

基于工业无线网络性能评价的规划路径算法

易秀双 罗守昊 王兴伟 丁际文

(东北大学信息科学与工程学院 沈阳 110819)

摘要 针对路由节点查找消息路径的局限性,提出了一种网关设备规划消息路径的算法。该算法结合工业无线网络通信数据的规律性,在考虑时延、能耗、可靠传输和负载均衡方面的性能综合评价之后,找出一种路径组合,避免消息拥塞和干扰,提高通信性能。然后,设计了仿真实验来对比规划路径与 AODV 查找路径两种情况下的通信性能。实验结果证明,规划的消息路径下的通信性能更好。

关键词 工业无线网络,性能评价,消息路径,仿真实验

中图分类号 TP393 **文献标识码** A

Planning Paths Algorithm Based on Performance Evaluation of Industrial Wireless Networks

YI Xiu-shuang LUO Shou-hao WANG Xing-wei DING Ji-wen

(College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

Abstract Against limitations for routing nodes to lookup message routing, this paper brought forward an algorithm by which the gateway device plans the message paths. The algorithm combines the regularity of the industrial wireless network communication data, finds a path combination, after considering performance comprehensive evaluation in the delay, power consumption, reliable transmission, and load balance, in order to avoid messages' congestion and interference and improve communication performance. And then, a simulation was designed to compare the paths with AODV and the paths planned overall. The simulation results show that overall planning the paths of messages can make the communication better.

Keywords Industrial wireless network, Communication performance evaluation, Message path, Simulation

1 引言

随着半导体、微电子、通信和计算机技术的飞速发展,无线传感器网络技术取得了巨大的进步。无线传感器网络能够获取多种客观物理信息,而被应用在军事国防、工农业控制、城市管理、生物医疗、环境监测、抢险救灾等诸多领域,尤其是在恶劣环境下的工业现场设备监测中。

在无线传感器网络中,路由协议负责将数据分组从源节点通过网络转发到目的节点。路由的关键是要寻找源节点到目的节点间通信延迟较小的路径,提高整个网络的利用率,避免通信拥塞并均衡网络流量。路由的实现离不开网络管理者对通信资源的分配,通信资源的分配效率将直接影响网络各方面的性能。

随着无线传感器网络技术的发展,出现许多专门针对无线传感器网络的路由协议^[1-4],并且应用于工业无线网络。根据应用目标的不同,这些路由协议大致可分为 4 种类型:能量感知路由协议、基于查询的路由协议、地理位置路由协议和可靠路由协议。

2 路由节点执行算法的局限性

本文主要研究频繁通信的工业无线网络,在节点位置固定的情况下,着重从负载均衡和可靠传输入手,整体规划消息路径的问题。路由节点在执行算法的时候,都是从当前其各种条件限制下为自己的消息找出一个最理想的路径,但从时间上和空间上来看都有一定的局限性,只考虑到局部的情况,没有从整体上找出最优的路径。下面列举一些由于局限性而导致的网络整体通信非最优化的问题。

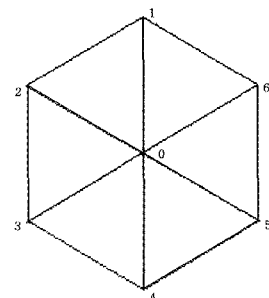


图 1 路由节点分布图

收稿日期:2012-02-20 返修日期:2012-07-14 本文受国家自然科学基金项目(61070162, 60903159), 国家高技术研究发展计划重点项目(2007AA041201), 国家科技支撑计划项目(2008BAH37B05), 中央高校基本科研业务费项目(N110216001)资助。

易秀双(1969-),男,副教授,主要研究方向为计算机网络、数据处理, E-mail: xsyi@mail.neu.edu.cn; 罗守昊(1984-),男,硕士生,主要研究方向为工业无线网络; 王兴伟(1968-),博士,教授,博士生导师,主要研究方向下一代互联网、自组织网络、IP/DWDM 光 Internet、移动无线 Internet、网络信息安全和网格计算等; 丁际文(1982-),男,助理工程师,主要研究方向为计算机网络、数据处理等。

时间局限性。图 1 示出无线网络中的一部分结构,中间节点 0 的通信负载比较大,剩余能量不多。一条消息 A 经过 8 跳到达节点 1,目的是节点 4;一条消息 A 经过 1 跳到达节点 1,目的是节点 4。两条消息只能有 1 个通过节点 0,会出现如下两种情况。

第一种情况,消息 A 到达节点 1 的时间比消息 B 到达的时间早,那么消息 A 的路径为 1-0-4,消息 B 的路径为 1-2-3-4 或者 1-6-5-4。

第二种情况,消息 B 到达节点 1 的时间比消息 A 到达的时间早,那么消息 B 的路径为 1-0-4,消息 A 的路径为 1-2-3-4 或者 1-6-5-4。

下面分析两种情况的通信优劣,消息 A 的最少跳数为 10,消息 B 的最少跳数为 3;比较第一种情况和第二种情况的消息路径绕远程度((实际跳数-最少跳数)/最少跳数),如表 1 所列。

表 1 时间局限下绕远程度比较

消息	最少跳数	第一种情况跳数	第一种情况绕远程度	第二种情况跳数	第二种情况绕远程度
A	10	10	0	11	0.1
B	3	4	0.33	3	0

第一种情况下消息 B 绕远程度为 0.33,第二种情况下消息 A 绕远程度为 0.1,那么哪个情况更理想呢?在现实生活中,当一个人要去距离 1000 米的地方时,实际走了 1100 米,并不算绕远;但是,去距离 300 米的地方,实际走了 400 米,就觉得绕远。因此,第二种情况消息 A 绕远程度 0.1 明显比第一种情况好。从时间上来看,路由设备不知道后面的通信情况,也就无法做出最优判断。

空间局限性。如图 1 所示,和问题 1 一样,在无线网络的一部分结构中,中间节点 0 的通信负载比较大,剩余能量不多。一条消息 A 经过 8 跳到达节点 1,目的是节点 4;一条消息 B 经过 1 跳到达节点 2,目的是节点 5。两条消息只能有 1 个通过节点 0,会出现如下两种情况。

第一种情况,消息 A 到达节点 1 的时间比消息 B 到达节点 2 的时间早,那么消息 A 的路径为 1-0-4,消息 B 的路径为 2-3-4-5 或者 2-1-6-5。

第二种情况,消息 B 到达节点 2 的时间比消息 A 到达节点 1 的时间早,那么消息 B 的路径为 2-0-5,消息 A 的路径为 1-2-3-4 或者 1-6-5-4。

下面分析两种情况的通信质量,消息 A 的最少径跳数为 10,消息 B 的最少跳数为 3;比较第一种情况和第二种情况的消息路径绕远程度,如表 2 所列。

表 2 空间局限下绕远程度比较

消息	最少跳数	第一种情况跳数	第一种情况绕远程度	第二种情况跳数	第二种情况绕远程度
A	9	9	0	10	0.11
B	3	4	0.33	3	0

第一种情况下消息 B 绕远程度为 0.33,第二种情况下消息 A 绕远程度为 0.1,第二种情况消息 A 绕远程度 0.1 明显比第一种情况好。从空间上来看,路由设备不知道别的路由设备的通信情况,也就无法做出最优判断。

消息拥塞。图 2 中,短时间内,中间部分的节点 0-6 所组成的路径传递很多消息,有些消息在排队,有些消息丢失,如

果有新消息到来走节点 0 显然是不合适的,从旁边绕过去,虽然多走一段路径,但是时间上节省很多。此外,中间节点频繁发送消息也容易造成干扰,影响通信质量。

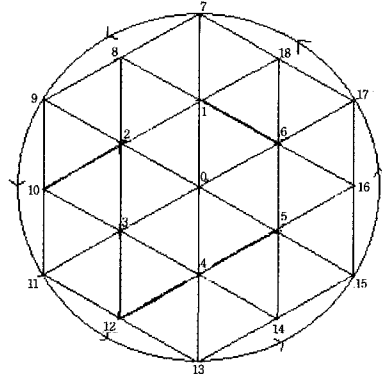


图 2 路由节点分布图

当局者迷。如图 2 所示,在无线网状网的一部分结构中,边缘的路由节点向对面传送消息,如果都经过中心节点,则对中间节点能耗很大,不利于负载平衡,并且由于通信频繁可能使消息拥塞,中间节点 0-6 都可能出现消息拥塞的情况,不利于消息及时到达。这就好比城市的交通,在高峰期避开车流量大的路段,司机通过收听路况信息来安排合适的交通路线。如图 2 所示,可以让消息逆时针绕过去,避开中间的繁忙区域。但是,采用这样的方法也面临很多方面的问题,什么样的消息要绕行、什么时间绕行、绕行路径怎么安排,这些问题是单个路由设备难以解决的。

3 整体规划路径

3.1 工业无线网络的特点

工业通信同普通数据网络通信相比有自己的特点。工业无线网络的覆盖范围有限,数据交换绝大多数都是周期性的^[5],现场设备之间的通信量和周期可以预先估计;工业网络数据分组较小,突发性小。工业网络的设计和数据库的设计有一些共性,但也有不同(例如:数据库通常以吞吐量和带宽利用率最大化为目标,而工业网络则以时延和可靠性为目标)。

在工业无线网络中,节点数量相对稳定,通信情况波动不大,可以从整体上对消息的路径进行规划。在一个工业生产周期中,大部分生产是流水线作业,每天的工业通信数据在初期到末期是基本一致的。因此,把初期的通信数据和节点的能量及传输率情况作为规划这个生产周期内消息路径的依据是可行的。再由网关设备执行算法,依据一段时间内对网络通信情况的统计,为每条消息设计合适的路径,然后生成一个路由表,每个路由节点都按照这个路由表来转发消息,使得网络整体通信达到最优状态。

3.2 网络性能评价

工业无线传感器网络性能的评价^[6],即 ITU-T 的第 13 研究组(Study Group 13, SG13)提出了 Y. 1540(原 I. 380)建议,其中定义了衡量 IP 网上 IP 分组传输性能的 4 个参数:速度(speed)、精确性(accuracy)、可靠性(dependability)、可用性(availability)。并定义了一系列性能指标,如传输时延、时延变化、包错误率、丢包率、虚假 IP 包率、包吞吐量、字节吞吐量等^[7-11]。

为每条消息设计路径,所有情况组合形成 m 个方案。有 n 个性能指标,使用线性加权的方法求出性能综合评价价值,计算公式为

$$S_i = \sum_{j=1}^n w_j y_{ij} \quad (1)$$

式中, $1 \leq i \leq m$; y 是第 i 个方案的第 j 个性能指标值; w 是性能指标 j 的权值,其和是 1; S_i 表示网络性能综合评价价值的大小, S_i 越大,表示网络性能越好; S_i 越小,表示网络性能越差。

对每个方案都进行性能指标的估算,绕远程度、可靠传输、总通信量和负载均衡是可以估算的指标,它们反映了通信的时间(网络畅通的情况下,路径越短时间越短)和可靠性、能耗和网络节点寿命,本文从这 4 个方面来评价一个方案的优劣。

3.3 变量计算及方案选取

在一个路径组合方案 i 中,首先,用一个向量表示每条消息的路径,向量的每个分量是网络中的路由节点,它包含了所有的路由节点。若消息经过某路由节点,则分量值为 1,否则分量值为 0。用一个向量表示网络中所有路由节点的通信量情况,计算公式如下:

$$STV = \sum_{i=1}^n MPV_i \times MST_i \quad (2)$$

式中, STV 是通信量情况的向量表示, MPV 是一条消息路径向量, MST 是一条消息的通信量, n 表示消息数量(按源和目的划分)。

网络所有路由节点的通信量总和计算公式如下:

$$ST = \sum_{i=1}^n STVC_i \quad (3)$$

式中, ST 表示通信量总和, $STVC$ 表示通信量向量的分量, n 是路由节点的数量。

实际路径长度计算公式如下:

$$APL = NMPVC - 1 \quad (4)$$

式中, APL 表示实际路径长度, $NMPVC$ 表示消息路径向量中值等于 1 的分量个数。

一条消息的绕远程度计算公式如下:

$$MDE = (APL - PL_{\min}) / PL_{\min} \quad (5)$$

式中, MDE 表示消息的绕远程度, APL 表示实际路径长度, PL_{\min} 表示最短路径长度。

所有消息的绕远程度总和计算公式如下:

$$SMDE = \sum_{i=1}^n MDE_i \times MN_i \quad (6)$$

式中, $SMDE$ 表示消息的绕远程度总和, MN 表示消息的通信次数,绕远程度总和最小值是 0。

绕远程度转变为路径性能指标,表示当前路径接近最短路径的程度,计算公式如下:

$$PI = (SMDE_{\max} - CSMDE) / SMDE_{\max} \quad (7)$$

式中, PI 表示路径指标, $SMDE_{\max}$ 表示绕远程度总和最大值, $CSMDE$ 表示当前绕远程度总和。

可靠传输指标表示当前可靠传输率接近最大可靠传输率的程度,计算公式如下:

$$RTI = (\ln CRT - \ln RT_{\min}) / (\ln RT_{\max} - \ln RT_{\min}) \quad (8)$$

式中, RTI 表示可靠传输指标, CRT 表示当前可靠传输率, RT_{\max} 表示可靠传输率最大值, RT_{\min} 表示可靠传输率最小值。

能耗指标表示当前能耗接近最小能耗的程度,计算公式

如下:

$$ECI = (ST_{\max} - CST) / (ST_{\max} - ST_{\min}) \quad (9)$$

式中, ECI 表示能耗指标, CST 表示当前通信量总和, ST_{\max} 表示通信量总和最大值, ST_{\min} 表示通信量总和最小值。

为了使网络中节点的寿命更长,应该让剩余能量多的路由节点承担更多的通信量,这样匹配是最理想的。匹配程度计算公式如下:

$$MD = \sum_{i=1}^n NRE \times NT \quad (10)$$

式中, NRE 表示结点剩余能量, NT 表示结点通信量。

负载均衡指标表示当前负载接近最佳匹配的程度,计算公式如下:

$$LBI = (CMD - MD_{\min}) / (MD_{\max} - MD_{\min}) \quad (11)$$

式中, LBI 表示负载均衡指标, CMD 表示当前匹配值, MD_{\max} 表示匹配最大值, MD_{\min} 表示匹配最小值。

最后计算这个方案的综合评价价值:

$$S_i = w_1 \times PI + w_2 \times RTI + w_3 \times ECI + w_4 \times LBI \quad (12)$$

权值之和为 1,每个权值如何分配要依据具体的生产情况而定。例如,汽车制造车间里的设备节点更换电池方便,对能量的依赖不是很强,可以把权值取小一些,只要保证节点的能量能够满足一个生产周期的需要即可。

把每一路径组合方案的评价值都计算出来,同时避免一段路径被频繁占用,可能产生消息拥塞。综合评价最大的方案就是最优的,然后生成一个路由表存储到每个路由节点中。综合评价第二和第三的方案,也生成路由表作为备用。

3.4 计算方法简化

这样计算过程把所有消息的路径情况都考虑进来,方案数量太大,计算过于复杂,下面介绍如何减少方案数量,简化计算过程。

首先,对消息进行筛选,通过统计的数据找出哪些消息出现了前面提到的局限性。这些消息的路径要进行重新规划,其余的消息没有生产局限性,还按照原路由协议进行转发。

其次,通信量大的消息是重点,这样的消息路径如果变动,对网络的影响较大。因此,先规划通信量大的消息路径,后规划通信量小的消息路径。这同建筑时水泥挤在石头之间是一个道理。

短距离消息路径选择少,而且路径多一跳对绕远程度的增加很明显。长距离消息路径选择多,而且路径多一跳对绕远程度增加不明显。因此,先规划短消息路径,后规划长消息路径。

可以把绕远程度限制在 40% 以下,以图 2 的情况为例,中间节点的剩余能量较少。消息按照源和目的划分,返回的消息也走相同的路径。最短路径长度是 1 的消息,即源和目的是相邻节点的消息,那么路径是最短路径不变。最短路径长度是 2 的消息有 33 条,那么路径是最短路径。最短路径长度是 3 的消息有 12 条,那么路径长度取值是 3 或 4,绕路要尽量避开中心节点 0-6,组合情况 $2^6 \times 3^6$ 种。最短路径长度是 4 的消息有 3 条,那么路径长度取值是 4、5、6,组合情况 5^3 种。这是根据节点的分布情况进行的简化计算。

换个角度思考工业无线网络的优化问题,节点的剩余能量为哪条消息,服务更好。

第 1 步 把路径不变的消息先划分出来,它们消耗一部分能量,这是不可避免的。

第2步 在剩余消息中,划分出路径长度最短的一条消息,因为短距离消息的路径变化少,而且绕远付出的时间和路径代价相对较大,所以先找短距离消息的路径。其余消息看成一条大消息,那么就是这两条消息瓜分节点的剩余能量。小消息的几种路径情况容易找出,大消息的路径情况比较复杂。大消息的路径向量的分量取值范围是这样确定:首先,每条消息的最短路径组合是下限,每条消息的最长路径组合是上限;然后,路由节点为最少消息服务时,该分量取得最小值,路由节点为最多消息服务时,该分量取得最大值;接下来,每个分量取值变化形成的组合在上限和下限范围之内的大消息的路径情况;最后,已经确定路径的消息也要考虑进来,并且应避免某段路径被频繁使用,即把占用小段路径频数过多的方案丢弃,把它们和这两条消息按照综合评价的方法一起计算,确定小消息的路径。

第3步 如果消息路径都确定了,那么最优方案就找出了;否则继续执行第2步。

第4步 依据最优路径组合方案生成路由表。这样的简化计算方法只能生成一个路由表,没有备用的路由表,可以把最短路径构成的路由表作为备用路由表。

4 仿真实验

用 ns2^[19] 平台进行仿真实验,节点布置如图3所示。为了突出实验效果,把该网络设计成一个局部频繁通信的无线网络,节点的能量和可靠传输率都是相同的。进行两次实验,分别用 AODV 协议查找路径和网关设备规划路径两种算法确定消息的路径,测试丢包数(计算丢包率)、吞吐量、时延,实验环境设置如表3所列。

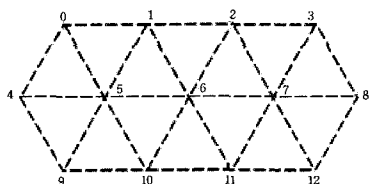


图3 路由节点分布图

表3 仿真参数设置

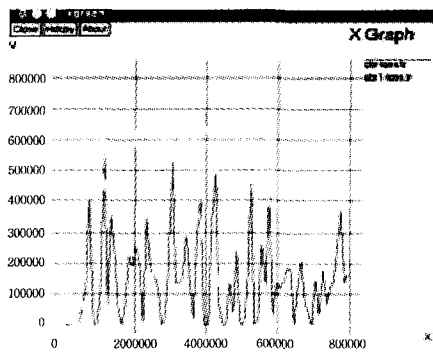
参数	值
网络区域	600m×600m
路由节点数	13
节点间距	150m
传输半径	200m
MAC 协议	802.11
路由协议	AODV
仿真时间	80s

设计2个连接:节点3到节点2建立udp连接,消息标记为cbr,节点0到节点12建立udp1连接,消息标记为cbr1。

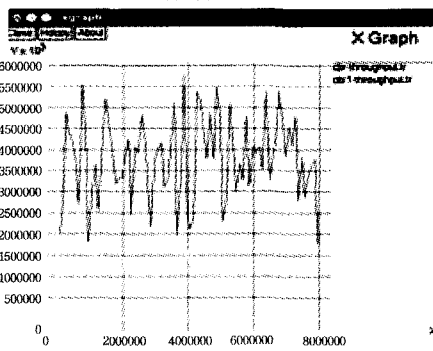
第一次实验,用AODV协议查找路径,用tcp连接路径0-5-6-11-12,丢包数、吞吐量和时延如图4所示,整理后的结果如表4所列。

表4 第一次实验结果数据表

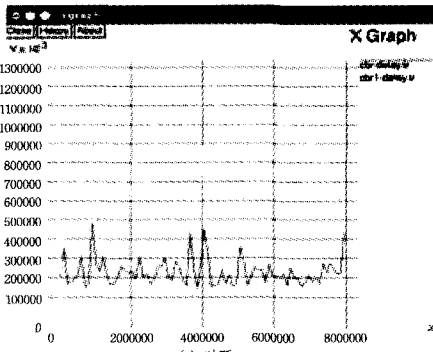
消息	平均时延 (ms)	平均吞吐量 (bps)	丢包总数	接收包总数	丢包率
cbr	23.05	378318	1167	3783	0.24
cbr1	77.86	109799	3663	1098	0.77
合计	35.38	488117	4830	4881	0.50



(a) 每秒丢包数



(b) 吞吐量



(c) 时延

图4 第一次实验结果

从第一次实验数据可以看出,这2条消息是互相干扰的。cbr是短消息,而且通信量大,路径只有1跳,所以它的路径保持不变。cbr1是长消息,而且通信量小,是多跳传输的,对它的路径进行重新规划。考虑网络的性能,第二次实验设计cbr1的路径为0-5-10-11-12,总通信量不增加,负载均衡不变,而且不绕远。第二次实验丢包数、吞吐量和时延如图5所示,整理后的结果如表5所列。

表5 第二次实验结果数据表

消息	平均时延 (ms)	平均吞吐量 (bps)	丢包总数	接收包总数	丢包率
cbr	20.83	419569	840	4196	0.17
cbr1	85.91	99883	3742	999	0.79
合计	33.34	519452	4582	5195	0.47

从两种消息单独来看,cbr1的通信性能略有下降,平均时延增加8ms,平均吞吐量减少10kbps,可靠传输率降低2%;cbr的通信性能得到很大提升,平均时延减少2ms,平均吞吐量增加40kbps,可靠传输率提高7%。这符合舍弃小利益、获得大利益的初衷。从整体上看,规划路径比AODV协议查找的路径,平均时延减少2ms,平均吞吐量增加了约30kbps,可靠传输提高了3%,进而提高了网络的综合性能。实验表明,规划路径是有效的。

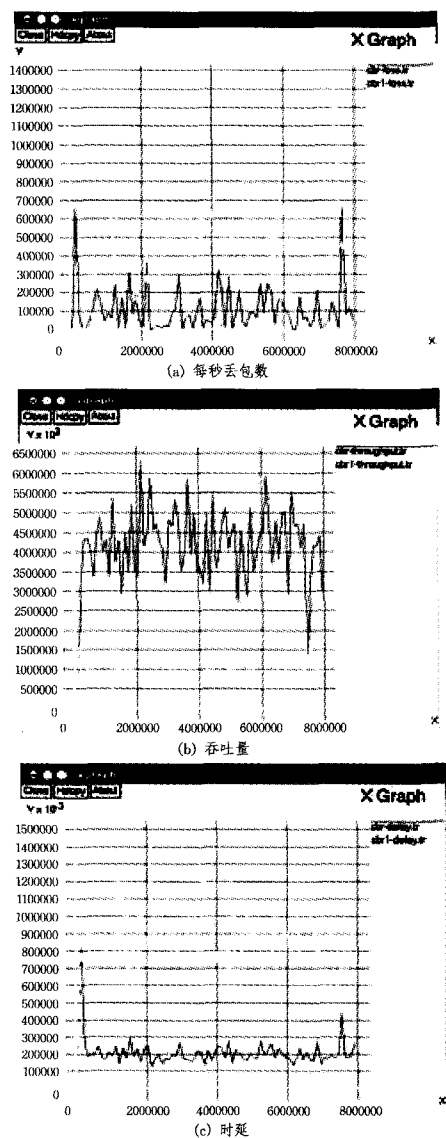


图5 第二次实验结果

结束语 规划路径算法用网关设备来执行算法,对一段时间内工业无线网络的所有消息路径统筹规划,打破路由节点查找路径算法的局限性,不但延长了节点生存时间,而且避免了消息拥塞和干扰,提高了可靠传输率。计算所需要的数

据由路由节点来统计,收集消息的次数和数据量以及生成的路由表是对上一段时间的消息路径最合理的安排。同时要注意到把这个路由表作为下一段时间消息路径的参照,具有一定的时效性。因此,合理安排统计的时间也是一个关键问题。时间过长,路由表就不能准确地指明最佳的消息路径;时间过短,路由表频繁更新是很大的计算负担,而且可能出现这样的问题,上一个短时期,某消息没有出现,下一个短时期,该消息出现了,这也造成路由表不准确。在工业无线网络中,节点和消息是相对稳定的,当统计样本越来越多的时候,就能更加准确地把握其规律,安排合适的时间段长短,对未来的通信情况作出合理的推测,这样生成的路由表更准确。

参 考 文 献

- [1] 冉鹏. ZigBee 网络路由协议性能研究与算法优化[D]. 上海: 同济大学, 2007
 - [2] 黄景博. 移动 Ad hoc 网络的节能路由技术研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2007
 - [3] 游之洋, 龚伟, 赵曦滨, 等. 基于可用性信任模型的 AODV 路由协议改进[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2010, 50(5): 35-738
 - [4] 曹斌, 陈佳品, 李振波. Ad hoc 网络中 AODV 路由协议优化[J]. 计算机工程与应用, 2008, 44(34): 126-128
 - [5] 彭瑜. 工业控制通信网络的实时性要求及现场总线的价值取向[J]. 自动化信息, 2006, 1: 21-24
 - [6] 周婵, 李昕. 工业无线传感器网络性能综合评价研究[J]. 计算机工程, 2010, 36(16): 82-84
 - [7] IETF. Framework for IP Performance Metrics, Table of Contents 6[S]. RFC 2330. 1998
 - [8] IETF. Framework for IP Performance Metrics, Table of Contents 11[S]. RFC 2330. 1998
 - [9] IETF. IPPM Metrics Measuring Connectivity[S]. RFC 2678. 1999
 - [10] IETF. A One-way Delay Metric for IPPM[S]. RFC 2679. 1999
 - [11] IETF. A Round Trip Delay Metric for IPPM[S]. RFC 2681. 1999
 - [12] 徐雷鸣, 庞博, 赵耀. NS 与网络模拟[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2003, 11
-
- (上接第 48 页)
- [3] Laneman J N, Wornell G W, Tse D N C. An efficient protocol for realizing cooperative diversity in wireless networks[C] // Proc. IEEE ISIT. Washington, DC, June 2001: 294
 - [4] Gastpar M, Vetterli M. On the Capacity of Large Gaussian Relay Networks[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2005, 51(3): 765-779
 - [5] Redana S, et al. Final assessment of relaying concepts for all CGs scenarios under consideration of related WINNER L1 and L2 protocol functions[Z]. IST-4-027756 WINNER II D3. 5. 3 v1. 0
 - [6] Peters S W, Panah A Y, Truong K T, et al. Relay Architectures for 3GPP LTE-Advanced [J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2009: 1-11
 - [7] Lin Bin, Ho Pin-han, et al. Optimal Relay Station Placement in Broadband Wireless Access Networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2010, 9(2)
 - [8] Liu K J R, Sadek A K, Su Wei-feng, et al. Cooperative Communications and Networking [M]. Cambridge University Press, 978-0-521-89513-2
 - [9] Zhu Yan, Zheng Hai-tao. Understanding the Impact of Interference on Collaborative Relays[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2008, 7(5)
 - [10] Peng M, Wang W, Zhang Q. Performance Investigation of Cooperative Diversity in Heterogeneous Wireless Communication Systems[J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(1)
 - [11] Proakis J G. Digital communications (4th Ed.) [M]. New York: McGraw-Hill, 2001
 - [12] Lin B, Ho P, et al. Optimal Relay Station Placement in Broadband Wireless Access Networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2010, 9(2)