚节点的链路负荷低, 即 $\Phi_{BS1} < \Phi_{BS2}$; 反之, $\Phi_{BS1} > \Phi_{BS2}$, 即以 $BS2$ 为目的节点链路负荷更低. 如果 $(x_s+1) = (y_s+1)$, 则上述两种情况链路负荷相当: $\Phi_{BS1} = \Phi_{BS2}$.

证明: 由定义 3, 在自由空间模型假设下, 源节点向汇聚节点发送数据包的链路负荷 Φ 为 $\Phi = E \times \text{Num} \times \text{hop}$, 其中, E 为节点单次通信能耗, Num 为单跳通信(重传)次数, hop 为源节点到汇聚节点的总跳数. 由于节点通信的下一跳节点总是为其近基站侧的某邻居节点, 因此, 基于 $BS1, BS2$ 的路由总跳数分别为节点所在区域ID的第 2 位 (x_s+1) 和第 4 位 (y_s+1) , 即当 $(x_s+1) < (y_s+1)$ 时, 源节点到基站的路由总跳数 $\text{Hop}_{BS1} < \text{Hop}_{BS2}$. 在同等通信条件下(链路丢包率、节点失效率等相同), 单次通信能耗 E 、单跳通信重传次数 Num 相等, 因此, $\Phi_{BS1} < \Phi_{BS2}$; 同理, 当 $(x_s+1) > (y_s+1)$

时, $\Phi_{BS1} > \Phi_{BS2}$, 而当 $(x_s+1)=(y_s+1)$ 时, 以任意基站为汇聚节点链路负荷相当. $\square$

3 路由分析

本文提出了一种基于虚拟网格单元的高可靠性路由算法(grid-based high reliability routing, 简称 GHRR), 解决了各个簇头节点如何形成高可靠性的上层数据传输网络的问题.

3.1 算法描述

本算法以文献[10]所描述的 GRAB 算法思想为基础, 先建立每个节点的梯度, 然后数据通过以梯度递减方向的多个路径向 Sink 节点发送.

3.1.1 梯度的建立

如前所述, 基站通过离散功率等级的方式建立虚拟网格单元, 每个单元形成一个簇并选择一个簇头节点, 簇头与簇内所有成员具有相同的 4 位逻辑ID. 对任意簇头节点 $i(x_i, x_i+1, y_i, y_i+1)$, 当其逻辑ID第 2 位小于第 4 位, 即 $(x_i+1) < (y_i+1)$ 时, 其梯度为每个节点逻辑ID前两位的值; 而当 $(x_i+1) > (y_i+1)$ 时, 梯度为其后两位的值; 当 $(x_i+1) = (y_i+1)$ 时, 以等概率取节点逻辑ID前两位或后两位为梯度. 数据总是沿着梯度递减的方向传递, 而在梯度增大、相同方向上都没有数据传递, 因此避免了路由环的出现, 保证了数据向特定基站传送.

3.1.2 路由算法

为了保证数据传输的鲁棒性, 不以单路径或者不相交多路径方式传递数据, 而是以梯度为基础, 根据节点的通信覆盖半径建立从源到基站的信息传送带, 源节点发送的数据通过第 1 跳节点转发进入信息传送带, 传送带的宽度为参与数据转发的每一跳节点数量. 在本算法中, 带宽固定为 3, 每个节点在传送数据时自动在包中绑定下一跳节点的 ID 号, 只有 ID 号相匹配的节点才能接收该数据包, 使数据包朝特定方向传递. 下一跳节点 ID 的设定方法为:

1) 源节点的下一跳节点. 设源节点的ID为 $S(x_s, x_s+1, y_s, y_s+1)$, 首先根据命题 2 选择目的基站. 假定 $(x_s+1) < (y_s+1)$, 则选定 $BS1$ 作为目的基站, 梯度为节点ID的前两位(否则为后两位), S 的下一跳节点集 ψ_s 为 S 近 $BS1$ 侧的 3 个邻居节点: $\psi_s = \{n_{s,L}(x_s-1, x_s, y_s+1, y_s+2), n_{s,M}(x_s-1, x_s, y_s, y_s+1), n_{s,R}(x_s-1, x_s, y_s-1, y_s)\}$, 它们是信息传送带的起点.

2) 信息传送带内节点的下一跳节点. 为保证数据沿梯度递减方向传递, 当前节点ID前两位分别递减 1 作为其下一跳节点ID的前两位, 而下一跳节点ID后两位随节点在带内的位置的不同而不同. 由于节点通信覆盖半径固定, 一个区域的簇头节点只能与其邻居区域的簇头节点通信, 而信息传送带的宽度限定为 3, 因此, 位于信息传送带中间的节点有 3 个下一跳节点, 而处于带边沿的节点只能与两个下一跳节点通信, 如图 3 所示. 设第 i 跳的 3 个节点分别为 $\psi_i = \{n_{i,L}(x_i, x_i+1, y_i+1, y_i+2), n_{i,M}(x_i, x_i+1, y_i, y_i+1), n_{i,R}(x_i, x_i+1, y_i-1, y_i)\}$, 则信息传送带的第 $i+1$ 跳节点集为 $\psi_{i+1} = \{n_{i+1,L}(x_i-1, x_i, y_i+1, y_i+2), n_{i+1,M}(x_i-1, x_i, y_i, y_i+1), n_{i+1,R}(x_i-1, x_i, y_i-1, y_i)\}$. 其中, 信息带左边沿节点 $n_{i,L}$ 的第 $i+1$ 跳节点分别为 $n_{i+1,L}, n_{i+1,M}$, 信息带右边沿节点 $n_{i,R}$ 的两个第 $i+1$ 跳节点为 $n_{i+1,M}, n_{i+1,R}$. 而中间节点 $n_{i,M}$ 的 3 个下一跳节点分别为 $n_{i+1,L}, n_{i+1,M}, n_{i+1,R}$. 可见, 并不是所有 3 个下一跳节点都能收到前一跳的所有 3 个节点的广播的信息. 当选定了下一跳节点后, 信息传送带朝基站方向延伸一跳, 如果延伸到梯度值为“01”的节点, 则说明其下一跳即为目的基站.

在整个数据传递过程中, 信息传送带不用预先建立, 而是在数据传送的同时, 根据节点局部信息自主建立, 具有分布式的特征. 不同的源节点建立的信息带不同, 且一旦信息传输完毕, 信息带即被丢弃. 节点维护一个缓冲区存放已经转发过的数据包, 如果节点收到来自不同上游节点的相同数据包, 则从队列中删除. 为减少冲突, 节点转发数据前等待一个随机时间, 避免和邻居节点同时发送数据而引起冲突.

如图 3 所示, 信息传送带可能延伸到目标区域之外. 为避免这种情况的发生, 当传送带碰到网格单元位于目标区域边界时反弹一个单元格, 使下一跳节点集的ID后两位分别递减 1, 即该跳节点的下一跳节点集 ψ_{i+1} 向右平移一个单元格, 变为 $\psi_{i+1} = \{n_{i+1,L}(x_i-1, x_i, y_i, y_i+1), n_{i+1,M}(x_i-1, x_i, y_i-1, y_i), n_{i+1,R}(x_i-1, x_i, y_i-2, y_i-1)\}$, 相应地, 左边沿节点 $n_{i,L}$ 的第 $i+1$ 跳节点为 $n_{i+1,L}$, 中间节点 $n_{i,M}$ 的下一跳节点变为 2 个: $n_{i+1,L}, n_{i+1,M}$, 而带右边沿节点 $n_{i,R}$ 有 3 个第 $i+1$ 跳节点: $n_{i+1,L}, n_{i+1,M}, n_{i+1,R}$. 此后, 下一跳节点集又恢复为步骤 2) 所确定的节点集.

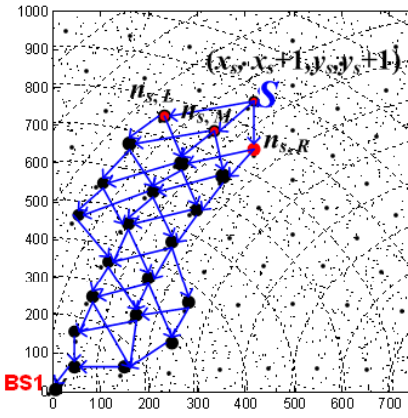


Fig.3 GHRR high reliability routing

图3 GHRR 高可靠性路由

略,如:簇头节点多次发送探测信息,或者簇内每个成员节点都发送一条探测消息,并将收到的探测消息发送至簇头节点,由簇头节点根据上述方法进行判断,从而提高探测准确度。

对于节点移动的情况,网络拓扑不断发生变化,在 GRAB 算法中,Sink 节点需要根据特定参数(如通信成功率等)的变化情况多次重建节点到基站的通信代价(梯度),此过程能耗较大.而在本算法中,由于每一跳节点是各个区域的簇头节点,无论节点如何移动,只要任何时候每一个区域有 1 个簇头节点,则数据通信将按既定方式进行,底层节点移动导致的网络拓扑变化对算法影响较小,这不仅提高了数据传递的鲁棒性,更重要的是,系统路由能耗不会随着节点的移动而额外增加。

3.2 性能分析

3.2.1 可靠性

设节点通信链路丢包率为 e ,不考虑节点本身的实效情况,并定义 $P(i,j)$ 为第 i 个节点发送、下一跳第 j 个节点正确接收的概率,其中, $i,j=\{1,2,3,12,13,23,123\}$.例如, $P(12,23)$ 表示第 1 个和第 2 个节点发送数据包而下一跳第 2 个和第 3 个节点接收到,其余类推.同理,定义 $F(i,j)$ 为第 0 跳第 i 个节点发送、第 $j-1$ 跳至少 1 个成功接收而第 j 跳没有节点成功接收,即接收失败的概率,并假定信息传送带第 0 跳的所有 3 个节点都能可靠地收到源节点 S 发送的数据包并向第 1 跳节点转发,则第 N 跳转发失败的概率为

$$P_{fail}^{GHRR}(N) = \sum_{j=1}^N F(123, j) \quad (6)$$

得到如下递推关系式:

$$F(i,1)=p(i,0) \quad (7)$$

$$F(i,N) = \sum_{j=1,2,3,12,13,23,123} P(i,j)F(j,N-1) \quad (8)$$

其中, $i=\{0,1,2,3,12,13,23,123\}$, 且当 $i=1$ 时, $j \neq 3,23,13,123$; 当 $i=3$ 时, $j \neq 1,12,13,123$.

$$\begin{cases} p(0,0)=1 \\ p(0,j)=0, j \neq 0 \end{cases} \quad (9)$$

$$p(i,0) = \begin{cases} e^2, & i=1,3 \\ e^3, & i=2 \\ e^2 \cdot e^2 \cdot e, & i=12,23 \\ e \cdot e^2 \cdot e, & i=13 \\ e^2 \cdot e^3 \cdot e^2, & i=123 \end{cases} \quad (10)$$

$$p(1, j) = \begin{cases} (1-e)e, & j=1,2 \\ (1-e)^2, & j=12 \end{cases} \quad (11)$$

$$p(2, j) = \begin{cases} (1-e).e.e, & j=1,2,3 \\ (1-e)^2.e, & j=12,23,13 \\ (1-e)^3, & j=123 \end{cases} \quad (12)$$

$$p(3, j) = \begin{cases} (1-e)e, & j=2,3 \\ (1-e)^2, & j=23 \end{cases} \quad (13)$$

$$p(12, j) = \begin{cases} (1-e^2).e^2.e, & j=1,2 \\ (1-e).e^2.e^2, & j=3 \\ (1-e^2)^2.e, & j=12 \\ (1-e^2).(1-e).e^2, & j=23,13 \\ (1-e^2)^2.(1-e), & j=123 \end{cases} \quad (14)$$

$$p(13, j) = \begin{cases} (1-e).e^2.e, & j=1,3 \\ (1-e^2).e.e, & j=2 \\ (1-e)(1-e^2).e, & j=12,23 \\ (1-e)^2.e^2, & j=13 \\ (1-e^2).(1-e)^2, & j=123 \end{cases} \quad (15)$$

$$p(23, j) = \begin{cases} (1-e).e^2.e^2, & j=1 \\ (1-e^2).e^2.e, & j=2,3 \\ (1-e)(1-e^2).e^2, & j=12,13 \\ (1-e^2)^2.e, & j=23 \\ (1-e^2)^2.(1-e), & j=123 \end{cases} \quad (16)$$

$$p(123, j) = \begin{cases} (1-e^2).e^3.e^2, & j=1,3 \\ (1-e^3).e^2.e^2, & j=2 \\ (1-e^2)(1-e^3).e^2, & j=12,23 \\ (1-e^2)^2.e^3, & j=13 \\ (1-e^2)^2.(1-e^3), & j=123 \end{cases} \quad (17)$$

图 4 比较了 GHRR、单播、多播路由模式下传输失败率随跳数的变化情况.可见,对于单路径路由,15 跳以后就有 90%的包丢失,即使通信链路的丢包率 e 很小,路由的整体性能也不能得到明显改善.而在多播路由模式下,当 e 为 0.3 时,数据丢包 90%发生在 90 跳以后;当 e 为更低的 0.2 时,有 20%的数据可以传输超过 200 跳.可见,采用多播模式,路由可靠性可以成倍地提高.图中最下沿的 3 条曲线为本文提出的高可靠性路由 GHRR 的性能曲线,当 e 为 0.3 时,系统在 15 跳时丢包率还不到 5%,有超过 50%的数据包可以可靠传输 200 跳以上;如果 e 为 0.2 这样的更低值,则有超过 90%的数据包可以传输超过 200 跳.显然,其路由可靠性比单播、多播模式有了大幅度的提高.

3.2.2 链路负荷分析

定义 $R^N(i, j)$ 为第 0 跳第 i 个节点发送、第 N 跳共有 j 个节点正确接收数据包的概率,其中, $i=\{1,2,3,12,13,23,123\}$, $j=\{1,2,3\}$, 得到如下递推关系:

$$\begin{cases} R^N(i, 1) = \sum_{i=1,2,3,12,13,23,123} P(i, j) R^{N-1}(j, 1) \\ R^N(i, 2) = \sum_{i=1,2,3,12,13,23,123} P(i, j) R^{N-1}(j, 2) \\ R^N(i, 3) = \sum_{i=1,2,3,12,13,23,123} P(i, j) R^{N-1}(j, 3) \end{cases} \quad (18)$$

其中,

$$\begin{cases} R^1(i,1) = \sum_{s=1,2,3} P(i,s) \\ R^1(i,2) = \sum_{s=12,13,23} P(i,s) \\ R^1(i,3) = P(i,123) \end{cases} \quad (19)$$

则第 0 跳第 i 个节点发送数据包、第 N 跳成功接收并转发数据包的节点数的数学期望为

$$Num(N) = \sum_{t=1}^3 t \times R^1(i,t) \quad (20)$$

节点不采用重传协议,因此 1 个节点只发送 1 个数据包,且端-端重传次数为

$$n^{GHRR} = \frac{1}{1 - P_{fail}^{GHRR}(N)} \quad (21)$$

由公式(5)、公式(20)和公式(21)得到信息传送带端-端的链路负荷为

$$E_{S-D}^{GHRR} = \sum_{j=0}^{N-1} E(j, j+1) \times Num(j) \times n^{GHRR} = \sum_{j=1}^N \sum_{t=1}^3 \frac{16cM^2 t R^j(i,t)}{\tau^2 (1 - P_{fail}^{GHRR}(N))} \quad (22)$$

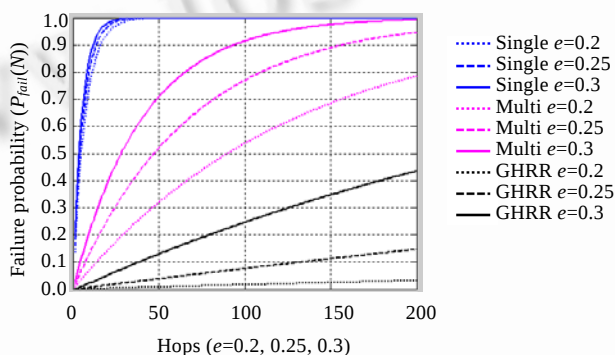


Fig.4 Failure probability for different number of hops and packet lose rate on a link

图 4 失败率随跳数、链路丢包率变化

图 5 为 GHRR、单播、多播、GRAB($m=3$)^[10] 等的链路负荷随跳数的变化关系.当通信链路丢包率 e 很低时,节点通信成功率高,单播、多播路由由每一跳只有 1 个节点发送数据,而 GHRR, GRAB 每一跳都有 3 个节点发送数据,因此 GRAB, GHRR 链路负荷相当,都近似为单播、多播路由负荷的 3 倍.随着链路丢包率 e 的增加,节点成功收到并转发数据包的节点数减少,链路上的数据包相应减少,使得 GHRR, GRAB 的链路负荷呈下降趋势,但 GHRR 具有比 GRAB 更低的链路负荷.当 e 分别达到并超过 0.35, 0.43 以后, GHRR 和 GRAB 的链路负荷又逐步上升,这是由于随着 e 的逐步增加,端-端传输失败率增加(如图 6 所示),为了正确地传输一个数据包,源节点可能需要进行多次重传,数据量增加了.由图 5 可以进一步看出,在 e 低于 0.41 时, GHRR 的链路负荷总是低于 GRAB, 最大可以低于 60% 左右,换句话说, GHRR 只牺牲了较小的能耗,而换取了较高的可靠性.

3.2.3 仿真研究

由以上分析可知,当节点通信链路丢包率低于 0.41 时, GHRR 链路负荷比 GRAB 更低;在丢包率高于 0.41 时, GHRR 链路负荷并不占优势.但就整个系统而言,下面的仿真实验将表明:无论链路丢包率有多大,系统整体能耗 GHRR 总是明显低于 GRAB.

本仿真实验基于 TRUETIME 工具^[12]进行. TRUETIME 是一种基于 MATLAB/SIMULINK 的联合仿真工具,包含计算机模块(true-time kernel)、有线网络模块(true-time network)、无线网络模块(true-time wireless's network)和电池模块(true-time battery),其中,无线网络模块带有 802.15.4(ZigBee)协议,为无线传感器网络的综合仿真研究提供了良好的支持.在以下实验中,数据率均设定为 10k/s,数据包最小为 56bit,衰减指数设定为 2.目标区域为

1000m×1000m的平面区域,基站 1(sink1/BS1)位置坐标为(0,0),基站 2(sink2/BS2)位置坐标为(1000,0),如图 1 所示.两个基站分别以离散功率等级 $1 \sim \tau$ 广播信息,将目标区域划分为一系列逻辑小区域.

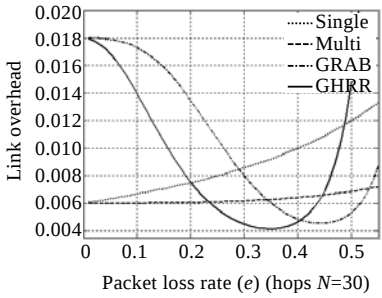


Fig.5 Comparison of link overhead, effect of increasing e for number of hops $N=30$
图 5 链路负荷随 e 的变化比较(跳数 $N=30$)

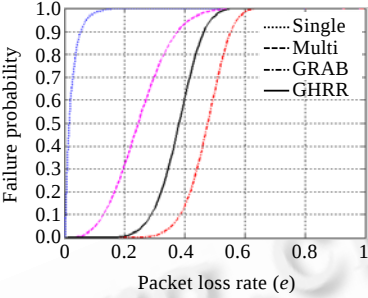


Fig.6 Failure probability of end-to-end for different e
图 6 不同丢包率 e 下的端-端失败率

实验 1.研究链路丢包率 e 对端-端通信成功率的影响.目标区域划分为 88 个虚拟网格单元,节点丢包率从 0~0.6 变化,通信成功率变化曲线如图 7 所示.可以看出,随着 e 的增加,GHRR,GRAB 的通信成功率都逐步下降,但两者相差不大.

实验 2.同样基于 88 个虚拟网格单元研究系统能耗情况.设节点发送功率固定,梯度以节点到基站的跳数标示,并以通信成功率作为触发梯度重构的事件,不考虑节点接收、处理数据包以及节点空闲时的能耗.图 8 为每个节点作为源节点发送一个数据包,GHRR 方式与 GRAB 方式下系统总能耗的变化情况相同.可见,随着 e 的增加,系统总能耗逐步下降,而 GHRR 能耗总是低于 GRAB.这是由于系统能耗不仅包括上传数据的链路负荷,还包括系统重构梯度时所消耗的能量.对于 GRAB,重构梯度时每个节点要转发大量控制包,因此消耗的能量较多;而 GHRR 的重构过程由高性能基站以离散功率等级发送初始化消息实现,节点只接收而不转发数据包,重构梯度这部分能耗基本上可以忽略不计.

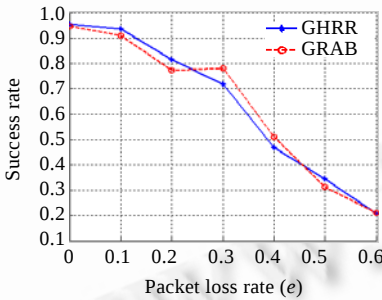


Fig.7 Comparison of success rate of end-to-end for different e
图 7 不同丢包率 e 下的端-端通信成功率比较

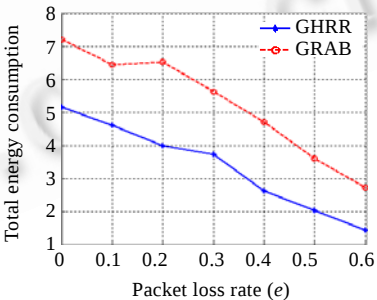


Fig.8 Comparison of total energy consumption for different e
图 8 不同丢包率 e 下的总体能耗比较

另一方面,GRAB 在通过泛洪过程建立梯度时,由于受链路丢包率的影响,节点可能未正确接收到来自邻居节点转发的控制包,因而建立的通信代价梯度并非最恰当的.比如:当某个节点和另一个节点直接通信时,链路跳数最少,此时以跳数建立的梯度最优;但如果直接通信发生错误,梯度控制包未能直接到达该节点,而是通过另一个或几个中间节点中继,则建立的通信代价梯度并不是最优的.如图 9 所示,节点 1 通过 1 跳即可到达 4,但如果此时通信发生错误,则直接导致通信失败,控制包可能经过 2,3 再到达 4,以此建立的节点 4 的通信代价值多出了 2 跳,相应地,在后续的数据传输过程中,数据包将可能多经过两跳,使得通信成本增加,也增加了实验 3 中的

网络延迟.

结合实验 1 及实验 2(图 7、图 8)可以看出,GHRR 达到了更高的能效而链路可靠性并未受到影响,即 GHRR 牺牲了更小的能耗,但换取了高可靠性的数据传输.

实验 3.考察网络平均时间延迟.网络平均时间延迟定义为全网所有源-目的节点对接收数据包和发送数据包之间的平均时间差^[13,14].在本实验中,发送端和接收端分别考虑数量级为 10^5 的网络接入时间和数据接收时间,而不考虑梯度建立过程中发送控制包建立梯度的时间延迟.基站分别以 10,13,15,17,18 个等级的离散功率广播信息,将目标区域划分为 48,88,116,142,165 个虚拟网格单元.如图 10 所示,随着网络规模的增加,时间延迟增加,但GHRR比GRAB时间延迟减少达 22.8%以上,最多可以减少 40.9%,平均减少了 29.3%.显然,如果加上梯度建立过程中的时间延迟,GHRR会比GRAB时间延迟更低,因为GHRR建立梯度不需要节点转发控制包,延迟很小;而GRAB需要各个节点以泛洪+反馈的机制建立路由^[15],延迟较大.

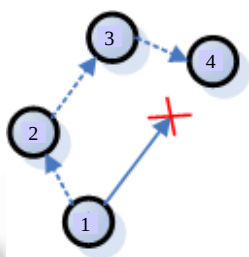


Fig.9 Create gradient of nodes (GRAB)

图 9 节点梯度的建立(GRAB)

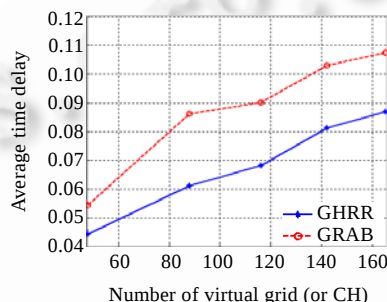


Fig.10 Comparison of time delay for different number of virtual grid (or Cluster Head)

图 10 不同虚拟网格(簇头)数下的时间延迟比较

4 结束语

本文基于基站的分级离散广播,将目标区域初始化为一系列的虚拟网格,在此基础上提出了 GHRR 路由算法.以节点的 ID 编号作为梯度来控制数据传输方向,路由动态建立,而不必采集网络全局信息,也不必维护路由表.同时,数据通过多个下一跳节点形成的信息传送带直达基站,GHRR 在能量的高效性、数据通信的可靠性两个方面作了更好的权衡,在提高数据通信可靠性的前提下减少了系统能耗.

但算法有些方面还需要进一步改善:(1) 节点发射功率恒定.本算法中节点采用恒定功率传输数据,若根据其下一跳的距离远近动态调节发射功率,将有助于在不影响网络最小能耗性能的基础上进一步降低能量开销,从而进一步优化网络的能耗性能;(2) 算法只考虑了节点通信错误,而对于基站的通信错误没有考虑.虚拟网格及节点的逻辑 ID 是在基站广播的数据包都能正确到达的前提下获得的,但在实际应用中,通信错误往往很难避免,下一步我们将在一定基站通信错误率的情况下对算法作出进一步的改善.

References:

- [1] Tan HP, Gabor AF, Seah WKG, Lee PWQ. Performance analysis of data delivery schemes for a multi-sink wireless sensor network. In: Proc. of the 22nd Int'l Conf. on Advanced Information Networking and Applications. 2008. 418-425. http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=4482737
- [2] Cipollone E, Cuomo F, Della Luna S, Monaco U, Vacirca F. Topology characterization and performance analysis of IEEE 802.15.4 multi-sink wireless sensor network. In: Proc. of the 6th Annual Mediterranean Ad Hoc Networking WorkShop. 2007. 196-203. http://infocom.uniroma1.it/~franci/Pubb_pdf/CUOMO_MedHocNet07.pdf
- [3] Kim H, Seok Y, Choi N, Choi Y, Kwon T. Optimal multi-sink positioning and energy-efficient routing in wireless sensor networks. Lecture Notes in Computer Science (LNCS 3391), 2005. 264-274.

- [4] Tian D, Georganas ND. Energy efficient routing with guaranteed delivery in wireless sensor networks. In: Proc. of the IEEE Wireless Communications and Networking Conf. 2003 (WCNC 2003), Vol.3. Institute of Electrical and Electronics Engineers. New Orleans: IEEE Press, 2003.1923–1929. http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=1200681
- [5] Poor RD. Gradient routing in ad hoc networks. 2000. <http://www.media.mit.edu/pia/Research/ESP/texts/pooriepaper.pdf>
- [6] Stann F, Heidemann J. RMST: Reliable data transport in sensor networks. In: Proc. of the Int'l Workshop on Sensor Net Protocols and Applications. 2003. 102–112. http://isi.edu/divisions/div7/publication_files/rmst_reliable.pdf
- [7] Deb B, Bhatnagar S, Nath B. Information assurance in sensor networks. In: Proc. of the 2nd ACM Int'l Conf. on Wireless Sensor Networks and Applications (WSNA 2003). New York: ACM Press, 2003. 160–168. [http://166.111.120.94/acm/Files/20090513114622031556\[@211.83.109.140\]@page.pdf](http://166.111.120.94/acm/Files/20090513114622031556[@211.83.109.140]@page.pdf)
- [8] Deb B, Bhatnagar S, Nath B. ReInForm: Reliable information forwarding using multiple paths in sensor networks. In: Proc. of the 28th Annual IEEE Conf. on Local Computer Networks (LCN 2003). 2003. 406–415. http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=1243166
- [9] Banerjee S, Misra A. Minimum energy paths for reliable communication in multi-hop wireless networks. In: Proc. of the Annual Workshop on Mobile and Ad Hoc Networking and Computing (MobiHoc 2002). Lausanne, 2002. 146–156. <http://166.111.120.94/acm/ContentLoader.nsp?view=%2F520000%2F513818%2Fp146-banerjee.pdf>
- [10] Fan Y, Gary Z, Songwu L, Lixia Z. Gradient broadcast: A robust data delivery protocol for large scale sensor networks. Wireless Networks, 2005,11(3):285–298.
- [11] Heinzelman WR, Chandrakasan A, Balakrishnan H. Energy-Efficient communication protocol for wireless microsensor networks. In: Proc. of the Hawaii Int'l Conf. on System Sciences. 2000. 10–19. http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=926982
- [12] Ohlin M, Henriksson D, Cervin A. True-Time 1.5—Reference Manual, Lund Institute of Technology. 2007.
- [13] Fan Y, Haiyun L, Jerry C, Songwu L, Lixia Z. A two-tier data dissemination model for large-scale wireless sensor networks. In: Proc. of the 8th Annual Int'l Conf. on Mobile Computing and Networking. 2002. 148–159. <http://portal.acm.org/citation.cfm?id=570664>
- [14] Al Eimon AR, Hong CS, Suda T. EAREC: Energy aware routing with efficient clustering for sensor networks. In: Proc. of the IEEE Consumer Communications and Networking Conf. 2006. 330–335. http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=1593041
- [15] Wu ZD, Li SP. A parallel multi-path algorithm for adaptive routing in wireless sensor networks. Acta Electronica Sinica, 2007,35(9):1696–1701 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献:

- [15] 吴震东,李善平.无线传感器网络自适应并发多路由算法.电子学报,2007,35(9):1696–1701.



闫斌(1974—),男,四川通江人,博士生,主要研究领域为无线传感器网络路由,数据融合。



郎方年(1974—),男,博士,讲师,CCF 会员,主要研究领域为数字图像处理,生物特征识别,人工智能。



周小佳(1969—),男,博士,副教授,主要研究领域为无线传感器网络,电力系统自动化。



李本亮(1977—),男,博士生,主要研究领域为无线网络时间同步,分布式测试。



王厚军(1961—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究领域为电子测试技术与仪器,测试信号处理,无线传感器网络。