

# 基于 LQI 均值的 WIA-PA 网络路由算法研究\*

文政颖, 翟红生

(河南工程学院 计算机学院, 郑州 451191)

**摘要:** WIA-PA 网络环境通常恶劣、干扰因素多,对网络路由质量的要求比较高,在以往的 WIA-PA 网络路由研究策略中没有考虑到链路质量因素。本文为了避免 WIA-PA 网络中链路质量差的路径转发数据,在 AODV 路由算法的基础引入了链路质量 WMRWMA 算法。并针对 WMRWMA 算法的不足通过 LQI 均值对 WMEWMA 优化,提出了一种主动和被动结合适合 WIA-PA 网络的路由算法。通过实验验证,本文提出的方法吞吐量比 AODV 算法提高了 13%,丢包率上比 AODV 算法降低了 10%,更适合 WIA-PA 网络环境。

**关键词:** WIA-PA; LQI 链路质量; AODV

**中图分类号:** TP11

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1672-6693(2014)04-0115-06

随着信息技术的快速发展,工业控制系统已进入了网络化、智能化时代。无线网络技术逐渐发展成熟并开始进入工业自动化领域,以降低生产成本和提高产品质量。国内外正同步开发工业无线技术。其中国外主要有:ISA SP100、Wireless HART;国内主要有 WIA-PA 技术,并已列入 IEC 国际标准。WIA-PA(Wireless networks for industrial automation-process automation)技术是中国 863 项目支持下自主研发的适用于过程自动化的工业无线网络技术。WIA-PA 是一项新兴技术,其路由技术还处于研究中。WIA-PA 主要应用在工业控制领域,对网络的可靠性和实时性都有较高要求。而实际的工业环境都十分恶劣,干扰因素复杂多样,对网络的链路质量会造成一定影响。链路质量对网络通信的效率和可靠性又具有十分重要的意义。因此在研究路由协议的过程中,将链路质量作为考虑因素是保证整个网络可靠实时通信的关键技术之一。文献[1-4]中,基于 RSSI、SNR 等链路质量度量方法简单、开销小、反应迅速,但在整个网络中对芯片自身的依赖性比较强,准确性低,所以不适合用在 WIA-PA 网络中。在文献[5-9]中,提出了基于 ETX、ETT、WMEWMA 链路质量的算法,这些算法能够准确反应当前的链路质量。并且 WMEWMA 算法复杂度比较低、所需存储空间较小,较适合在节点上应用。但这些算法都不能把网络能耗和链路质量度量同时考虑在内,且在大量突发性链路的网络环境中,不能迅速反应链路质量的变化,而网络能耗和链路质量对 WIA-PA 网络来说极为重要,由于 WIA-PA 网络应用环境极其恶劣,所以上述文献中提出的算法不能直接应用于 WIA-PA 网络。本文根据 WIA-PA 在工业应用上的需求,针对 AODV 仅以最小跳数作为路由依据的不足,引入了链路质量度量的思想,提出了一种主动和被动结合适应 WIA-PA 网络的路由算法。

## 1 WIA-PA 网络

WIA-PA 工业无线网络技术是用于过程自动化的工业无线网络系统结构与通信规范。WIA-PA 网络与国际上比较流行的无线工业网络 Wireless HART 和 SP 100 网络结构不同。它是由 Star 层网络和 Mesh 层网络两种拓扑结构组成,物理结构图如图 1 所示。Star 网络主要由路由设备、现场设备及手持设备组成,其中路由设备相当于星形网络中的簇首节点,现场设备和手持设备是星形网络中的簇内节点。而 Mesh 层网络则是由网关设备和路由设备构成。

一个完整的 WIA-PA 网络是由 5 种物理设备和 2 种逻辑设备<sup>[10]</sup>功能构成(图 1):主控计算机;用户、维护人

\* 收稿日期:2013-12-21 修回日期:2014-04-10 网络出版时间:2014-7-3 23:03

资助项目:河南省科技计划项目(No. 122300410128)

作者简介:文政颖,女,讲师,研究方向为计算机应用与数据库技术, E-mail: wenzy1979@126.com

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/50.1165.N.20140703.2303.023.html>

员和管理者与 WIA-PA 网络交互的平台。现场设备:是指安装在工业现场,装有传感器或执行器的直接连接生产过程的设备。路由设备:主要是指负责现场设备管理及数据聚合、转发等功能。手持设备:配置网络设备和监测网络性能等主控应用,以 WIA-PA 网络设备的身份加入网络<sup>[10]</sup>。网关设备:主要是指负责 WIA-PA 网络与其它工厂网络互连的设备。网络管理者:是一种逻辑设备,主要负责整个网络通信资源的分配,路由间通信的调度以及全网性能的监测。

安全管理者:负责路由设备及终端设备的密钥管理与安全认证<sup>[11]</sup>,保证整个网络的通信安全。

WIA-PA 网络主要由 Star 网络和 Mesh 网络组成,Star 网络层设备没有路由功能,所以路由功能主要集中在 Mesh 层网络。Mesh 层网络结构和无线传感器网络 Ad-hoc 网络结构比较相似,但是如果将用于 Ad-hoc 网络的路由协议直接用于 WIA-PA 网络存在着不足,因为 WIA-PA 网络主要用于工业现场,通常对网络的可靠性、能耗要求比较高。本文在 WIA-PA 网络特征的基础上将链路质量指标 LQI 引入到 AODV 路由算法中,提出一种新的适合于 WIA-PA 网络的路由算法。

## 2 基于 AODV 的 WIA-PA 网络路由可靠性策略

本文引入了链路质量度量思想来解决 AODV 应用在 WIA-PA 网络仅以最小跳数作为路由依据不能满足网络通信可靠性的需求,同时针对链路质量度量算法 WMEWMA 存在对突发链路反应不灵敏、能耗较大等问题,在 WIA-PA 中引入 LQI 均值对链路质量变化进行有效感知,并采用链路质量指示均值模型对 WMEWMA 算法进行优化。

### 2.1 AODV 路由协议

AODV 路由协议是一种典型的按需路由协议,它结合了 DSDV 和 DSR 路由协议的特征。AODV 采用了 DSR 算法中路由发现和路由维护两功能及 DSDV 算法中的顺序编号、逐跳路由和路由维护阶段的周期更新机制。AODV 协议让源节点能够快速准确地获取到目的节点的路由信息,如果某个路由在当前网络通信过程中不处于活跃状态,那么源节点将不对其信息进行维护或更新,同时 AODV 路由协议能够对网络拓扑结构变化及链路断开情况及时反应,由于 WIA-PA 网络是工业无线网络,其被应用到工业现场之后,某个节点出现故障或能量耗尽工作人员很少去维护,所以 AODV 路由算法的这些特性比较适合 WIA-PA 网络。同时在 AODV 路由算法协议路由表中,每个项都有其目的序列号,这样可以避免环路的发生,且比较容易编程实现。

AODV 算法的通信主要过程如图 2 所示:1)源节点发起通信请求后,如果路由表中已经存在到达目的节点的有效路由路径,AODV 路由算法将不会对路由表进行任何操作;2)如果源节点在路由表中没有查找到目的节点的路由路径信息,则启动路由发现过程,AODV 路由协议通过洪泛 RREQ 消息查找新的到达目的节点的路由路径;3)如果洪泛 RREQ 到达某一个拥有到达目的节点的有效路由信息的中间节点或目的节点,则目的节点或中间节点通过原路返回一个泛洪 RREQ 信息,来向源节点确定该路由的可用性。

AODV 应用在 WIA-PA 网络仅以最小跳数作为路由依据不能满足网络通信可靠性的需求,在转发 AODV

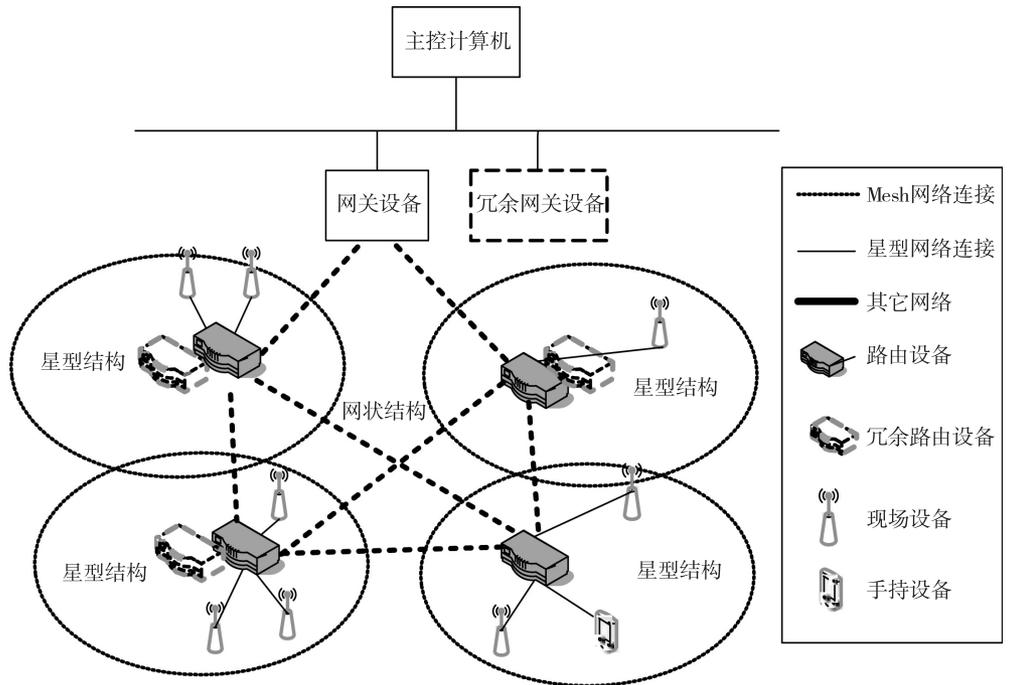


图 1 WIA-PA 网络物理结构<sup>[11]</sup>

路由协议的基础上引入链路质量度量算法 WMEWMA,避免在 WIA-PA 网络中通过链路质量差的路径进行数据传送。

### 2.2 WMEWMA

WMEWMA (Windowmean with exponentially weighted moving average)是通过预测机制来估计网络中链路质量的路由算法,该算法主要采用包接收率作为网络链路衡量指标。而包接收率是反映链路质量最为直观的指标。

WMEWMA 移动窗口指数加权平均法,该算法通过计算周期  $t$  内的平均链路质量,进而利用  $\alpha \in [0, 1]$  对其进行平滑,该数学模型可表示为<sup>[17]</sup>

$$P_t = \alpha P_{t-1} + (1-\alpha)P_{\text{current}}$$

其中  $P_{\text{current}}$  是指当前实际接收到的报文个数与发送的总报文个数之比,其意义表示实际测量得到的当前周期的分组接收率。

链路质量度量算法 WMEWMA 存在对突发链路反应不灵敏、能耗较大等问题,在 WIA-PA 中引入 LQI 均值对链路质量变化进行有效感知,并采用链路质量指示均值模型对 WMEWMA 算法进行优化。

### 2.3 基于链路质量的 WIA-PA 网络 AODV 路由算法

本文引入了链路质量度量思想来解决 AODV 应用在 WIA-PA 网络仅以最小跳数作为路由依据不能满足 WIA-PA 网络通信可靠性的需求,同时针对链路质量度量算法 WMEWMA 存在对突发链路反应不灵敏,能耗较大等问题,在 WIA-PA 中引入 LQI 均值对链路质量变化进行有效感知,并采用链路质量指示均值模型对 WMEWMA 算法进行优化。在此基础上,提出了新的适合于 WIA-PA 网络的基于链路质量的路由策略。链路质量度量采用均值模型优于 WMEWMA 算法,以解决该算法需要发送大量探测包所带来的时延和网络开销的问题。流程图如图 3 所示<sup>[18]</sup>。

1)计算当前包接收率  $P_{\text{current}}$  的值<sup>[19]</sup>

$$\overline{(LQI)} = \begin{cases} 0, & LQI \geq 100 \\ -1 \times 10^{-6} (\overline{LQI})^3 + 0.0656 (\overline{LQI}) - 4.1948, & 70 \leq \overline{LQI} < 100 \\ 0, & 0 \leq \overline{LQI} < 70 \end{cases} \quad (1)$$

$$\sigma_{LQI} = 0.1623 \times \overline{(LQI)} - 0.001 \times (\overline{(LQI)})^2 - 5.3432 \quad (2)$$

$$P_{\text{current}} = \frac{2}{\sqrt{2\pi} \times \sigma_{LQI}} \int_0^p \frac{(P_{\text{current}} - \overline{LQI})^2}{2(\sigma_{LQI})^2 e^2} dp \quad (3)$$

其中  $\overline{LQI}$  表示一个统计周期内 LQI 均值,  $\overline{LQI}$  表示的是分组接收率的均值,  $\sigma_{LQI}$  表示的是分组接收率的标准差,  $P_{\text{current}}$  表示的是当前实际的分组接收率的值。由(1)、(2)式得到的结果,通过(3)式计算得到当前的包接收率。

2)根据(4)式通过 Step1 计算得到的包接收率和历史链路质量估计值  $P_{t-1}$  计算得到链路质量估计值

$$P_t = \alpha P_{t-1} + (1-\alpha)P_{\text{current}} \quad (4)$$

其中  $P_{t-1}$  表示历史的估计值,  $P_{\text{current}}$  表示当前的包接收率,  $\alpha \in [0, 1]$  是平滑因子。根据链路质量度量的结果进行路由选择,当发现链路质量度量值小于 15% 时,表示该段路径链路质量差,则在路由选择中绕过该条路径。

当 WIA-PA 网络中的中间节点接受到 RREQ 路由请求时,判断  $\overline{LQI}$  值。如果节点的  $\overline{LQI}$  值指示在正常水平,则不会对链路质量进行预测,WIA-PA 网络路由算法仍以最小跳数进行选择。当前节点的  $\overline{LQI}$  值波动较大

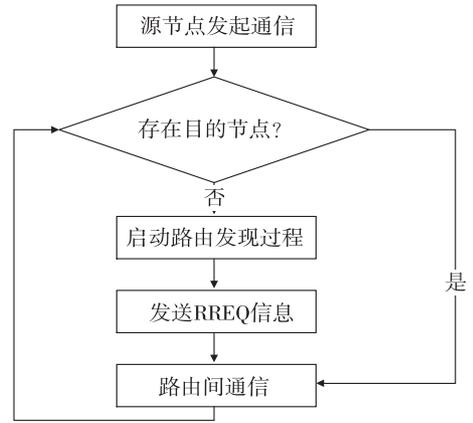


图 2 AODV 路由协议通信流程图

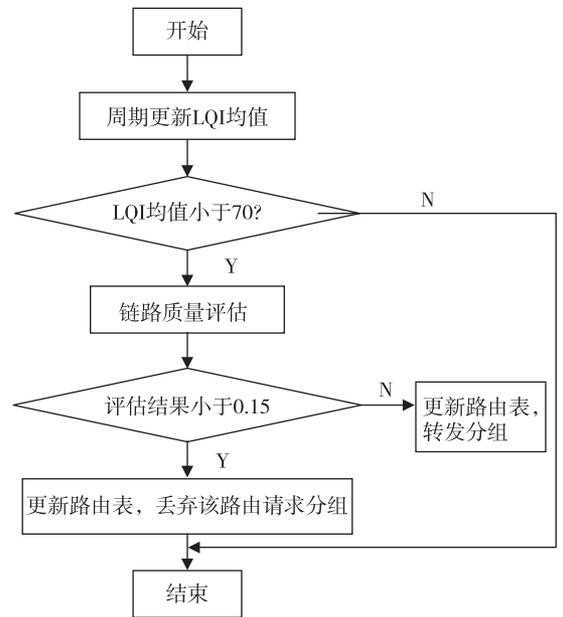


图 3 链路质量评估流程图

时,根据  $LQI$  值对 WIA-PA 网络链路质量进行评估。如果链路质量评估结果  $P_i$  值小于 15% 的链路,则丢弃该 RREQ 分组,否则更新 WIA-PA 网络路由表,之后转发一个 RREQ 消息。及时避开链路质量比较差的路径,在一定程度上保证了 WIA-PA 网络通信的实时性,因此提高了 WIA-PA 网络通信的可靠性。

该算法路由维护由主动发送 Hello 探测包和被动发送 Hello 探测包相结合的方式。当  $LQI$  均值指示节点间的链路波动大时,主动发送 Hello 包进行探测和路由维护过程。当  $LQI$  均值指示链路质量稳定时,等待周期性的路由维护广播包进行探测和维护路由。

### 3 验证

本文采用 NS2 无线网络仿真工具,协议层采用 IEEE802.15.4 模型。采用 50 个网络节点,节点的初始能量为 15 J,发射功率设为 0.8 w,接收功率设为 0.8 w,仿真时间为 400 s。

对吞吐量和丢包率与 AODV 比较,在刚开始 40 s 内,本文提出的算法在吞吐量上和 AODV 没差别,但随着时间的增大本文提出的算法优于 AODV 算法 13% 左右(表 1)。

在通信初本文提出的算法与 AODV 的丢包率接近,但随着一段时间的通信,本文提出的算法的丢包率明显优于 AODV。通过对数据包的丢包率分析,证实本文所提算法能够降低 AODV 算法 10% 左右的丢包率(表 2)。

综上所述,该算法在网络吞吐量上比 AODV 算法提高了 13% 左右,且在丢包率上比 AODV 降低了 20% 左右,从而验证了本路由策略更适用于 WIA-PA 工业无线网络。

### 4 总结

无线工业网络的应用越来越广泛,WIA-PA 作为无线工业网络的一种,它对可靠性、低能耗等要求比较高。路由技术是无线工业网络中的一个关键技术。本文针对 WIA-PA 网络高可靠性、高实时性、低能耗的要求,深入分析了现有的路由协议,在 AODV 路由协议的基础上引入了链路质量度量的思想。针对现有链路质量度量 WMEWMA 算法的不足,采用了  $LQI$  均值对链路质量的变化进行实时感知;提出了利用链路质量指示均值模型对 WMEWMA 算法进行优化的节点间链路质量度量方法;改进了 AODV 的路由维护策略,采用了主动和被动相结合的路由维护策略。最终提出了一种主动和被动结合适应 WIA-PA 网络的路由算法,该算法实现简单,执行效率高,在能量消耗不大的情况保证了网络通信的可靠性和实时性。最后仿真表明,该算法在网络吞吐量上比 AODV 算法提高了 13% 左右,且在丢包率上比 AODV 降低了 10% 左右,从而验证了本路由策略更适用于 WIA-PA 工业无线网络。

#### 参考文献:

- [1] Alizai M H, Landsiedel O, Link J A B, et al. Bursty traffic over bursty links[C]//Proc of the 7th ACM conf on embedded networked sensor systems (SenSys). New York: ACM, 2009.
- [2] Srinivasan K, Levis P. Rssi is under appreciated[C]//Proc of the 3rd workshop on embedded networked sensors (EmNets). Cambridge: Harvard University, 2006: 1-5.
- [3] Lu M, Steenkiste P, Chen T. Design, implementation and evaluation of an efficient opportunistic retransmission protocol[C]//Proc of the 15th annual international conference on mobile computing and networking (MobiCom). Beijing, China: ACM, 2009.
- [4] Lui T, Kamthe A, Jiang L, et al. Performance evaluation of link quality estimation metrics for static multihop wireless sensor networks[C]//Sensor, Mesh and Ad Hoc communications and networks, 2009. SECON '09. 6th Annual IEEE Communications Society Conference. [S. L.]: [s. n.], 2009.
- [5] Couto D S J D, Aguayo D, Bicket J, et al. A high-throughput path metric for multi-hop wireless routing[C]//Proc of the 9th annual international conference on mobile computing and net-

表 1 本文提出算法与无线自组网按需平面距离矢量路由算法吞吐量比较

算法	运行时间/s										
	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200
AODV	0%	45%	48%	49%	50%	52%	48%	51%	44%	42%	43%
本文算法	0%	50%	58%	57%	58%	63%	59%	57%	51%	50%	49%

表 2 本文提出算法与无线自组网按需平面距离矢量路由算法丢包率比较

算法	节点移动 (n/s)					
	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1
AODV	0.05%	0.05%	0.12%	0.17%	0.23%	0.28%
本文算法	0.04%	0.05%	0.07%	0.15%	0.19%	0.25%

- working(MobiCom). San Diego, CAUSA: ACM, 2003.
- [6] Woo A, Tong T, Culler D. Taming the underlying challenges of reliable multihop routing in sensor networks [J]. Proceedings of ACM SenSys, 2003, 3:14-27.
- [7] Becher A, Landsiedel O, Kunz G, et al. Towards short-term wireless link quality estimation[C]//Hot EmNets[S. L. ]: [s. n. ], 2008: (20-25).
- [8] Cale M, Paura L. Bio-inspired link quality estimation for wireless mesh networks[J]. IWoWMoM, 2009, 3(4):47-51.
- [9] 张宇薇, 黄河明. 未来的网络集成技术——第三层交换技术[J]. 四川师范大学学报:自然科学版, 2003, 26(3):313-314.  
Zhang Y W, Huang H M. Layer 3 switching: The network integration technology in the future[J]. Journal of Sichuan Normal University: Natural Sciences, 2003, 26(3):313-314.
- [10] Lui T, Kamthe A, Jiang L, et al. Performance evaluation of link quality estimation metrics for static multihop wireless sensor networks[J]. SECON, 2009, 2(1):34-38.
- [11] 梁炜, 张晓玲. 第十四章 WIA-PA: 用于过程自动化的工业无线网络系统结构与通信规范[J]. 仪器仪表标准化与计量, 2009(2):30-36.  
Liang W, Zhang X L. Chapter 14: WIA-PA: system architecture and communication protocol of industrial wireless network for process automation [J]. Instrument Standardization and Metrology, 2009(2):30-36.
- [12] 岳飞艳. WIA-PA 簇信道分配算法研究[D]. 重庆: 西南大学, 2010.  
Yue F Y. Research on cluster channel allocation in WIA-PA[D]. Chongqing: Southwest University, 2010.
- [13] 曾鹏. 工业无线技术的标准化与应用[J]. 中国仪器仪表, 2008(3):40-44.  
Zeng P. Standardization and application of industrial wireless[J]. China Instrumentation, 2008(3):40-44.
- [14] 林跃, 张建华. 工业通信网络及系统技术[J]. 自动化与仪表, 2009, 24(7):22-30.  
Lin Y, Zhang J. Industrial communication network and system technology[J]. Automation and Instrumentation, 2009, 24(7):22-30.
- [15] 王华. 工业无线网络节能路由算法研究[D]. 重庆: 西南大学, 2010.  
Wang H. Research of energy-saving routing algorithm for industrial wireless networks [D]. Chongqing: Southwest University, 2010.
- [16] 张倩, 丁根宏. 求解 PDPTW 的混合分组编码智能算法[J]. 重庆理工大学学报:自然科学版, 2012, 26(11):71-72.  
Zhang Q, Ding G H. Hybrid grouping intelligent algorithm for the pickup and delivery problem with time Windows[J]. Journal of Chongqing University of Technology: Natural Sciences, 2012, 26(11):71-72.
- [17] 彭喜元, 潘大为. 彭宇无线传感网络多时间尺度链路估计算法研究[J]. 电子学报, 2011, 39(3):82-84.  
Peng X Y, Pan D W, Peng Y. On multiple time scales link estimation in wireless sensor network[J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(3):82-84.
- [18] 何柳. 基于链路质量度量的工业无线网络路由策略研究[D]. 重庆: 西南大学, 2012.  
He L. Research of routing algorithm based on link quality for industrial wireless networks [D]. Chongqing: Southwest University, 2012.
- [19] 朱剑, 赵海, 张喜元, 等. 基于 LQI 量度的无线链路质量评估模型[J]. 东北大学学报, 2008, 29(9):1262-1265.  
Zhu J, Zhao H, Zhang X Y, et al. LQI-based evaluation model of wireless link[J]. Journal of Northeastern University, 2008, 29(9):1262-1265.

## Research of WIA-PA Network Routing Algorithm Based on LQI Mean

WEN Zhengying, ZHAI Hongsheng

(College of Computer Science, Henan Institute of Engineering, Zhengzhou 451191, China)

**Abstract:** Wireless industry environment is usually quite poor and multi-interference factors, so the quality of the network routing requirements are relatively high. WIA-PA network routing algorithm does not take into account the Link Quality Indication. In this paper, the introduction of the link quality WMRWMA based on AODV routing algorithm avoid WIA-PA network link quality path forwarding data. The optimization by LQI to WMEWMA based on the deficiency of the WMRWMA algorithm, this paper presents a routing algorithm combined with active and passive, which is suited for WIA-PA network. Verified by experiment, the proposed method is 13% higher than AODV algorithm on the throughput, and is 10% lower than AODV algorithm on the packet loss rate, which is more suitable for WIA-PA network.

**Key words:** WIA-PA; LQI link quality; AODV