

一种基于相交多径网络编码模型的无线传感网多径路由协议

王 璿^{1,2} 杜蔚琪¹ 刘 辉^{1,2} 王 雷^{1,2}

(南京邮电大学宽带无线通信与传感网技术教育部重点实验室 南京 210003)¹

(南京邮电大学江苏省无线通信重点实验室 南京 210003)²

摘 要 将网络编码技术应用到无线传感器网络中以提高网络的传输效率是近年来国内外研究的一大热点,相交多径网络编码模型是一种具有高可靠性的基于网络编码的多径路由模型,而目前将相交多径网络编码模型应用在无线传感网的多径路由协议中的研究并不多。通过使用基于地理位置划分虚拟网格的方法设计了一种相交多径网络编码模型的路由协议 BRGNC(Braided multipath Routing protocol based on Grid with Network Coding)。在路由过程中先根据网格的能量情况、链路质量、节点个数等因素选择下一跳网格,再通过网格内节点状态选择“最优的”转发节点集,从而降低了以往按照相交多径网络编码模型建立无线传感网的多径路由协议的难度。仿真实验结果表明,该协议具备较好的可靠性和能耗均衡性,在网络规模较大、链路状态较差的情况下也能够很好地保证数据的可靠传输。

关键词 无线传感器网络,网络编码,多径路由,虚拟网格,可靠性

中图法分类号 TP393 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2016.11.026

Multipath Routing Protocol Based on Braid-multipath Network Coding Model for Wireless Sensor Networks

WANG Jun^{1,2} DU Wei-qi¹ LIU Hui^{1,2} WANG Lei^{1,2}

(Key Lab of Broadband Wireless Communication and Sensor Network Technology, Ministry of Education,

Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)¹

(Jiangsu Key Lab of Wireless Communication, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)²

Abstract How to use the network coding technology in wireless sensor network to improve the performance of the networks is becoming a hot research area in recent years. Multipath transmission is an effective method to improve the transmission reliability. Among the multipath network coding models, the braid-multipath network coding model is a reliable routing model and is very suitable for large-scale networks. In this paper, we designed a new routing protocol called BRGNC(Braided multipath Routing protocol based on Grid with Network Coding) for large-scale wireless sensor networks. Firstly, we divided the network into virtual grids by using the nodes' location information, and we selected the next-hop grid based on many factors including the nodes' residual energy, link quality and network density. And then we selected the "optimal" nodes as the candidate sets. At the same time, we used network coding technology to improve the transmission reliability. Simulation results show that the BRGNC protocol can greatly improve the reliability of the transmission, extend the lifetime of the network in large-scale sensor networks with the instable link.

Keywords WSN, Network coding, Multipath routing, Virtual grid, Reliability

1 引言

由于无线传感器网络(WSN)节点数目较多且无线链路具有不稳定性,传统的单径传输很难满足网络传输的要求。多径路由协议可在一次路由发现过程中找到多条路径^[1],使数据包在多条路径上并行传输,从而减少路由发现次数,同时利用多条链路的冗余特性来提高传输的可靠性,并降低控制开销与端到端延迟。

网络编码^[2]是由 Ahlswede 等于 2000 年提出的,是通信

研究领域中的重要突破。它改变了传统数据包接收发送的处理方式,在中继节点处可以对接收的数据包进行编码,并按照一定的算法进行重新组合后再发出去。将网络编码运用于无线传感网可以增加网络的吞吐量及可靠性,同时还可以降低能耗,改善网络负载均衡,提高网络的安全性。文献[3]提出了随机线性网络编码概念,并论证了其适用于节点计算能力不强的无线传感器网络;文献[4]提出了一种基于随机线性网络编码的多径传输方法,并论证其可适用于不断变化条件的网络。

到稿日期:2015-10-20 返修日期:2016-03-14 本文受国家自然科学基金(61401234),江苏高校优势学科工程资助项目,江苏省政府留学奖学金资助。

王 璿(1975—),女,博士,副教授,主要研究方向为下一代网络技术、传感器网络,E-mail:wang_jun@njupt.edu.cn;杜蔚琪(1988—),男,硕士,主要研究方向为传感器网络路由技术;刘 辉(1990—),男,硕士,主要研究方向为网络编码技术;王 雷(1990—),男,硕士,主要研究方向为基于网络编码的数据收集技术。

按照多径路径上节点是否有重合可以将多径路由分为两类:不相交多径路由^[16]和相交多径路由。不相交多径路由协议中的节点只在一条路径中出现,而相交多径中的有些节点可以存在于不同的路径中。文献[5]对相交多径和不相交多径这种基于编码的多径路由模型进行了分析,得出了相交多径编码模型性能优于不相交多径编码模型,且网络范围越大性能越优的结论;目前应用较多的多径路由^[6-8]大多是不相交多径,如文献[6]提出了一种基于跳数优先的 AOMDV 协议;文献[7]将 AOMDV 与网络编码进行结合提出了 NCAOMDV 协议;文献[8]为了减少在无线传感网络中数据的重传次数,提高无线传感网的数据传输效率和服务质量,提出了一种网络编码的广播算法(WMBR);文献[9]主要讨论了基于网络编码的多路径路由(NCMR)的性能;文献[10-12]均是将网络编码技术应用在无线网络的路由技术上。本文所提算法与文献[16]所提算法相似,在文献[16]中,路由建立的过程是通过计算跳数(即最小化跳数)确定路径的下一跳节点,形成源节点到 sink 节点的多条路径。在网络规模较大的情况下,计算端到端的跳数开销较大,也较为困难。同时文献[16]的编码复杂度和实现复杂度较高,应用场景受限。为了利于在无线传感器网络中实现相交多径网络编码,本文协议采用了以下策略:首先对通过节点的地理位置进行虚拟网格的划分,通过网格中设置的管理节点先建立网格间的路由,然后再在网格中根据节点状态选择转发节点。

相交多径网络编码模型虽然被证明优于不相交多径编码模型,但要运用在无线传感器网络中尚有难度,因为要运用该模型必须保证节点处于上下跳节点的传输范围内,而无线传感器节点的传播范围又是有限的,所以目前基于相交多径网络编码模型建立的无线传感网的多径路由协议较少。本文根据相交多径网络编码模型的这一使用难点,运用了基于地理位置划分虚拟网格^[13]的方法,提出了一种满足上述条件并且完全基于相交多径网络编码模型的新型路由协议 BRGNC (Braided multipath Routing protocol based on Grid with Network Coding),该协议可以在大规模网络且链路质量较差的传感器网络中提供较高的传输可靠性和能量效率。

2 系统网络模型

2.1 网络假设

针对协议运行的环境,做出以下几点假设:1)传感器网络是同构的网络,即网络中所有节点的能力相同;2)网络覆盖区域为正方形,sink 节点位于正方形的顶点静止不动,且 sink 拥有高运算能力和无穷大的能量(因为它可以充电);3)节点可以通过携带的 GPS 或者采取定位技术获得自己的地理位置信息,位置信息不一定是全局,可以是与基站的相对位置;4)无线传感器网络中的每个节点都有统一编号,且都获知 sink 的地理位置。

2.2 虚拟网格的形成

假设网络拓扑为 $M \times M$ 的正方形,sink 节点位于正方形的一个顶点,如图 1 所示。坐标轴建立的方法是以 sink 为原点,建立横纵坐标,以 L 作为网格边长。每个节点 n_i 根据式(1)以及自己位置计算 (x_{n_i}, y_{n_i}) 作为网格的编号:

$$(X_{n_i}, Y_{n_i}) = \left(\left\lceil \frac{x_{n_i}}{L} \right\rceil, \left\lceil \frac{y_{n_i}}{L} \right\rceil \right) \quad (1)$$

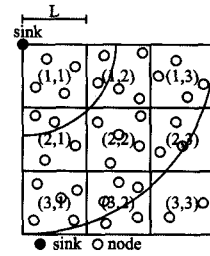


图 1 网络的虚拟网格划分

2.3 网格半径

网格的大小需要根据无线信道的传输衰减模型确定。无线信号传输衰减分段模型^[14]在发射功率一定的情况下,按照链路质量变化可以将距离分成 3 段:有效区、过渡区及空白区。有效区的通信链路情况最好,可以近似认为是可靠通信;距离比较远时的链路通信质量较差,称为空白区;而介于两者之间,链路连接质量不稳定的区域称为过渡区。根据这个模型,可以根据节点的过渡区域大小确定网格大小,如图 1 所示,小圆弧内是有效区,两个圆弧中间是过渡区。如图 2 所示,假设 d 为过渡区半径,网格边长 L 的计算如式(2)所示,不过这个数值一般会取整。

$$L = \frac{\sqrt{2}}{4} d \quad (2)$$

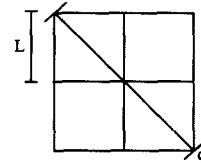


图 2 网格半径模型

2.4 定义及命题说明

(1)传感器节点在 d 距离上每发送 l bit 数据产生的能量消耗公式如式(3)^[13]所示:

$$E_{SD} = lE_{dec} + l\xi_{fs}d^2 \quad (3)$$

其中, ξ_{fs} 为衰减系数。传感器节点通过无线电接收 l bit 数据所消耗的能量如式(4)所示:

$$E_{RX} = E_{dec} \cdot l \quad (4)$$

节点一次传输所消耗能量 $E_{SR} = E_{SD} + E_{RX}$,在通信半径相同的情况下每次传输所消耗的能量相同, E_{SR} , E_{SD} , E_{RX} 皆为固定值。

(2)数据包接收概率 PRR(Packet Reception Ratio):对于任意节点 a 向节点 b 发送数据, b 成功接收到数据包的概率 PRR,记为节点 a 与节点 b 的 PRR_m ;在本文中定义邻接 PRR 是节点 a 与邻接网格 B 内所有节点间 PRR 的平均值,记为节点 a 与网格 B 的 PRR_{ng} ;网格 PRR 则是网格 A 内所有节点与邻接网格 B 之间 PRR_{ng} 的平均值,记为网格 A 与网格 B 的 PRR_{gg} 。

(3)管理节点:每个网格中有一个管理节点,用于维护网格以及邻接网格的一些基本信息。管理节点可以参与数据传输,但是网格中只要存在可选的节点,就不会选择管理节点来转发数据。

(4)邻接网格:网格的潜在下一跳网格,因为 sink 位置已固定,如图 3 所示,所以对于网格 (X, Y) 而言,其邻接网格为 $(X-1, Y-1)$, $(X, Y-1)$, $(X-1, Y)$, 分别对应邻接区域 1, 2 和 3。

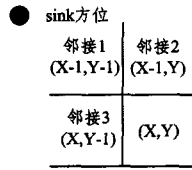


图3 邻接网格示意图

(5) 网格梯度: 该网格到 sink 的最短跳数, 对于网格 (X,

Y) 而言, 梯度计算如式(5)所示:

$$S = \max(X-1, Y-1, 1) \quad (5)$$

(6) 邻接网格信息表: 信息表中包含了邻接网格的网格 ID、管理节点 ID、网格间的 PRR_{gg} 、可选节点信息。可选节点是指节点能量高于能量阈值 $E_{threshold}$ 的节点, $E_{threshold}$ 的取值按照 3.4 节的式(8)计算。

对于网格 (X, Y), 其保存的网格信息如表 1 所列。

表1 邻接网格信息表

邻接区域	网格 ID	管理节点 ID	网格 PRR_{gg}	可选节点信息		
1	(X-1, Y-1)	node1	PRR_{gg1}	节点 ID	节点剩余能量	节点与邻接网格间 PRR_{ng}
				node1	node1_e	node1_ PRR_{ng}
				***	***	***
2	(X-1, Y)	node2	PRR_{gg2}	节点 ID	节点剩余能量	节点与邻接网格间 PRR_{ng}
				node2	node2_e	node2_ PRR_{ng}
				***	***	***
3	(X, Y-1)	node3	PRR_{gg3}	节点 ID	节点剩余能量	节点与邻接网格间 PRR_{ng}
				node3	node3_e	node3_ PRR_{ng}
				***	***	***

3 BRGNC 路由协议

BRGNC 协议的核心思想是通过节点的地理位置进行虚拟网格的划分, 建立网格间的路由, 最后再采用随机线性编码进行数据传输。

3.1 网络初始化

步骤1 初始化网格

sink 节点首先广播初始化数据包, 节点收到 sink 节点广播的初始化消息后可获知网络大小及网格边长 L , 再利用节点自身位置信息可完成对网络覆盖区域的虚拟网格划分, 并根据式(1)计算出自身所在网格的逻辑 ID。

步骤2 网格选举管理节点

节点在知晓自身网格 ID 之后, 会随机等待一个时间段 τ ($\tau < t$), 然后向周围发送竞争消息包, 数据包中包含网格 ID 以及节点 ID。如果在发送竞争包之前收到了别的节点发来的竞争包, 首先会判断网格 ID 是否与自身相同, 不相同则丢弃; 相同则选择竞争包信息中的节点 ID 最小的作为管理节点, 并且放弃发送竞争包。等到 t 时间之后, 每个节点会向管理节点发送确认消息。在各个网格的管理节点选出之后, 邻接网格之间还会互通信息告诉对方本网格管理节点的 ID。

步骤3 获取可选节点信息

管理节点选举出来之后会向本网格内的所有节点发送询问消息, 节点在收到消息之后会将自己的剩余能量值发回管理节点。由于初始时每个节点能量均是满状态, 因此管理节点会将所有节点计入可选节点集。除了统计本网格的可选节点外, 管理节点也会向其邻接网格查询可选节点的信息, 包括节点 ID 以及剩余能量值。

步骤4 PRR 探查

探查方法是管理节点为可选节点分配发送时隙, 每个可选节点在自身时隙内向邻接网格发送探查数据包, 探查包中包含节点 ID、源网格 ID、源网格管理节点 ID 以及目标网格 ID。

目标邻接网格的可选节点会接收这些探查包, 分别统计收到来自不同源网格的探查包的数量, 最后将这些数量信息分别发回各自源网格的管理节点。

管理节点在获得邻接网格的管理节点 ID、邻接网格可选节点 ID 及能量、 PRR_{ng} 以及 PRR_{gg} 等信息之后, 便可完成邻接网格信息表的建立。

3.2 路由建立过程

网络初始化后, 当目标区域有事件发生, 源节点产生数据需要向 sink 传输时, 需要同时建立固定数目的相交路径, 其工作流程如下。

步骤1 源节点计算自身的网格梯度值是否为 1, 如果为 1, 则代表可以直接与 sink 通信, 不需要建立路由; 如果梯度不为 1, 说明需要经过中间节点转发, 此时源节点向本网格的管理节点发送路径请求消息。

步骤2 管理节点收到路径请求消息之后, 读取所存储的网格信息表, 判断是否存在可选节点数目大于路径数目的邻接网格, 如果不存在这样的网格则多径建立失败, 告知源节点选用单径方式建立路由; 如果存在这样的网格则进入步骤 3。

步骤3 管理节点计算所有满足条件网格的权重值 $cost$, 选择 $cost$ 值最大的网格作为下一跳网格, 第 i 个邻接网格 $cost_i$ 的计算考虑了网格能量、节点个数、网格间链路状况等因素, 如式(6)所示:

$$cost_i = \frac{E_i}{N_i \cdot e} \cdot PRR_{gg(i)} \cdot [S_0 - S_i + 1] \quad (6)$$

$PRR_{gg(i)}$ 代表本网格与邻接网格 i 之间的 PRR_{gg} , N_i 代表邻接网格 i 的可选节点个数, E_i 代表邻接网格 i 的可选节点能量总和, e 代表节点初始能量, S_i 与 S_0 分别代表邻接网格 i 以及本网格的梯度值, 其中 $i=1, 2, 3$ 。

步骤4 选择出下一跳网格之后, 管理节点会在下一跳网格中选出转发节点集, 转发节点集的选择标准可以根据实际应用需求进行调整, 如果该应用需要高可靠性则选择节点邻接网格中 PRR_{ng} 较大的节点作为转发节点集; 如果考虑能

量均衡,则选择能量值较大的节点作为转发节点集(在相交多径网络编码模型中可靠性往往能够得到保证,所以一般会优先考虑能耗因素,本文是按节点能量优先原则选择下一跳节点集)。下一跳节点集的节点个数与多径路径数目相同,然后管理节点会产生路径选择消息 Path_select 向下一跳网络的管理节点发送,消息格式如表 2 所列。

表 2 路径选择消息

Type_ID	Src_NID	Now_GID	NH_GID	Hop	Code_m	NH_NID
---------	---------	---------	--------	-----	--------	--------

表 2 中,Type_ID 为数据包类型;Src_NID 为源节点 ID;Now_GID 为当前所处网格 ID,源端即为源网格 ID;NH_GID 为将要发送的下一跳网格 ID;Hop 为当前网格在路径中的跳数,源网格处置 1,每经过一跳加 1;Code_m 为编码秩数;NH_NID 为选出的下一跳转发节点 ID。

步骤 5 下一跳的管理节点收到路径选择消息之后,会根据路径选择消息告知本网格的相应转发节点进入转发状态,待收到转发节点的确认消息之后,会向上一跳网络的转发节点发送 OK 消息,使之进入数据发送状态。与此同时该管理节点会判断自己的梯度是否为 1,如果梯度为 1,代表路由结束,管理节点会直接将 sink 作为下一跳;如果梯度不为 1,发送路径请求消息并且重复步骤 2-4。

在路径建立过程中,管理节点起了非常重要的作用,其工作流程如图 4 所示。

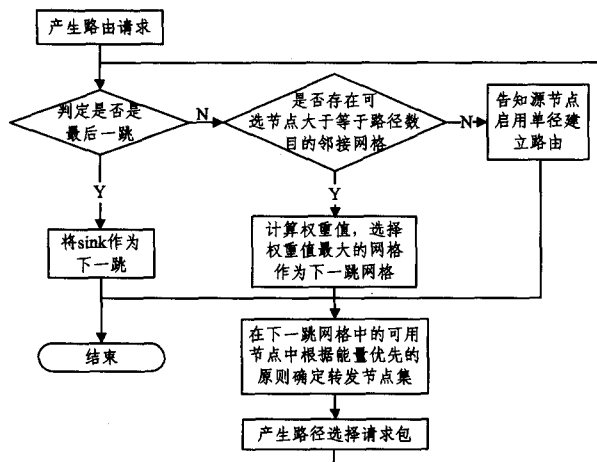


图 4 管理节点在路径建立过程中的运行流程

3.3 数据传输过程

管理节点在选择出下一跳的转发节点后会告知本网格的转发节点。当转发节点在收到下一跳的管理节点发送的 OK 消息后,即进入了数据传输状态。

本文采用随机线性编码技术,源节点首先将原始数据包分成 m 组,文献[16,18]中 m 的取值范围均采用 3~5 之间的数值,但均未理论分析 m 的最优值,文献[16]中 $m=4$,而文献[18]对 m 的取值进行了详细讨论,当 m 增加时,编码代价会增加,同时增加了数据冗余,导致编码后数据包长度太小,编码系数所占比重太大;另一方面 sink 节点需要接收到较多数量的数据包才能还原出原始数据包,在一定程度上会降低模型的成功交付率。考虑到传感器节点的处理能力有限,在编码秩数上的设置不宜过大,因而选择 m 为 3。为了保证第一跳的成功率,会产生 k_m 个编码数据包向下一跳发送。 k_m 的大小选择同样兼顾第一跳的成功率以及源节点的传输能

耗,考虑到传感器节点的计算能力,使用式(7)计算出 k_m 值。

$$k_m = \lceil m / PRR_{\text{avg}} \rceil \quad (7)$$

PRR 为本网格与下一跳网格间的网格 PRR_{avg} 。发送的数据包是经过编码之后的数据包,其数据包格式如表 3 所列。

表 3 编码数据包格式

Src_NID	NH_NID	GroupNum	Vector	MSG
---------	--------	----------	--------	-----

表 3 中,Src_NID 为源节点 ID,NH_NID 为下一跳节点的 ID,包含了每条路径的下一跳节点,GroupNum 为编码数据包组号,Vector 为编码系数向量,MSG 为编码后的数据。

本协议采用的编码的有限域选择为 $q=2^8$,这是因为文献[17]给出了有限域大小与线性无关概率的关系,在有限域为 2^8 时,线性无关的概率已经能达到 0.9961。同时理论上有限域 $q=2^8$ 即可保证 99.6% 的成功译码率。

每个转发节点收到数据包之后,会先对组号 GroupNum 进行判断,如果是一个新组号,会在存储区开辟一个存储空间用于存放这个数据包,存储空间的大小与编码秩数 m 一致,每个存储空间对应一个生存时间 t_1 ;如果接收的组号之前已经存在,则将这个数据包存入相应的存储空间中。

当满足下列条件时,节点会对该存储空间的数据包进行编码转发:数据包存满或者到达生存时间 t_1 ,编码包个数与存储空间数据包相同。一旦该组数据转发,转发节点便会记录下已转发的组号,以后便不会再接收来自标记有该组号的数据包。

当这些编码数据包最终传到 sink 节点之后,sink 会按照高斯消元法[2]对编码包进行解码,还原出原始数据。

3.4 通信维护过程

网络在初始化之后还需要进行一系列必要的路由维护工作,保证系统正常运行。在本协议中路由维护主要有以下两方面的工作。

(1) 管理节点的维护:管理节点在初始化时选举产生,在之后的网络工作中承担着管理信息的交互以及必要情况下的数据传输,管理节点比普通节点能量消耗更多,更容易死亡。本协议对每个管理节点采用灾准备份机制,一旦其能量处于临界濒死状态,管理节点会查询本网格内的节点剩余能量,选取剩余能量最大的节点作为下一任管理节点,将数据备份于该节点并通过广播信息告知本网格内的所有节点及邻接网络的管理节点。

(2) 路径的重新建立:随着网络运行,节点的能量以及链路质量都会有所变化,因此建立的路径的生存时间为 T 。每隔 T 时间需要进行一次网络维护,包括重新确定网格中的可选节点集、PRR 的重新探查,以此更新邻接网格信息表。 T 的取值视网络实际运行状态而定,如果网络的链路状态不稳定则 T 取较小值,反之可取较大值。假设源节点发包的速率为 μ ,在网络维护时可选节点的能量选择阈值 $E_{\text{threshold}}$ 的表达式如式(8)所示:

$$E_{\text{threshold}} = \mu \cdot T \cdot (E_{\text{SD}} + E_{\text{RX}}) \quad (8)$$

满足剩余能量大于或等于阈值的节点成为可选节点,管理节点在网络维护之后也会与邻接网格交互修改邻接网格信息表中的相关信息,并且重新建立路径。

4 性能分析

(1) 应对网络中可能出现的区域链路失效

在 BRGNC 协议中,首先网格间的 PRR_{avg} 是计算路由选择的权重值 $cost$ 的重要参数,建立的路径会绕行链路质量较差的区域,从而保证数据传输的可靠性。其次每隔 T 时间段会进行通信维护,此时会对邻接区域再次进行链路质量探查,因此可以较为及时地发现链路失效区域,从而在重建路径时绕行该区域。

(2) 能耗均衡性

在 BRGNC 协议中,能耗均衡的实现分成了两部分:网格选择以及节点选择。在路径建立过程中,网格的可选节点能量总和是计算权重值 $cost$ 的一个参数,在其他参数一致的情况下,总能量越大的网格越容易被选为下一跳网格;在节点选择中,完全按照能量优先的原则进行选取。因此每经过 T 时间段通信维护重建路径时,转发路径上的节点是剩余能量相对较大的节点,因此能耗均衡可以得到较好的保证。

5 仿真结果及性能分析

本文利用仿真工具对基于普通多径模型的 AOMDV^[6] 协议、基于不相交多径网络编码模型的 NCAOMDV^[7] 协议以及本文提出的基于相交多径网络编码模型的 BRGNC 协议进行仿真,网络实验仿真的基本参数设置如表 4 所列。其中编码包个数设置为 5,是通过仿真验证获取的,在仿真中测试了多种数值,发现编码包个数为 5 时能量节约及可靠性已经超过原协议,因此选择编码个数为 5。

表 4 仿真实验参数表

参数	数值
网格大小	20×20(m)
通信半径	40√2(m)
原始数据包大小	12000(bits)
编码数据包大小	4000(bits)
编码秩数	3
源节点第一跳发送编码包个数	5
E_{elec}	2(pJ/bit)
ξ_{fs}	0.0013(pJ/bit/m ²)
节点初始能量	2(J)
有效区间半径	10√2(m)
过渡区间半径	40√2(m)
有效区间节点链路质量	0.9~1.0 区间的随机数
过渡区间节点链路质量	0.6~0.9 区间的随机数

(1) 不同网络范围大小的情况下协议的性能比较与分析

分别在网络范围为 100×100、200×200、300×300(m) 3 种环境下对 3 种协议进行仿真。节点随机平均分布,数据的成功交付率值如图 5 所示,平均能耗如图 6 所示。

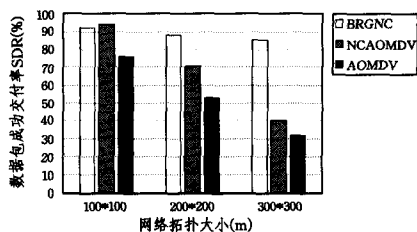


图 5 不同网络范围情况下 3 种协议的可靠性对比

由图 5 可知,随着网络范围的扩大,BRGNC 可靠性所受影响很小,而其余两种协议的可靠性均有不同程度的下降,因为相交多径网络编码模型^[4]对于冗余数据的利用度高,且编码对可靠性有增益。NCAOMDV 协议在网络范围为 100×100

的情况下可靠性最高,这是由于该网络范围比较小,最多只需要 3 跳就可以到达 sink,而且节点对于编码数据包的处理方式是接收多少编码就转发多少,并没有像 BRGNC 一样对接收的数据包有数量的限制。这个区别会导致 NCAOMDV 在跳数较小的情况下能够有更多的编码包发送给 sink,从而导致可靠性略高于 BRGNC。

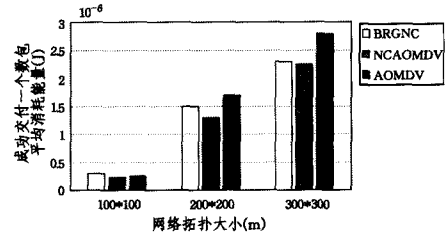


图 6 不同网络范围情况下 3 种协议的节点平均能耗对比

由图 6 可以看出,在 100×100 的情况下 BRGNC 的能耗略高于其他两种协议,这是由于其他两种协议采用的是跳数优先的策略,能以最小的跳数将数据包发送给 sink。而 BRGNC 是基于网格间通信的发送数据,无法最大化地利用通信半径,因而在相同距离情况下其跳数会大于 AOMDV 及 NCAOMDV,导致其能耗略高于两者。但是随着网络范围的增大,由于 AOMDV 及 NCAOMDV 可靠性下降的缘故,sink 收到的数据包减少,而 BRGNC 的可靠性保证了成功交付到 sink 的数据包多于其余两种协议,因此由于跳数较多而造成的能耗劣势逐渐被淡化,在 300×300(m) 的拓扑中 BRGNC 与 NCAOMDV 的全网能耗已经几乎持平,均低于 AOMDV。

(2) 源节点在不同距离区间的协议性能比较

下面仿真分析源节点离 sink 不同距离区间情况下的性能。使用 200×200(m) 的拓扑,网络节点个数为 400 且在拓扑中随机分布,节点根据离 sink 距离的区间分为 6 类:0~50、50~100、100~150、150~200、200~250、250~300(m),同一类中的所有节点都发送了一次数据包记为一轮,每进行一轮统计成功交付率值和平均能耗值,不同距离区间的成功交付率结果如图 7 所示。

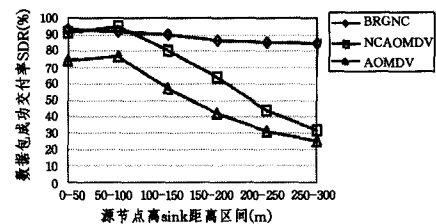


图 7 源节点距 sink 不同距离区间情况下 3 种协议的可靠性对比

从图 7 可以看出,NCAOMDV 以及 AOMDV 协议在距离变远、跳数增大时,可靠性明显下降,而 BRGNC 由于是基于相交多径网络编码模型,因此可靠性非常稳定,即使在距离较远、跳数较多的情况下仍然能够保持较高的成功交付率。AOMDV 与 NCAOMDV 在(0~50)到(50~100)两个区间中的可靠性有所增长,这是由于这两种协议均是基于最小跳数,因此能够最大化地利用传输距离。(0~50)区间的节点在这两种协议中尚处于能够直接与 sink 通信的范围,所以不会建立多径而直接与 sink 单路径通信,可靠性必然不如多径情况。NCAOMDV 由于源节点发送了冗余的编码包,因此单跳情况下其可靠性还是高于无编码的 AOMDV。

平均能耗如图 8 所示,可以看出,NCAOMDV 以及 AOMDV 的能耗曲线近似于指数增长,而 BRGNC 的能耗呈线性增长。BRGNC 在相同距离下跳数多于其他两种协议,所以导致在距离较近时能耗较大,不过随着距离增大,跳数上的劣势逐渐被可靠性带来的优势所弥补,在(200~250)区间时能耗指标已经与 NCAOMDV 相同,而且随着距离增大能耗指标将越来越优于其他两种协议。在(0~50)区间 AOMDV 的平均能耗略小于 BRGNC 以及 NCAOMDV,这是由于距离区间属于一跳范围内,且 AOMDV 并无网络编码,源节点没有发送冗余编码包,因此在一跳且彼此可靠性相差不大的情况下可以凭借源节点发送数据较少来减少能耗。

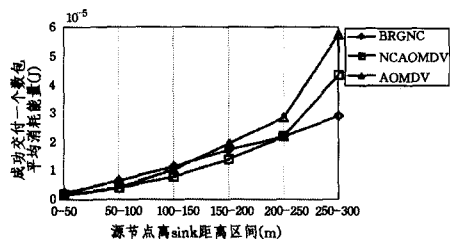


图 8 源节点距 sink 不同距离区间情况下 3 种协议的能耗对比

(3) 能耗均衡性

本协议在选择网格内转发节点时采用能量优先原则,能很好地保证能量均衡,在此使用能量方差^[10]作为验证。本仿真使用 200 * 200(m) 的拓扑,随机布设 400 个节点,为保证节点平均能耗相同,根据前面能耗分析中的结论,使用(200~250)区间内的节点依次充当源节点,仿真对象为 NCAOMDV 以及 BRGNC 两种协议。源节点每轮发送一个数据包,假设每一轮发送完之后均有通信维护,总共发送 5 轮,每一轮数据发送完之后的能量标准方差对比如图 9 所示。

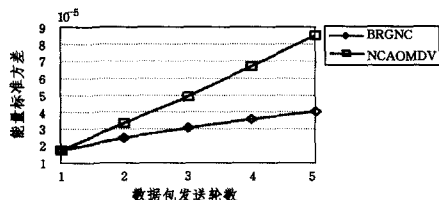


图 9 每一轮数据发送之后节点能耗方差对比

通过图 9 可以看出 BRGNC 的能耗方差小于 NCAOMDV,而且随着轮数的增加这种优势越来越明显。NCAOMDV 由于基于跳数优先选择但是未考虑节点能量情况,导致有部分节点过分使用而造成能耗方差高于 BRGNC。

(4) 仿真结果小结

从仿真结果可以看出提出的 BRGNC 协议更适用于节点密度高、网络范围较大以及链路质量不稳定的环境,比如在林区火灾监控等场景下,协议性能明显优于其他路由协议。

结束语 本文基于相交多径网络编码模型,依据节点地理位置信息对网络进行了虚拟网格的划分,在此基础上提出一种路由协议 BRGNC。该协议首先合理选择下一跳数据发送的虚拟网格,在网格间数据传输过程中,使用能量优先原则选出转发节点,较好地保证了可靠性和能量均衡性。最后通过搭建仿真平台进一步验证了该协议在网络范围大且链路质量不太稳定的环境下性能明显优于其他协议。目前协议采用的是最简单的随机线性编码,下一步可以借鉴文献[15]采用新型的编码方法来进行进一步提高网络协议的传输性能和能量效率。

- [1] Zahary A, Ayesh A. An analytical review for multipath routing in mobile Ad Hoc networks[J]. International Journal of Ad Hoc and Ubiquitous Computing, 2010, 5(2): 69-85
- [2] Ahlswede R, Cai N, Li S Y R, et al. Network information flow [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2000, 46(4): 1204-1216
- [3] Ho T, Médard M, Shi J, et al. On randomized network coding [C]//Proceedings of the Annual Allerton Conference on Communication, Control and Signal Processing, 2003: 11-20
- [4] Toledo A L, Wang X. Efficient multipath in sensor networks using diffusion and network coding [C]// IEEE 40th Annual Conference on Information Sciences and Systems, 2006: 87-92
- [5] Zhao Wei, Tang Zhen-min, Ji Shu-biao, et al. Analysis of sensor network multipath routing model based on network coding[J]. Computer Engineering and Design, 2012, 33(3): 875-879 (in Chinese)
- [6] Marina M K, Das S R. On-demand multipath distance vector routing in ad hoc networks [C]//IEEE Ninth International Conference on Network Protocols, 2001: 14-23
- [7] Yang F, Ling S, Xu H, et al. Network coding-based AOMDV routing in MANET [C]// 2012 IEEE International Conference on Information Science and Technology (ICIST), 2012: 337-340
- [8] Yu Mei-fen, Wu Meng. Minimum Broadcasting Retransmission Algorithm based on Network Coding in WSN [J]. Computer Technology and Development, 2014, 24(9): 125-127 (in Chinese)
- [9] 郁美芬, 吴蒙. WSN 中基于网络编码的最小广播重传算法 [J]. 计算机技术与发展, 2014, 24(9): 125-127
- [10] Kim J, Kim K A, Jeong J S, et al. Cross-layer design of adaptive modulation and coding for multicast system with random network coding [J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2014, 2014(1): 1-10
- [11] Lai I W, Lee C H, Chen K C, et al. Path-Permutation Codes for End-to-End Transmission in Ad Hoc Cognitive Radio Networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2015, 14(6): 3309-3321
- [12] Han Li, Qian Huan-yan. Algorithm of Network Coding Based Multipath Opportunistic Routing for Wireless Networks [J]. Computer Science, 2014, 41(5): 116-119 (in Chinese)
- [13] 韩莉, 钱煥延. 基于网络编码的无线网络多路径机会路由算法 [J]. 计算机科学, 2014, 41(5): 116-119
- [14] Wang Jing, Liu Jing-mei, Wang Xin-mei. Performance Analysis of Multicast Routing Algorithm Based on Network Coding [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2015, 37(7): 1580-1585 (in Chinese)
- [15] 王静, 刘景美, 王新梅. 基于网络编码的多播路由算法性能分析 [J]. 电子与信息学报, 2008, 30(11): 2605-2608
- [16] Ye F, Luo H, Cheng J, et al. A two-tier data dissemination model for large-scale wireless sensor networks [C]//ACM Proceedings of the 8th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking, 2002: 148-159
- [17] Li Y, Wang Z, Sun Y. Analyzing and modeling of the wireless

link for sensor networks[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2007, 20(8): 1846-1851

- [15] Guo Rui, Liu Chun-yu, Zhang Hua, et al. Full Diversity LDPC Codes Design and Energy Efficiency Analysis for Clustering Wireless Sensor Networks[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2015, 37(7): 1580-1585(in Chinese)

郭锐, 刘春于, 张华, 等. 分簇无线传感器网络中根校验全分集 LDPC 码设计与能效分析[J]. 电子与信息学报, 2015, 37(7): 1580-1585

(上接第 125 页)

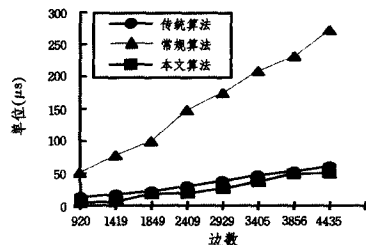


图 6 平均并发变迁个数为 17, 最大并发变迁个数为 42 的比较结果

5.3 结果分析

从表 2 和图 4 可以看出, 对于具有较少并发变迁的情况, 当总的变迁个数较少(小于 400)时, 本文算法性能优于其它两种算法, 但当总的变迁个数较多(大于 400)时, 本文算法性能低于其它两种算法。这是由于本文算法要对每一个变迁是否为并发变迁做出判断, 需要花费一定的时间, 而当并发变迁较少时, 无法发挥本算法并行执行的特点。

但从表 3、表 4 和图 4、图 5 可以看出, 对于具有较多并发变迁的情况(平均并发变迁个数大于 3), 本文算法性能优于其它两种算法, 尤其是明显优于常规算法。因为常规算法要处理所有的可达状态, 当变迁个数较多时, 即便并发变迁较多, 由于它没有考虑并发变迁的并发执行, 因此需要花费大量时间。而对于本文算法来说, 尽管总的变迁个数较多, 但由于并发变迁较多, 处理这些并发变迁时并行执行, 因此可以节省大量时间。对于传统算法, 由于它在计算各事件(对应 Petri 网中位置)的最早和最晚时间时所花费的时间要大大超过计算各活动(对应 Petri 网中变迁)的最早和最迟结束时间时所花费的时间, 因此当活动的个数不变时, 仅增加事件的个数其花费的时间增长, 速度较慢。

结束语 本文利用有色时延 Petri 网描述了表示工程的 AOE 网, 给出了构造有色时延 Petri 网的并发可达标识图的算法。利用有色时延 Petri 网和并发可达标识图给出了计算关键路径的方法。实例及仿真实验表明, 当 AOE 网中的平均并发活动(即 Petri 网中的平均并发变迁)个数大于 3 时, 本文算法明显优于传统计算关键路径的算法和利用可达状态求解关键路径的算法。而且 AOE 网中的并发活动(即 Petri 网中的并发变迁)越多, 本文算法的优势越明显。

参考文献

- [1] 严蔚敏, 吴伟民. 数据结构(C语言版)[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008: 183-185

- [16] Yang Y, Zhong C, Sun Y, et al. Network coding based reliable disjoint and braided multipath routing for sensor networks[J]. Journal of Network and Computer Applications, 2010, 33(4): 422-432
- [17] Li S Y R, Yeung R W, Cai N. Linear network coding[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2003, 49(2): 371-381
- [18] Yang Yu-wang, et al. Reliable Braided Multipath Routing with Network Coding for Underwater Sensor Networks[J]. China Ocean Engineering, 2010, 24(3): 565-574

- [2] East W. Critical Path Method(CPM) Tutor for Construction Planning and Scheduling [M]. McGraw-Hill, 2015
- [3] He Li-hua, Zhang Lian-ying. An improved fuzzy network critical path method[J]. Systems Engineering — Theory & Practice, 2014, 34(1): 190-196(in Chinese)
- 何立华, 张连营. 改进的模糊网络关键路径法[J]. 系统工程理论与实践, 2014, 34(1): 190-196
- [4] Cao Han, Liu Da-xin, Fu Rui. Workflow critical path algorithm based on activities[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2006, 27(4): 551-555(in Chinese)
- 曹瀚, 刘大昕, 富锐. 基于活动的工作流关键路径算法[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2006, 27(4): 551-555
- [5] Hu Mei-qun, Xia Yin-shui, Wang Lun-yao. Critical Path Algorithm Based on Branch-and-bound[J]. Journal of Ningbo University(NSEE), 2011, 24(2): 37-41(in Chinese)
- 胡美群, 夏银水, 王伦耀. 基于分支限界的关键路径求解算法[J]. 宁波大学学报(理工版), 2011, 24(2): 37-41
- [6] Liu Xiao-jing. The improvement and application of the key path algorithm to AOE-net[J]. Computer Systems & Applications, 2006(9): 47-53(in Chinese)
- 刘小晶. AOE 网的关键路径求解算法改进及其应用[J]. 计算机系统应用, 2006(9): 47-53
- [7] Wu Zhe-hui, Wang Mei-qin. A kind of Petri nets involving time factors and their applications in engineering[J]. Acta Mathematicae Applicatae Sinica, 1987, 10(3): 289-299(in Chinese)
- 吴哲辉, 王美琴. 一类含时间因素的 Petri 网及其在工程上的应用[J]. 应用数学学报, 1987, 10(3): 289-299
- [8] Ye Shuang, Ye Jian-hong, Liu Chuan-cai. Algorithm for finding the Critical Paths Based on Petri Net[J]. Computer Science, 2012, 39(6): 201-203(in Chinese)
- 叶双, 叶剑虹, 刘传才. 基于 Petri 网的关键路径求解算法[J]. 计算机科学, 2012, 39(6): 201-203
- [9] Zheng Wen-Yan. A New Method for Finding the Critical Paths Based on Colored Petri Nets[J]. Computer Systems & Applications, 2013, 22(8): 9-13(in Chinese)
- 郑文艳. 基于 CPN 的求解关键路径的新方法[J]. 计算机系统应用, 2013, 22(8): 9-13
- [10] 吴哲辉. Petri 网导论[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006
- [11] Jensen K. Coloured Petri nets: basic concepts, analysis methods, and practical use[M]. Berlin: Springer Verlag, 1992
- [12] Zuberek W M. Timed Petri nets: definitions, properties and applications[J]. Microelectronics and Reliability, 1991, 31(4): 627-644