

# 基于 WIA-PA 网络中虚拟通信关系的路由算法

易秀双 王兴伟 吴炜鑫 刘小锋  
(东北大学网络中心 沈阳 110819)

**摘要** 基于 IEEE-802.15.4 标准的 WIA-PA 网络中的虚拟通信关系(Virtual Communication Relationships, VCR), 分析了无线网络中的最小跳数路由算法与节能型路由算法, 讨论了这两种算法的优缺点。结合二者的优点以及 WIA-PA 网络中 VCR 的特点, 提出了一种基于 VCR 的路由算法。仿真结果表明, 所提算法能根据不同的 VCR 采用恰当的路由, 实现了管理报文转发低延迟、数据报文转发低能耗, 满足了工业无线应用的实际需求。

**关键词** 工业无线, WIA-PA, 路由, VCR

**中图分类号** TP393 **文献标识码** A

## WIA-PA Network Oriented Routing Algorithm Based on VCR

YI Xiu-shuang WANG Xing-wei WU Wei-xin LIU Xiao-feng  
(Network Center, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

**Abstract** Based on the IEEE-802.15.4 standard and WIA-PA networks with VCR in it, the minimum hop routing algorithm and energy-efficient routing algorithm in wireless networks were introduced. The advantages and disadvantages of the two algorithms were analyzed and compared. By combining the minimum hop routing algorithm and routing algorithm for energy-saving advantages as well as VCR in the WIA-PA network, a routing algorithm based on the VCR was designed and simulated. Simulation results show that the novel routing algorithm based on VCR with combing the two traditional routing algorithms is efficient. By comparing the WIA-PA VCR application with different routing algorithms, it achieves lower delay management data packet forwarding and energy consumption of data packets transmitting, and is more suitable for the WIA-PA network applications.

**Keywords** Industrial wireless, WIA-PA, Routing, VCR

### 1 引言

WIA-PA<sup>[1]</sup> (Wireless networks for Industrial Automation—Process Automation) 是我国具有自主知识产权的、基于 IEEE-802.15.4 标准<sup>[2-5]</sup>、同时兼容无线 HART 标准<sup>[6,7]</sup>、用于工业过程测量、监控的无线网络系统, 使用了扩频通信、多跳通信、Mesh 网络等技术, 具有强抗干扰性能、超低能耗、实时通信等技术特征, 适合部署在恶劣的工业现场环境和人不宜到达的区域<sup>[8]</sup>, 提供满足应用需求的高可靠、实时无线通信服务。

WIA-PA 网络拓扑结构如图 1 所示<sup>[1]</sup>。采用 Mesh 结构与星型结构相结合的二层网络拓扑结构<sup>[9]</sup>, 由网关设备、路由设备、现场设备以及手持设备构成。第一层是由网关设备与路由设备构成的 Mesh 结构, 第二层是由路由设备与现场设备(手持设备)构成的星型结构<sup>[1]</sup>。

在 WIA-PA 第一层网络结构中, 网关设备与路由设备具有路由功能, 而第二层网络结构中现场设备与手持设备则不具备路由功能。WIA-PA 网络运行时, 网关设备负责路由设

备的加入、退出, 并接收采集到的数据, 发送针对路由设备与现场设备的控制指令。路由设备负责其他路由设备的多跳加入、退出及现场设备与手持设备的加入、退出, 并将现场设备或手持设备采集到的数据通过路由转发给网关。现场设备与手持设备的功能比较简单, 它们仅仅将采集到的数据发送给所加入的路由节点。

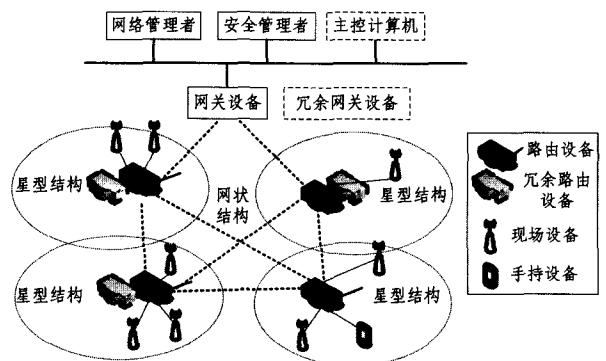


图 1 WIA-PA 网络拓扑

到稿日期: 2010-10-29 返修日期: 2011-01-16 本文受国家自然科学基金(60673159, 70671020, 60802023), 国家高技术研究发展计划重点项目(2007AA041201), 科技支撑计划(2008BAH37B05020), 高等学校博士学科点专项科研基金(20060145012, 20070145017, 20070145096), 中央高校基本科研业务费(90504003, 90504006), 国家 863 计划(2006AA01Z214)资助。

易秀双(1969-), 男, 副教授, 主要研究方向为计算机网络、传感器网络、数据处理, E-mail: xsyi@mail.neu.edu.cn; 王兴伟(1968-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为计算机网络、传感器网络、分布式计算系统、分布式多媒体系统。

针对不同用户应用对象, WIA-PA 网络所使用的通信资源被分为管理服务所用的通信资源与数据服务所用的通信资源, 并使用虚拟通信关系(Virtual Communication Relationships, VCR)<sup>[1]</sup>来区分不同用户应用对象所使用的通信资源。为区分 VCR 的不同用途, VCR 分为管理 VCR 和数据 VCR。管理 VCR 标识管理服务所用的通信资源, 数据 VCR 则标识数据服务所用的通信资源。工业应用对无线技术有着可靠、安全、实时、可扩展、可操作、节能等多方面的需求。由于受外界环境干扰以及节点自身限制, 因此工业无线网络在进行路由选择时需进行多方面的考虑。

基于 WIA-PA 网络中 VCR, 本文分析了无线网络中的最小跳数路由算法与节能型路由算法, 并对这两种算法的优点和缺点进行了深入分析。同时结合二者的优点以及 WIA-PA 网络中 VCR 的特点, 提出了一种基于 VCR 的新的路由算法以根据不同的 VCR 采用恰当的路由, 满足了工业无线应用的实际需求。

## 2 两种重要的路由算法

目前有诸多路由算法<sup>[10-22]</sup>可用于 WIA-PA 网络中。不同的路由算法针对不同的应用环境和需求, 其中最小跳数路由算法和节能型路由算法是 WIA-PA 网络中比较常用的两种路由算法。

### 2.1 最小跳数路由算法

最小跳数路由算法主要关注工业无线应用中对实时性的要求, 其优点是实现简单、可自动做到路径最短、延迟最小等, 因而受到普遍关注。该算法无需维护网络全局拓扑, 在一定的节点发射功率下, 尽最大可能将信息传递给尽量远的节点, 使节点转发数据所经过的路由节点数量最小, 从而整条路径的延迟最小。此优点决定了它适用于网络时延要求较高的管理报文, 但缺点是无法充分利用工业环境中部分节点有线供电的优势, 关键位置的节点可能因为大量地进行数据转发, 使得网络出现能量黑洞, 影响网络整体生存时间。

### 2.2 节能型路由算法

节能型路由算法根据节点剩余能量百分比对路径进行加权计算, 在进行数据包传递时, 可选择出整条路径能量消耗百分比最小的路径, 减少能量黑洞出现的可能性, 从而达到延长无线网络整体生存时间的效果。节能型路由算法的优点是延长网络整体生存时间, 这也决定了它适用于无线网络中对实时性要求不高且数量占绝大多数的数据报文的转发。节能型路由算法由于更侧重于节能方面, 因此选择出来的路径不一定是延迟最小的路径, 故使用这个算法进行管理报文的路由时, 并不是最优的。

## 3 基于 VCR 的路由算法

由以上分析可知, 尽管最小跳数路由算法和节能型路由算法都是 WIA-PA 网络中的两种重要的路由算法, 但它们都存在一定的局限性和缺点。本文结合这两种路由算法各自的优点, 基于 WIA-PA 网络中 VCR 的实现, 提出一种基于 VCR 的路由算法。通过改进最小跳数路由算法与节能型路由算法, 针对不同的用户应用, 分配不同的 VCR, 并运行不同的路由算法, 实现报文在进行转发时对管理报文选择延迟最小的路由, 对数据报文选择节能型的路径。

### 3.1 电量信息表示

一般地, 节点的电量信息通常使用剩余电量百分比表示。

如果新节点的电量信息为 100%, 则电量信息记为 1.0。随着时间的推移, 节点能量逐渐消耗减少, 电量信息值则逐渐减小。当节点能量用完, 电量信息最终降为 0。对于有源节点, 其剩余电量一直为 100%, 则电量信息一直为 1.0。因此, WIA-PA 网络中节点  $i$  的电量信息值  $r_i(t)$  可表示为

$$r_i(t) = \begin{cases} 1, & i \in R \\ \frac{E_i - \alpha_i(t)}{E_i}, & i \notin R \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $R$  表示有源节点集合,  $E_i$  表示节点  $i$  的初始能量,  $\alpha_i(t) \in [0, E_i]$  表示节点  $i$  随着时间  $t$  而消耗的能量。可见, 式(1)表示了 WIA-PA 网络中不同节点的电量信息。对于有源节点  $i$ ,  $r_i(t)$  始终为 1, 表示电量信息为 100%; 而对于能量有限节点, 即非有源节点, 则  $r_i(t)$  将随着时间的变化从 1 逐渐下降, 并最终降为 0。

### 3.2 路由更新报文

在 WIA-PA 网络中, 节点的电量信息是非常重要的性能指标, 常常决定着网络连通性和生存时间。针对 WIA-PA 网络的实际应用环境, 本文对传统的路由更新报文进行改进, 在传统路由更新报文中增加电量信息字段与跳数信息字段。改进后的路由更新报文格式如表 1 所列, 分别是报文的控制信息(ControlInfo)、报文的目的地地址(DstAddr)、报文的源地址(SrcAddr)、报文的上一跳地址(PreHop)、报文的下一跳地址(NextHop)、报文标识信息(JobID)、报文生存时间(TTL)、电量信息(BatteryState)以及跳数信息(Hops)。

表 1 路由更新报文格式

参数名称	数据类型	取值范围
ControlInfo	Unsigned8	0~255
DstAddr	Unsigned16	0~65535
SrcAddr	Unsigned16	0~65535
PreHop	Unsigned16	0~65535
NextHop	Unsigned16	0~65535
JobID	Unsigned32	0~4294967295
TTL	Unsigned8	0~255
BatteryState	Float	0~1.0
Hops	Unsigned8	0~255

### 3.3 路由表格式

我们还对路由节点的路由表格式进行改进, 在路由表项中增加电量信息与跳数信息。改进后的路由表格式定义如表 2 所列, 表中各列分别为目的地地址、下一跳地址、报文标识、电量信息以及跳数信息。表中的 GW 代表网关的地址, N1、N2 和 N3 代表路由设备地址。当节点需要将数据发到 GW 时, 会根据目的地地址查询路由表, 查到下一跳地址为 N2, 则将该数据包发送到 N2 节点。路由表中的电量信息表示节点通过该路由到达目的地地址所经过的整条链路的电量状况。

表 2 路由表示例

目的地地址	下一跳	报文标识	电量信息	跳数信息
N1	N3	4	0.5	2
GW	N2	6	0.7	2
.....	.....	.....	.....	.....

### 3.4 路由算法

根据以上分析, 基于式(1)的电量信息表示、改进的更新路由报文、改进的路由表格式, 提出如下基于 VCR 的路由算法流程。

网关节点以泛洪方式向传感器网络发送路由更新报文, 路由更新报文中包含网关节点地址、网关节点的电量信息、路

由更新报文唯一标识以及节点到网关的跳数信息。网关节点实现过程如算法 1 所述。

### 算法 1 网关节点算法流程

- 1: 跳数信息 Hops=1;
- 2: 电量信息 BatteryState=1;
- 3: while 报文唯一标识 JobID=0 do
- 4: 将路由更新报文发送给其他相邻节点
- 5: JobID=JobID+1
- 6: sleep 一段时间之后再泛洪
- 7: end while

路由节点接收到网关节点发送的路由更新报文后,若路由更新报文中的报文标识信息新于已有的标识信息,或路由更新报文中的电量信息大于已有的电量信息,或路由更新报文中的跳数信息小于已有的跳数信息,将对本节点的路由表进行更新。同时将路由更新报文中的电量信息设为根据本节点电量信息加权计算后的值、将路由更新报文中的跳数信息加 1,转发给周围其他路由节点。

路由更新报文  $j$  中的电量信息值  $R_j$  可表示为

$$R_j = R_i r_i \quad (2)$$

式中,  $R_i$  表示路由更新报文  $i$  中的电量信息,  $r_i$  表示节点  $i$  本身的电量信息。

同时,由于路由更新报文是从网关节点传递到路由节点  $i$  的,因此路由更新报文  $j$  中的电量信息值  $R_j$  还可以表示为

$$R_j = \prod_{r_i(G \in P)} r_i \quad (3)$$

式中,  $P$  表示路由更新报文途经节点的集合。

路由节点实现过程如算法 2 所述。

### 算法 2 路由节点路由更新

- 1: 路由节点接收到网关节点的路由更新报文
- 2: 在当前路由表中查找路由表项
- 3: If 路由表项中的报文标识比路由更新报文中的报文标识的值小
- 4: 删除该路由表项
- 5: End If
- 6: If 路由表项为空
- 7: 调用插入新路由表项函数
- 8: 标记有插入动作
- 9: End If
- 10: If 路由更新报文中的电量信息大于路由表项中的电量信息
- 11: 调用插入新路由表项函数
- 12: 标记有插入动作
- 13: End If
- 14: If 路由更新报文中的跳数信息小于路由表项中的跳数信息
- 15: 调用插入新路由表项函数
- 16: 标记有插入动作
- 17: End If
- 18: If 标记有插入动作
- 19: 电量信息 = 路由更新报文中电量信息 \* 当前节点电量信息
- 20: 将路由更新报文中的跳数信息加 1
- 21: 将修改后的路由更新报文转发给邻居节点
- 22: End If
- 23: Function 插入新路由表项函数
- 24: 将目的地址置为路由更新报文中的源地址
- 25: 将下一跳地址置为路由更新报文中一跳地址
- 26: 将报文标识置为路由更新报文中报文唯一标识
- 27: 将电量信息置为路由更新报文中电量信息
- 28: 将跳数信息置为路由更新报文中跳数信息
- 29: End Function

在管理 VCR 进行路由查找时,根据同一个目的地址,查找跳数最小的路由表项作为最终查找结果,进而实现低延迟。

在数据 VCR 进行路由查找时,根据同一个目的地址,查找电量最大的路由表项作为最终查找结果,从而实现高节能。

## 4 仿真结果分析

使用 NS2 分别对最小跳数路由算法、节能型路由算法、基于 VCR 的路由算法各自的节点存活情况以及平均网络延迟情况进行仿真对比。模拟工业现场两台并排的长方形机床,每台机床上分布 8 个路由节点,在两个机床中间位置设置一个网关节点。拓扑图如图 2 所示,其中,host[0]、host[2]、host[3]、host[6]、host[7] 为有源节点,其他均使用电池。

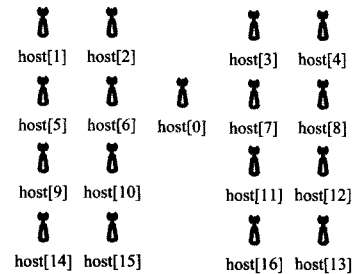


图 2 仿真拓扑结构

图 3、图 4、图 5 分别给出电量 50% 以上节点数对比、存活节点数对比、平均网络延迟对比。

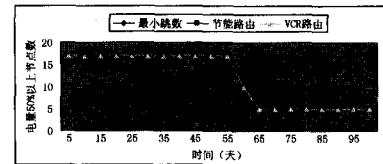


图 3 电量 50% 以上节点数对比

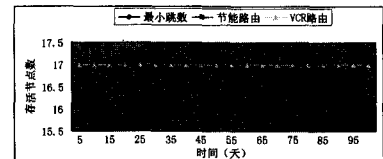


图 4 存活节点数对比

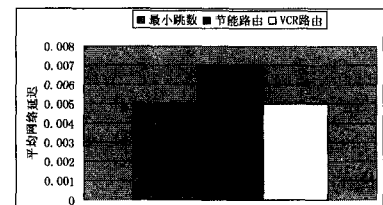


图 5 平均网络延迟对比

在相同的仿真环境下,基于 VCR 的路由算法各节点电量消耗情况基本与节能型路由算法一致,平均网络延迟与最小跳数路由算法一致。

**结束语** 将不同用户应用对象所使用的通信资源区分开,有利于针对不同用户应用对象对通信资源需求的特点,有针对性地安排通信资源。对网络时延要求较高的用户应用,为其安排时延最短、跳数最小的通信资源;对通信量要求较高的用户应用,为其安排能耗较小的通信资源。这样既满足工业无线应用对实时性的要求,也考虑到工业无线网络对节能

(下转第 111 页)

了计算复杂度。最后利用基于模型的计算验证了本方法的准确性和有效性。在复杂度相当的前提下,本文算法克服了经典的基于 CGF 的方法在推算过程中需要构造满秩路由矩阵的缺点。

## 参考文献

- [1] 梁永生,张基宏,张乃通. IEEE 标准容限内以太网转发时延的测试与分析[J]. 电子学报,2008,36(1):46-50
- [2] 胡治国,张大陆,侯翠平,等. 基于随机神经网络多步网络时延预测模型[J]. 计算机科学,2009,36(7):85-87,112
- [3] Liang Gang, Yu Bin. Maximum Pseudo Likelihood Estimation in Network Tomography[J]. IEEE Transactions on Signal Processing,2003,8(51):2043-2053
- [4] 李贵山,蔡皖东. 网络链路时延分布估计方法研究[J]. 计算机工程与应用,2009,45(8):20-22,28
- [5] Yolanda T, Mark C, Robert N D. Network Delay Tomography [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2003, 8 ( 51 ): 2125-2135
- [6] Guo Dong, Wang Xiao-dong. Bayesian Inference of Network Loss and Delay Characteristics with Applications to TCP Performance Prediction[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2003,8(51):2205-2218
- [7] Shih M-F, Alfred H O. Unicast Inference of Network Link Delay Distributions from Edge Measurements [C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Acoust Speech and Signal Processing. Salt Lake City, U. S. A, May, 2001, 6: 3421-3424
- [8] Lawrence E, Michailidis G, Vijayan N N. Fast, Moment-based Estimation Methods for Delay Network Tomography[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2008(9):1-22
- [9] Lawrence E, Michailidis G, Vijayan N N. Network Delay Tomography Using Flexicast Experiments[J]. Journal of the Royal Statistical Society, Series B, 2006(68):785-813
- [10] Mark C, Robert N D. Network Tomography for Internal Delay Estimation [C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Acoust Speech and Signal Processing. Salt Lake City, U. S. A, May 2001, 6: 3409-3412
- [11] 曾鹏,于海斌. 工业无线网络 WIA 标准体系与关键技术[J]. 自动化博览,2009(1):24-27
- [12] 陆晓希. 低功耗自适应无线传感网络路由设计[J]. 微计算机信息,2007,23(2-1):172-174
- [13] 姜波,张荣福. 基于节能的无线传感器网络路由协议研究[J]. 现代电子技术,2009(1):26-29
- [14] Kulik J, Heinzelman W R, Balakrishnan H. Negotiation-based protocols for disseminating information in wireless sensor networks[J]. Wireless Networks, 2002, 8(223):169-185
- [15] Intanagonwivat C, Govindan R, Estrin D, et al. Directed diffusion for wireless sensor networking[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2003, 11(1):2-16
- [16] Braginsky D, Estrin D. Rumor routing algorithm for sensor networks[C]// Proceedings of the 1st Workshop on Sensor Networks and Applications. 2002:22-31
- [17] Sohrabi K, Gao J, Ailawadhi V. Protocols for Self-organization of a Wireless Sensor Network[J]. IEEE Personal Communications, 2000, 7(5):16-27
- [18] Heinzelman W R, Chandrakasan A P, Balakrishnan H. An application-specific protocol architecture for wireless micro sensor networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2002, 1(4):660-670
- [19] Manjeshwar A, Grawal D P. TEEN: A Routing Protocol for Enhanced Efficiency in Wireless Sensor Networks[C]// Proceedings of the 15th International Parallel and Distributed Processing Symposium. San Francisco, USA; IEEE Computer Society, 2001:2009-2015
- [20] Lindsey S, Raghavendra C S. PEGASIS: Power-efficient gathering in sensor information systems [C] // Proceedings of the IEEE Aerospace Conference. 2002:1125-1130
- [21] Gupta I, Riordan D, Sampalli S. Cluster-head election using fuzzy logic for wireless sensor networks[C]// Proceedings of the 3rd Annual Communication Networks and Services Research Conference. Halifax, IEEE Computer Society, 2005:255-260
- [22] Heinzelman W, Chandrakasan A, Balakrishnan H. Energy efficient Communication Protocols for Wireless Sensor Networks [A]//IEEE Proceedings of the Hawaii International Conference System Sciences'00[C]. 2000:3005-3014

(上接第 102 页)

的要求,充分利用工业环境中部分节点有线供电的优势,减少关键位置节点因大量进行数据转发使网络出现能量黑洞的可能性,从而延长无线网络整体生存时间。

仿真结果证明,基于 VCR 的路由算法通过结合最小跳数路由算法与节能型路由算法的优点,针对 WIA-PA 网络中不同的 VCR 应用不同的路由算法,实现管理报文转发的延迟低、数据报文转发能耗低,符合工业无线应用的要求。进一步的研究将重点评价算法的收敛速度问题,以便适应大规模的工业无线网络应用。

## 参考文献

- [1] 曾鹏,于海斌. 工业无线网络 WIA 标准体系与关键技术[J]. 自动化博览,2009(1):24-27
- [2] 王太峰,林珂,范乐昊. IEEE802. 15. 4 标准的无线传感器网络自组网方案[J]. 信息技术,2009(2):30-35
- [3] Freescale semi-conductor [S]. 802. 15. 4 MAC/PHY software user's guide,2005
- [4] Freescale semi-conductor [S]. 802. 15. 4 MAC/PHY software reference manual,2005
- [5] Zheng Jiang-liang, Lee M J. Will IEEE802. 15. 4 Make ubiquitous networking a reality: A discussion on a potential low power, Low bit rate[J]. IEEE Communication Mag, 2004, 42(6):140-146
- [6] 梁炜,李强. 无线 HART 网络管理器的开发与应用[J]. 中国仪器仪表,2008(S1):153-156
- [7] 王俊. HART 通讯协议简介[J]. 气体分离,2006,(6):35-36
- [8] 王华,刘枫,杨颂华. 工业无线网络 WIA-PA 网络研究与设计[J]. 自动化与仪表,2009(7):17-21
- [9] 张丹,刘枫,杨颂华. WIA-PA 中自适应心跳协议的研究与设计[J]. 控制系统,2009(8):1-4
- [10] 冀翔宇,冯冬芹. 低功耗工业无线传感器网络的设计与实现[J]. 化工自动化及仪表,2008,35(4):47-50
- [11] 王磊,李增荣. 低功耗无线传感器网络节点的设计[J]. 电脑知识与技术,2009,5(1):74-76